

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ТАВРИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛЕЖЕНКИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 631.362.32/34:633.1

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА  
ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА ПШЕНИЦЫ

Специальность 05.05.11 – Машины и средства механизации  
сельскохозяйственного производства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Кюрчев Сергей Владимирович  
кандидат технических наук, профессор

Мелитополь – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 6  |
| РАЗДЕЛ I. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....  | 12 |
| 1.1. Технология уборки методом очесывания растений на корню.....   | 12 |
| 1.1.1. Общие сведения об очесывании растений.....  | 12 |
| 1.1.2. Анализ работ посвященных обоснованию технологии уборки способом очесывания растений на корню..... | 13 |
| 1.2. Обзор исследований физико-механических свойств очесанного вороха.....                               | 15 |
| 1.3. Обзор ворохоочистительных машин.....  | 21 |
| 1.4. Анализ исследований процесса сепарации зерновых материалов.....                                     | 25 |
| 1.5. Постановка цели и задач исследований.....   | 31 |
| РАЗДЕЛ II. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА ПШЕНИЦЫ.....         | 33 |
| 2.1. Фракционный состав очесанного вороха пшеницы.....   | 33 |
| 2.1.1. Программа и методика определения содержания отдельных компонентов в очесанном ворохе пшеницы..... | 33 |
| 2.1.2. Статистические характеристики содержания свободного зерна в очесанном ворохе пшеницы.....         | 34 |
| 2.1.3. Анализ содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы.....                      | 36 |
| 2.1.4. Оценка содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы.....                                   | 37 |
| 2.1.5. Статистический анализ содержания соломы в очесанном ворохе пшеницы.....                           | 38 |
| 2.1.6. Общий анализ содержания различных компонентов в очесанном ворохе озимой пшеницы.....              | 39 |
| 2.2. Биометрические характеристики компонентов очесанного вороха пшеницы.....                            | 40 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.1. Программа и методика исследования биометрии.....   | 40        |
| 2.2.2. Определение биометрических характеристик зерновок.....   | 41        |
| 2.2.3. Установление размерных характеристик компонентов соломенной фракции.....                                     | 43        |
| 2.2.4. Анализ биометрии оборванных колосков озимой пшеницы  | 45        |
| 2.2.5. Общий статистический анализ размерных характеристик компонентов очесанного вороха пшеницы.....               | 47        |
| 2.3. Определение плотности очесанного вороха озимой пшеницы.....  | 49        |
| 2.3.1. Программа и методика нахождения плотности очесанного вороха озимой пшеницы.....                              | 49        |
| 2.3.2. Статистические характеристики плотности очесанного вороха озимой пшеницы.....                                | 50        |
| 2.4. Определение динамического коэффициента трения скольжения..   | 52        |
| 2.4.1. Программа и методика нахождения динамического коэффициента трения.....                                       | 52        |
| 2.4.2. Результаты определения динамического коэффициента трения скольжения.....                                     | 56        |
| Выводы по второму разделу.....  | 59        |
| <b>РАЗДЕЛ III. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА.....</b>                   | <b>60</b> |
| 3.1. Методические предпосылки к разработке рабочего органа для сепарации очесанного вороха.....                     | 60        |
| 3.2. Математическая модель сепарации зерна через слой очесанного вороха.....  | 61        |
| 3.3. Моделирование процесса перемещения соломины по рабочему органу.....  | 72        |
| 3.3.1. Методика моделирования.....  | 72        |
| 3.3.2. Результаты моделирования.....  | 76        |
| 3.4. Программа и методика теоретического обоснования параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа..... | 79        |

|   |     |
|---|-----|
| 3.5. Теоретическое обоснование угла наклона сепарирующего рабочего органа.....  | 80  |
| 3.6. Теоретическое обоснование угла направленности колебаний.....   | 86  |
| 3.7. Теоретическое обоснование амплитуды и частоты колебаний сепарирующего рабочего органа.....   | 92  |
| Выводы по третьему разделу.....   | 95  |
| РАЗДЕЛ IV. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....   | 97  |
| 4.1. Программа экспериментальных исследований.....  | 97  |
| 4.2. Методика экспериментальных исследований.....   | 97  |
| 4.2.1. Описание лабораторной установки приборов и оборудования для проведения экспериментальных исследований.....                                   | 97  |
| 4.2.2. Критерии оценки эффективности процесса сепарации очесанного вороха.....  | 100 |
| 4.2.3. Факторы влияющие на функционирование экспериментального рабочего органа.....   | 102 |
| 4.2.4. Методика проведения полнофакторного эксперимента.....  | 105 |
| 4.2.5. Методика проведения производственной проверки ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами.....                                   | 108 |
| Выводы по четвертому разделу.....   | 111 |
| РАЗДЕЛ V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА ПШЕНИЦЫ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА..... | 112 |
| 5.1. Модели регрессии процесса сепарации очесанного вороха пшеницы.....   | 112 |
| 5.2. Моделирование технологического процесса сепарации очесанного вороха пшеницы.....   | 116 |
| 5.2.1. Исследование функций отклика на наибольшее и наименьшее значение.....  | 116 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2.2. Анализ поверхностей отклика качественных показателей работы экспериментального рабочего органа.....   | 124 |
| 5.2.3. Зависимость качественных показателей функционирования рабочего органа от удельной подачи очесанного вороха.....                                     | 128 |
| 5.2.4. Влияние частоты колебаний рабочего органа на эффективность его работы.....  | 130 |
| 5.2.5. Обоснование выбора рационального значения диаметра отверстий решет, обеспечивающего качественное функционирование сепарирующих рабочих органов..... | 131 |
| 5.3. Результаты производственной проверки ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами.....   | 133 |
| 5.4. Технико-экономическая оценка.....   | 135 |
| Выводы по пятому разделу.....  | 137 |
| ВЫВОДЫ.....  | 138 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....  | 140 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....  | 152 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В Украине зернопроизводство является ведущей отраслью сельского хозяйства, при этом его техническое оснащение находится на низком уровне, и в первую очередь это касается зерноуборочной техники. За четверть века парк зерноуборочных комбайнов сократился почти в три раза, а посевные площади под зерновыми увеличилось.

Это привело к значительному росту сезонной нагрузки на один комбайн, и как следствие к нарушению агротехнических сроков уборки, что вызывает увеличение потерь и снижение качества зерна.

Устранить эти недостатки позволяет метод очесывания растений на корню. Однако внедрение данной технологии сдерживается отсутствием технических средств сепарации очесанного вороха.

Такое положение вещей создает **народнохозяйственную проблему**, сущность которой заключается в низкой технико-экономической эффективности выполнения технологического процесса сепарации очесанного вороха пшеницы существующими техническим средствами.

Решений данной народнохозяйственной проблемы невозможно без решения соответствующей **научно-технической задачи**, заключающейся в обосновании, параметров и режимов работы рабочего органа для сепарации очесанного вороха пшеницы, позволяющих повысить эффективность его функционирования.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с «Государственной целевой программой развития украинского села на период до 2015 года», утвержденной распоряжением Кабинета Министров Украины №1158 от 19 сентября 2007 года, «Государственной программы устойчивого развития сельских территорий Украины», утвержденной Указом Президента Украины №500/2011, научно-исследовательской работы «Разработка технологии и технических средств для

растениеводства в условиях орошаемого земледелия юга Украины» № госрегистрации 01070008955, согласно тематического плана НИР Таврического государственного агротехнологического университета на 2011-2015 гг. и программы «Разработка и внедрение Мелитопольской технологии и технических средств уборки зерновых культур очесыванием на корню» № госрегистрации 0111U002550.

**Цель исследования** – повышение эффективности процесса сепарации очесанного вороха пшеницы путем обоснования параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа.

**Рабочая гипотеза** – повышение эффективности процесса очистки очесанного вороха пшеницы возможно при проведении этой операции в две фазы – перераспределение зерновок из верхних слоев вороха в нижние на первой фазе и сепарации сегрегированного зерносоломистого материала на второй.

**Задачи исследований:**

1. Исследовать физико-механические свойства очесанного вороха пшеницы, как объекта его сепарации.
2. Разработать математическую модель просеивания зерна через слои очесанного вороха.
3. Разработать методику теоретического обоснования параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа.
4. Экспериментально исследовать процесс сепарации очесанного вороха пшеницы.
5. Провести производственную проверку ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами и дать технико-экономическую оценку его работы.

**Объект исследования** – процесс сепарации очесанного вороха пшеницы.

**Предмет исследования** – закономерности воздействия конструктивных и технологических параметров, а также кинематических режимов работы рабоче-

го органа для сепарации очесанного вороха пшеницы на качественные и количественные показатели его работы.

### **Методы исследования.**

Теоретические исследования выполнены с использованием положений теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления, а также математического моделирования. Результаты экспериментальных исследований обработаны с использованием теории вероятностей и математической статистики. Для определения рациональных значений параметров и режимов работы использована методика планирования многофакторного эксперимента.

### **Научная новизна полученных результатов:**

– впервые получена математическая модель вероятности просеивания зерна через слой очесанного вороха пшеницы, которая устанавливает зависимость между вероятностью прохождения зерна сквозь ворох и расстоянием между соломинками с учетом взаимного расположения соломин и отношения размеров зерновки к расстоянию между соломинками, что позволяет выбрать критерии теоретического обоснования параметров и режимов его работы;

– усовершенствована методика покомпонентной процедуры анализа функционирования рабочего органа для сепарации очесанного вороха пшеницы, которая позволяет теоретически обосновать рациональные значения конструктивных параметров и кинематических режимов его работы;

– получили дальнейшее развитие исследования уравнений движения материальной точки (соломины) по наклонно-колеблющейся поверхности, которые позволяют моделировать ее перемещение в зависимости от изменения сочетаний значений параметров и режимов функционирования рабочего органа;

– на уровне новизны построена математическая модель в виде уравнений регрессии, которая устанавливает зависимость между технологическими и конструктивными параметрами, а также кинематическими режимами и показателями качества работы рабочего органа, что дало возможность эксперименталь-

но обосновать их рациональные значения.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Установлены статистические характеристики фракционного состава и биометрии каждого компонента очесанного вороха пшеницы, что дало возможность определить вероятность просеивания зерна через слои очесанного вороха.

2. Определен динамический коэффициент трения скольжения соломы по очесанному вороху, очесанного вороха по очесанному вороху, соломы по металлу и очесанного вороха по металлу, который был использован при моделировании движения соломины по решетку.

3. Обоснованы рациональные значения технологических и конструктивных параметров, а также кинематических режимов работы сепарирующего рабочего органа, которые способствовали повышению эффективности его функционирования.

4. Разработанный рабочий орган, установленный на серийный ворохоочиститель был внедрен в аграрном частном предприятии ТЕРА ВОМ Мелитопольского района Запорожской области (акт проведения производственных испытаний от 15.07.2015 г.). Это позволило улучшить качество очистки очесанного вороха, снизить потери зерна со сходовой фракцией и повысить технологическую надежность ворохоочистителя.

**Личный вклад соискателя.** Основные результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит следующее: определение и анализ статистических характеристик механико-технологических свойств очесанного вороха озимой пшеницы [89]; статистический анализ биометрии компонентов очесанного вороха озимой пшеницы [90]; получение в полевых условиях экспериментальных данных, их обработка и установление зависимости производительности и качества работы ворохоочистителя скальператорного типа от подачи очесанного вороха [80]; теоретическое обоснование угла наклона экспериментального ре-

шета [109]; анализ регрессионных моделей качественных показателей функционирования сепарирующего рабочего органа [116]; предложена конструкция метателя, оборудованного декой, который позволяет производить домолот оборванных колосков и тем самым улучшить условия для последующей сепарации очесанного вороха. Исследования проводились в научных лабораториях ТГАТУ и в производственных условиях учебно-опытного хозяйства ТГАТУ «Лазурное», УкрНИИПИТа им. Л. Погорелого, а также на зернотоке частного предприятия ТЕРА ВОМ Мелитопольского района, Запорожской области.

### **Апробация результатов диссертации.**

Основные положения и результаты работы были заслушаны и обговорены на XIII Міжнародній науковій конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій» присвяченої пам'яті академіка Леоніда Погорілого (сmt. Дослідницьке, Васильківський район, Київська обл., Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій ім. Леоніда Погорілого, 27-28 вересня 2012 року), на Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві» (м. Харків. Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 21-22 березня 2013 року) на IX і X Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми, конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кіровоград, Кіровоградський національний технічний університет, 7-8 листопада 2013 року та 5-6 листопада 2015 року) на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України присвяченої пам'яті академіка І. І. Мартиненка» (м. Мелітополь, Таврійський державний агротехнологічний університет, 10-14 червня 2015 року) на Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України» (м. Мелітополь, Таврійський державний

агротехнологічний університет 2012-2015 року) на Науково-технічній конференції науково-педагогічних працівників «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський державний аграрний університет, 25 лютого – 01 березня 2013 року).

**Публикации.** Результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 21 печатной работе (7,88 у.п.л.), в том числе в 14 без соавторов (4,25 у.п.л.). В научных специальных изданиях Украины опубликовано 12 статей (5,38 у.п.л.), в зарубежных – 2 (0,69 у.п.л.). Результаты исследований представлены 4 тезисами докладов на конференциях (0,50 у.п.л.). По теме диссертации получено 3 патента Украины на полезную модель (1,31 у.п.л.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из вступления, пяти разделов, выводов, 8 приложений и списка использованных источников, изложена на 197 страницах машинописного текста, включает 99 рисунков и 39 таблиц. Список использованных источников содержит 118 наименований из них 10 на иностранных языках.

## РАЗДЕЛ I

### АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

#### 1.1. Технология уборки методом очесывания растений на корню

##### 1.1.1. Общие сведения об очесывании растений

Очес зародился в глубокой древности, в 100...400 г. н.э. в древней Галлии уже существовала очесывающая жатка [1]. Рабочим органом у этой жатки являлся очесывающий гребень, который был смонтирован впереди повозки, на этой же повозке устанавливался короб для сбора очесанного вороха [2].

Затем много веков спустя в середине XIX века в Австралии идея очеса возродилась вновь. Изобретатели Джон Ридли и Джон Рэтхол Булл предложил новую конструкцию очесывающей жатки, так называемый австралийский стриппер [3], а в 1833 году Джеймсом Морроу был создан первый комбайн с очесывающими рабочими органами. Совершенствованием конструкции очесывающего комбайна занялся Виктор Мак-Кей, который впоследствии организовал их массовое производство [4, 5]. В XX веке продолжились работы по обоснованию метода очесывания растений на корню [6-9]. Наиболее весомый вклад в развитие очесывания растений на корню внесли ученые Мелитопольского института механизации сельского хозяйства (ныне Таврического государственного агротехнологического университета). Шабанов П. А. [10-14], Данченко Н. Н. [15, 16], Гончаров Б. И. [17], Повиляй В. М. [18], Цыбульников В. Н. [19], Голубев И. К. [20] и др.

Работы по обоснованию метода очесывания растений на корню велись также во Всесоюзном институте сельскохозяйственного машиностроения [21, 22] и в Украинском научно-исследовательском институте прогнозирования техники и технологий для сельскохозяйственного производства им. Леонида Погорелого [23]. За рубежом также проводились исследования метода очесывания растений на корню [24, 25].

Как видно из приведенных кратких исторических сведений метод очесывания в своем развитии прошел долгий путь от глубокой древности и до наших дней и тем самым доказал свое право на жизнь.

### 1.1.2. Анализ работ посвященных обоснованию технологии уборки способом очесывания растений на корню

Уборка методом очесывания растений на корню может быть реализована либо в комбайновом, либо в стационарном варианте. В комбайновом варианте уборка осуществляется следующим способом. Вместо жатки на комбайн навешивается очесывающее устройство.

Использование очесывающих устройств позволяет повысить производительность уборочного процесса и качество работы комбайнов. Об этом свидетельствуют результаты исследований проведенных в КубНИИТИМе [26]. Комбайн СК-5М с навешенной на него однобарабанной очесывающей жаткой шириной 4,2 м по показателям работы сравнивался с комбайном СК-5М с навешенной на него серийной жаткой шириной 5 м. Испытания проходили на уборке озимой пшеницы урожайностью 66,3 ц/га. Экспериментальный комбайн показал производительность 21,2 т/ч, по сравнению с серийным 7,3 т/ч, при однопроцентном уровне потерь зерна за молотилкой. Налицо трехкратный рост производительности. Потери составили 0,48% при уборке комбайном СК-5М с очесывающей жаткой и 0,25% при работе СК-5М с серийной жаткой, а вот дробление зерна при очесывании в два раза меньше, чем при скашивании, т.е. 1,46% и 2,34% соответственно.

В 1985 г. КубНИИТИМ проводил испытания рисоуборочного комбайна СКГО-12 оснащенного двухбарабанным очесывающим устройством на уборке риса сорта «Спальчик» урожайностью 67,6 ц/га [27].

Производительность по зерну составила 10,3...19,6 т/ч, а общие потери за комбайном находились в диапазоне 1,02...1,97%, при этом дробление зерна равнялось 1,09%.

В целом многолетние исследования, как это видно из приведенных экспериментальных данных доказывают преимущества очесывания растений на корню перед традиционным скашиванием.

Однако наиболее эффективен метод очесывания на корню в стационарном

варианте. В пользу данного утверждения свидетельствуют многочисленные исследования [13, 16, 19, 28-32]. Теоретические основы стационарной технологии методом очесывания растений на корню изложены в работе [33].

В данных работах предлагается следующая технологическая схема уборки. Полевая уборочная машина, оснащенная двухбарабанным очесывающим устройством очесывает растения на корню, и подает очесанный ворох в прицепленную сзади тележку 2ПТС-4.0. После того, как тележка полностью наполняется очесанным ворохом ее транспортируют на стационарный пункт для доработки. Доработка очесанного вороха заключается в выделении свободного зерна и приготовлении кормовых брикетов. В работе [31] приводятся результаты энергетической оценки существующей комбайновой технологии уборки и стационарной технологии с применением метода очесывания растений на корню. Проведенные в [31] расчеты показали, что стационарная технология уборки зерновых культур с использованием очесывания растений снижает общие энергозатраты на уборку 1 га на 66%, энергозатраты приходящиеся на уборку и транспортировку на зерноток 1 кг зерна на 45%, а также энергозатраты на уборку транспортировку и скирдование 1 кг соломы на 35%, кроме того внедрение стационарной технологии позволит существенным образом сократить расход жидкого осветленного топлива за счет того, что мобильным агрегатом в поле выполняется только сбор вороха и его транспортировка на стационар, а все остальные операции выполняются на стационарном пункте доработки вороха, который оборудован электрическим приводом [34].

Таким образом, мы видим, что стационарная технология уборки с применением очесывающих модулей позволяет в целом сокращать энергозатраты на весь уборочный цикл, перевести часть технологических операций уборочного процесса на электрический привод [34] и тем самым уменьшить затраты на уборку жидкого осветленного топлива, сократить потери зерна, ослабить зависимость уборочного процесса от влияния погоды, обеспечить условия для своевременной подготовки полей. Однако внедрение данной технологии сдерживается отсутствием технических средств для ее реализации. Если первая операция

технологического цикла – очесывание растений на корню, более или менее обоснована и для ее выполнения имеется техническое средство – прицепной уборочный модуль с очесывающими рабочими органами, то последующие операции технологического цикла предстоит еще обосновать, и разработать для их обеспечения рабочие органы, и первым рабочим органом в данной цепи, является сепарирующий рабочий орган.

## 1.2. Обзор исследований физико-механических свойств очесанного вороха

Анализ многочисленных работ, посвященных изучению физико-механических свойств очесанного вороха, показывает, что в основном программа исследований включала вопросы определения фракционного состава, размерно-массовых характеристик компонентов очесанного вороха, влажности вороха и его плотности.

Изучение фракционного состава очесанного вороха проводилось на различных культурах, а именно на метелочных (сорго, рис, просо) на зерновых колосовых (озимая пшеница, яровой ячмень и на бобовых (соя)).

Исследование уборки зернового сорго методом очесывания его на корню [35] показали, что обмолот сорго на корню методом очесывания хорошо сочетается с его физико-механическими свойствами, на оптимальных режимах работы очесывающий аппарат производит почти полный обмолот метелок – свободное зерно в ворохе составляет 72-83%, грубые солоmistые примеси 15,5...26,5%, а оборванные метелки 1,5%.

Результаты исследований фракционного состава очесанного вороха риса приведены в работе [15]. Очесанный ворох риса был получен при его уборке однобарабанным очесывающим устройством с щеточными рабочими органами, которые позволяют повысить содержание свободного зерна в очесанном ворохе риса.

Так в среднем свободного зерна в очесанном ворохе риса содержится 78,2%, зерна в метелках 17,4% и крупных солоmistых примесей 4,4%.

Экспериментальные исследования [12] двухбарабанного очесывающего устройства на уборке риса показали, что зерновая составляющая очесанного вороха, полученного в результате очеса колебалась в диапазоне 80...92% в том числе свободного зерна 75...90%, зерна в оборванных метелках 10...25%.

Более глубокие исследования фракционного состава очесанного вороха риса, полученного при работе рисоуборочного комбайна с повешенным на него двухбарабанным очесывающим устройством приведены в работе [27]. На основании полученной информации были определены статистические характеристики содержания в очесанном ворохе свободного зерна, оборванных метелок и грубых солоmistых примесей в виде законов распределения случайных величин каждой фракции в отдельности, построены дифференциальные кривые распределения процентного содержания каждого компонента. Эти исследования позволили автору пометить дальнейшие пути выбора и обоснования рабочего органа для сепарации очесанного вороха риса.

В работе [36] приведены результаты исследований влияния поступательной скорости и времени уборки на фракционный состав очесанного вороха риса. Исследования проводились на 3...4 день со дня начала уборки.

Увеличение поступательной скорости движения комбайна и изменение фактической подачи не приводит к изменению фракционного состава очесанного вороха риса.

В этой же работе проводились исследование влияния сроков уборки на фракционный состав очесанного вороха риса, при этом методика исследований предусматривала отбор проб в одно и то же время. Полученные результаты приведены в таблице 1.1 [36].

Анализируя данные таблицы 1.1, следует отметить тенденцию к улучшению качества вороха к середине уборочного процесса, а затем начиная с десятого дня к ухудшению. В конце зачетного периода наблюдался минимум содержания свободного зерна в очесанном ворохе 61,2%.

Изучение фракционного состава очесанного вороха проса приведено в работе [37].

Таблица 1.1

Изменчивость фракционного состава очесанного вороха риса сорта «Спальчик»  
на протяжении уборочного сезона

| Содержание в ворохе<br>компонентов                  | Дни взятия проб вороха риса со дня начала уборки |      |      |      |
|---|--|------|------|------|
|   | 1  | 5    | 9    | 13   |
| Свободного зерна, $\alpha_{св.з.}$ , %              | 63,2   | 77,5 | 77,0 | 61,2 |
| Зерна в оборванных метелках,<br>$\alpha_{з.м.}$ , % | 13,5   | 8,2  | 7,6  | 12,2 |
| Соломистых частиц, $\alpha_{с.}$ , %                | 23,3   | 14,3 | 15,4 | 26,6 |

В очесанном ворохе проса среднее содержание свободного зерна 87,3%, необмолоченных метелок 3,5% и крупных соломистых примесей 9,2%.

Анализ работ, в которых изучается фракционный состав зерновых колосовых культур приводит к иной картине. Так исследования [19], которые проводились в Приазовском районе Запорожской области на уборке озимой пшеницы зерноуборочным комбайном с навешенным на него двухбарабанным очесывающим устройством показали, что в среднем свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы содержится 35...43%, оборванных колосков 33...47% и грубых соломистых примесей 10...32%.

В работах [38, 39] приводятся результаты исследования которые проводились в опытном хозяйстве НПО «Элита» Кировоградской области на уборке озимой пшеницы и ярового ячменя, самоходной полевой уборочной машиной с навешенным на нее двухбарабанным очесывающим устройством. После разбора проб и расчета статистических характеристик оказалось, что очесанный ворох озимой пшеницы имеет следующий состав: среднее значение содержания свободного зерна 61,0%, крупных соломистых примесей 36,3% и оборванных колосков 2,7%. Для фракционного состава ярового ячменя наблюдалась аналогичная картина – свободного зерна в среднем 60%, крупных соломистых примесей 39% и оборванных колосков 1,0%.

Фракционный состав очесанного вороха изучался также на примере бобовых культур, а в частности сои. Так в работе [40] приведены результаты иссле-

дований фракционного состава очесанного вороха полученного на уборке сои прицепной уборочной машиной с двухбарабанным очесывающим устройством. Очесанный ворох сои представляет собой смесь свободного зерна, оборванных необмолоченных бобов и солоmistых примесей.

В среднем свободного зерна в очесанном ворохе сои содержится 61,37%, необмолоченных бобов 23,51% и солоmistых примесей 12,15%.

Данные исследований биометрических характеристик компонентов очесанного вороха риса приведены в работах [36, 41] свидетельствуют о том, что средняя длина необмолоченных метелок риса сорта Краснодарский-424 колеблется в пределах 0,16...0,2 м, коэффициент вариации находится в диапазоне 38,3...45,6%.

Длина оборванных солоmistых частиц этого сорта составляет 0,172...0,213 м, а коэффициент вариации 41,4...47,0%.

Полученные статистические материалы позволили автором построить кривые плотности распределения случайных величин биометрических характеристик очесанного вороха риса, которые приведены в работах [36, 41].

В работе [27] также приведены результаты исследований размерных характеристик компонентов очесанного вороха риса. На основании полученных массивов случайных величин были построены гистограммы статистических рядов и определены параметры выравнивающих кривых распределений.

Немаловажной характеристикой физико-механических свойств очесанного вороха является его плотность. Плотность вороха исследована на примере очесанного вороха риса. Так в работе [27] указывается на то, что плотность очесанного вороха риса колеблется в пределах 130...340 кг/м<sup>3</sup>, а в работе [41] приведены данные, что плотность очесанного вороха риса находится в диапазоне 131,6...249,1 кг/м<sup>3</sup>. Такой разбег значений плотности очесанного вороха риса указывает на то, что плотность вороха носит случайный характер и может изменяться от влияния различных факторов главным из которых является процентное содержание свободного зерна в очесанном ворохе. Для очесанного вороха риса этот процесс был исследован и результаты полученных зависимостей

приведены в работах [27, 41].

В работе [36] приводится линейная зависимость плотности очесанного вороха риса от содержания в нем свободного зерна, а вот в работе [27] получено нелинейное уравнение второго порядка.

Установленные в [27] и [36] зависимости имеют вид:

$$\rho = 43,14 + 3,54\alpha_{св.з.}, \quad (1.1)$$

$$\rho = 75,5 - 0,52\alpha_{св.з.} + 0,06\alpha_{св.з.}^2, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  – плотность вороха, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha_{св.з.}$  – содержание в ворохе свободного зерна по массе, %.

На наш взгляд уравнение (1.2) более точно описывает характер зависимости, так как процесс является достаточно сложным, имеет место влияние других факторов, и поэтому линейным законом данная зависимость может описываться лишь приближенно.

Для зерновых колосовых, а именно озимой пшеницы и ярового ячменя было установлено среднее значение влажности очесанного вороха. В работах [38, 39] приведена информация о плотности очесанного вороха озимой пшеницы и ярового ячменя. Так среднее значение плотности очесанного вороха озимой пшеницы составило 110,6 кг/м<sup>3</sup>, а ярового ячменя 96,0 кг/м<sup>3</sup>.

Технологический процесс сепарации очесанного вороха непосредственным образом связан с его перемещением по поверхности сепарирующих рабочих органов. Данное перемещение несомненно сопровождается его трением о рабочие поверхности.

Как известно из курса физики [42] трение зависит от свойств и состояния перемещаемого материала, а также от степени обработки сепарирующей рабочей поверхности.

Значение динамического коэффициента трения для отдельных компонентов, входящих в состав очесанного вороха риса приведены в табл. 1.2 [43].

Для зерновых колосовых также определялся динамически коэффициент трения при различной погоде, полученные данные приведены в табл. 1.3 [44].

Таблица 1.2

Динамический коэффициент трения частей риса сорта  
«Краснодарский-424»

|   | Части растений    | Материал |               |         |        | Средняя влажность, % |
|---|-------------------|----------|---------------|---------|--------|----------------------|
|   |                   | сталь    | черное железо | полотно | резина |                      |
| 1 | Стебли на корню   | 0,40     | 0,42          | 0,33    | 0,79   | 58,9                 |
| 2 | Стебли из валка   | 0,39     | 0,29          | 0,24    | 0,75   | 14,1                 |
| 3 | Метелки на корню  | 0,30     | 0,32          | 0,35    | 0,70   | 19,63                |
| 4 | Метелки из валков | 0,23     | 0,29          | 0,37    | 0,61   | 14,02                |
| 5 | Солома            | 0,29     | 0,37          | 0,28    | 0,73   | 16,98                |

Таблица 1.3

Сравнительная таблица динамических коэффициентов трения  
при различной погоде

| Рабочие поверхности | Засушливые условия |        |        |         |        | Дождливые условия |        |        |         |        |
|---------------------|--------------------|--------|--------|---------|--------|-------------------|--------|--------|---------|--------|
|                     | зерно              | полова | солома | колосья | стебли | зерно             | полова | солома | колосья | стебли |
| Оцинкованная сталь  | 0,28               | –      | 0,26   | 0,22    | 0,24   | 0,32              | 0,38   | 0,37   | 0,37    | 0,38   |
| Обработанная сталь  | 0,25               | 0,37   | 0,35   | 0,33    | 0,36   | 0,33              | 0,40   | 0,38   | 0,39    | 0,43   |

Как видно из приведенных данных табл. 1.2-1.3 коэффициент трения определялся для продуктов обмолота различных культур пшеницы, риса в работе [45] имеются также данные по овсу, ржи и т.д. Однако для очесанного вороха зерновых колосовых коэффициент трения не определялся и на сегодняшний день данный вопрос не изучен.

В целом по комплексу вопросов связанных с изучением физико-механических свойств очесанного вороха можно сделать следующее заключение. Физико-механические свойства очесанного вороха риса разных сортов изучены достаточно полно, о чем свидетельствуют приведенные результаты исследований. Что касается очесанного вороха зерновых колосовых, то здесь имеются некоторые сведения, в частности средние значения фракционного состава и среднее значение плотности очесанного вороха, но этой информации бесспорно недостаточно для разработки рабочего органа для сепарации очесанного вороха зерновых культур.

Требуются более глубокие исследования фракционного состава, биомет-

рии, плотности и коэффициента трения очесанного вороха зерновых колосовых.

### 1.3. Обзор ворохоочистительных машин

На сегодняшний день нет машин для сепарации очесанного вороха зерновых, за исключением экспериментальных образцов, изготовленных в единичном экземпляре. Выпускаемые промышленностью ворохоочистители, предназначены для обработки зернового вороха, поступающих от зерноуборочных комбайнов [46-53], малоэффективны при сепарации очесанного вороха. В качестве рабочих органов в этих машинах используются и плоские решета (ОВС-25), сетчатые транспортеры (МПО-50) [53], а в зарубежные машинах скальператорные рабочие органы. Скальператорные рабочие органы представляют собой цилиндрические решета с наружной рабочей поверхностью [54-57].

Применительно к условиям доработки очесанного вороха зерновых были предложены схмотехнические решения с использованием цилиндрических решет с наружной рабочей поверхностью.

Так в [58] предложен сепаратор очесанного вороха зерновых рис. 1.1.

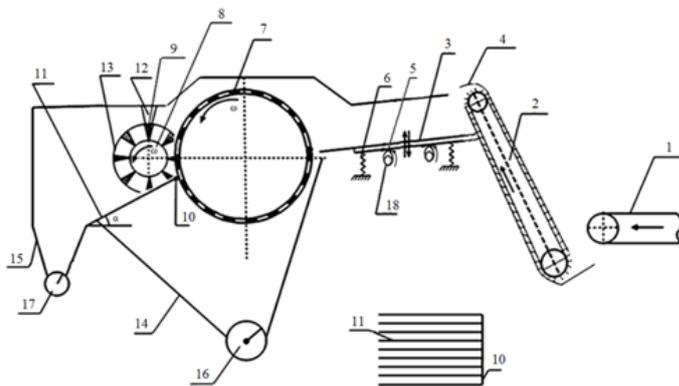


Рис. 1.1. Технологическая схема сепаратора очесанного вороха: 1 – транспортер-питатель; 2 – наклонная камера; 3 – приемный лоток; 5 – эксцентрики; 6 – пружины; 7 – решетный барабан; 8 – очистительная щетка; 12 – кронштейн; 13 – дека; 17 – шнек

Технологический процесс предложенного сепаратора осуществляется следующим образом. Очесанный ворох с помощью транспортера-питателя 1 подается в наклонную камеру 2, где скребковый транспортер транспортирует его на приемный лоток 3. Приемный лоток совершает вибрационное движение, при помощи эксцент

трикового механизма, который состоит из двух пар эксцентриков 5, с одинаковым эксцентриситетом и двух пар цилиндрических пружин. Во время движения вороха по лотку зерновки, которые находятся в верхних слоях просеиваются

через отверстия, которые образуют соломины и оборванные колоски. Таким образом, происходит предварительная сегрегация вороха и на решетный барабан поступает сегрегированный ворох. Зерно находится внизу и идет проходом, а солома и колоски вверху идут сходом. Сходовая фракция снимается очистительной щеткой 8 и под действием сил трения выделяется из колосков зерно которое просеивается через сегрегаторы 11, а крупные примеси идут сходом и выводятся шнеком 17.

В работе [59] рассматривается конструкция и технологический процесс стационарного агрегата доработки очесанного вороха зерновых. Технологическая схема агрегата приведена на рис. 1.2 [59].

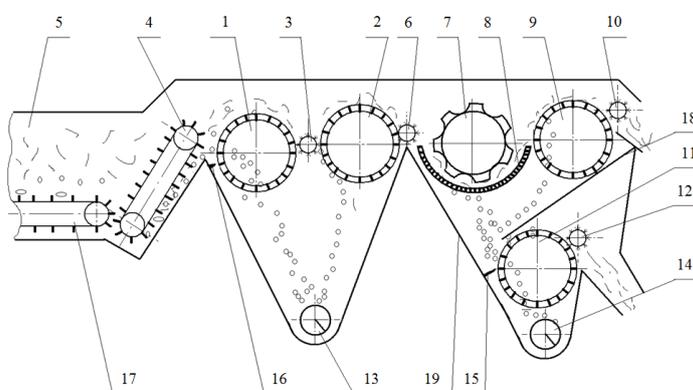


Рис. 1.2. Технологическая схема стационарного агрегата доработки очесанного вороха

Технологический процесс предлагаемого агрегата осуществляется следующим образом. Питающий транспортер 17 подает на дозирующий транспортер 4 очесанный ворох. Дозирующий транспортер 4 тонким слоем подает ворох на цилиндрическое решето 1, где свободное зерно с мелкими примесями идет проходом, а соломенные примеси, оборванные колоски и часть зерна идут сходом. Сходовая фракция снимается ротационной очистительной щеткой 3 и подается на рабочую поверхность цилиндрического решета 2, где проходом идет свободное зерно, а сходом соломенные примеси и оборванные колоски. Проходовая с первого и второго цилиндрических решет фракция выводится шнеком 13, а сход со второго решета ротационной щеткой подается на молотильный барабан 7, где выделяется из оборванных колосков свободное зерно, которое просеивается через отверстия подбарабанья 8. Грубый ворох с частью зерна, которое не прошло через отверстия подбарабанья поступает на цилиндрическое решето 9, которое выделяет свободное зерно «в проход», а соломенные примеси идут «сходом» и снимаются ротационной щеткой 10. Выделенное в результате обмолота обор-

Технологический процесс предлагаемого агрегата осуществляется следующим образом. Питающий транспортер 17 подает на дозирующий транспортер 4 очесанный ворох. Дозирующий транспортер 4 тонким слоем подает ворох на цилиндрическое

ванных колосков зерно, а также «проход» с решета 9 очищается на цилиндрическом решете 11. Очищенное зерно выводится зерновым шнеком 14, а соломенные примеси снимаются ротационной щеткой 12.

Идея использовать скальператорные рабочие органы для сепарации очесанного вороха риса нашла свое отражение при разработке решетного сепаратора установленного на экспериментальном комбайне с очесывающими рабочими органами (рис. 1.3) [27].

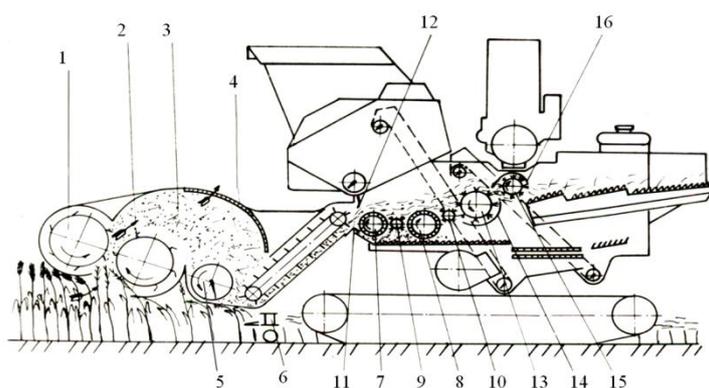


Рис. 1.3. Технологическая схема экспериментального комбайна с решетным сепаратором: 1 – отбойный барабан; 2 – очесывающий барабан; 3 – приемная камера; 4 – сетка; 5 – шнек; 6 – режущее устройство; 7 – первый решетный барабан; 8 – второй решетный барабан; 9 – промежуточная щетка; 10 – щетка-очиститель; 11 – питающий лоток; 12 – отбойная шторка; 13 – молотильно-сепарирующий барабан; 14 – подбарабанье; 15 – щеточный домалачивающий барабан; 16 – терочная поверхность

Экспериментальный комбайн рис. 1.3 [27] на базе комбайна СКГД-6Р «Колос» состоял из следующих основных узлов: двухбарабанного очесывающего устройства роторного типа, решетного сепаратора скальператорного типа и щеточного домалачивающего устройства.

Технологический процесс экспериментального комбайна осуществлялся следующим обра-

зом. Очесывающее устройство очесывает растения и наклонным транспортером очесанный ворох подается на питающий лоток 11, откуда он поступает на первый решетный барабан 7, часть зерна идет проходом через решетную поверхность первого барабана, а часть зерна, крупные солоmistые примеси и оборванные метелки идут сходом. Сходовую фракцию снимает промежуточная щетка 9 и подает на рабочую поверхность второго барабана 8. Проходом идет оставшееся зерно, а сходом крупные солоmistые примеси и оборванные метелки. Щетка-очиститель 10 подает сходовую фракцию на щеточный молотильно-сепарирующий барабан 13, на выходе которого было установлено домалачивающее устройство 15. Домалачивающее устройство обмалачивает оборванные метелки. Оставшееся зерно выделяется на клавишном соломотрясе. Дальней-

ший процесс очистки зерна идет по традиционной схеме. Очищенное зерно поступает в бункер комбайна.

Приведенная схема сепарации очесанного вороха может применяться для обработки очесанного вороха метелочных культур (риса, проса, овса), где содержание свободного зерна в ворохе составляет 75...95%, а при сепарации очесанного вороха зерновых колосовых с содержанием свободного зерна (35...65%) могут возникать нарушения технологического процесса.

Второй вариант доработки очесанного вороха риса был реализован на примере сепарирующего устройства смонтированного на экспериментальном комбайне рис. 1.4 [36, 60].

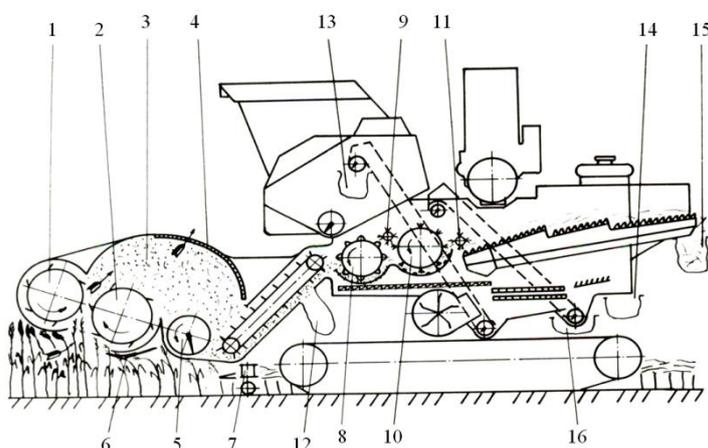


Рис. 1.4. Конструктивно-технологическая схема экспериментального комбайна с двухбарабанным МСУ: 1, 2 – очесывающие барабаны; 3 – камера; 4 – сетка; 5 – шнек; 6 – нижний кожух; 7 – режущее устройство; 8 – штифтовый ротационный барабан; 9 – промежуточный битер; 10 – молотильный барабан; 11 – отбойный битер; 12, 13, 14 – пробоотборники

Экспериментальный комбайн с двухбарабанным молотильно-сепарирующим устройством имел конструктивно-технологическую схему во многом схожую с комбайном приведенным на рис. 1.3, за исключением молотильно-сепарирующих рабочих органов.

Технологический процесс протекает следующим образом.

Очесанный ворох риса подается приемным битером на вход ротационного сепаратора. Барабан сепаратора совершая вращательное движение своими штифтами распределяет свободное зерно на поверхность сепарирующей решетки, что дает ему возможность пройти через отверстия решетки. Оборванные метелки и соломистые частицы промежуточным битером подаются на вход молотильного барабана. Молотильный барабан обмолачивает их, и одновременно выделяет обмолоченное зерно через сепарирующую решетку. Обмолоченный зерновой ворох, который прошел, через сепарирующую решетку поступает на скатную доску, а затем на решетка очистки. Соломистая фракция и зерно нахо-

дящееся в ней подается отбойным битером 11 на клавишный соломотряс. Отсепарированный ворох попадает в пробоотборник 15.

На наш взгляд недостатком такой схемы является ударное воздействие штифтов ротационного сепаратора на свободное зерно, что может вызвать повышенный уровень дробления зерна.

#### 1.4. Анализ исследований процесса сепарации зерновых материалов

Весомый вклад в разработку основ сепарации внесли Горячкин В. П., Ульрих Н. Н., Летошнев М. Н., Кропп Л. И., Кубышев В. А., Киреев М. В., Павловский Г. Т., Волик Р. Н., Григорьев С. М., Михайлов Е. В., Ковальчук Ю. К., Кожуховский И. Е., Тищенко Л. Н. [62-73].

В данных работах рассматривается сепарация зерновых материалов. Под зерновыми материалами понимается зерновой ворох, поступающий от комбайнов.

Исследование рабочих органов машин предварительной очистки сильнозасоренного влажного зернового вороха выполнили Травина Г. Е. [74], Ерошенко Л. И. [75], Михайлов Е. В. [76], Леженкин А. Н. [77].

Все вышеприведенные работы объединяет то, что они посвящены исследованию технологического процесса цилиндрических решет с наружной рабочей поверхностью, так называемых скальператоров при предварительной очистке сильнозасоренного влажного зернового вороха (табл. П.1, Приложение А).

Рассмотрим более подробно приведенные в таблице П.1 (Приложение А) исследования.

Работа [74] посвящена исследованию процесса сепарации сильнозасоренного зернового вороха повышенной влажности. Автор для реализации поставленной цели предложила использовать цилиндрическое решето с наружной рабочей поверхностью (табл. П.1, схема №1, Приложение А).

Ерошенко Л. И. с целью повышения производительности и уменьшения потерь предложил двухбарабанную схему с последовательным расположением решет (табл. П.1, схема №2, Приложение А).

С целью интенсификации технологического процесса сепарации Михайлов Е. В. [76] предложил перед цилиндрическим решетом устанавливать лоток-интенсификатор, на который зерновой ворох поступает по аэропитателю. За счет интенсификации технологического процесса удельная производительность такого рабочего органа может достигать 5,0...6,0 т/ч·дм (табл. П.1, схема №3, Приложение А).

В работе [77] исследовались одно и двухбарабанная схема ворохоочистителя с аэролотком. Автор предложил конструкцию потереснижающих устройств, которые дают возможность снизить потери зерна при максимальной производительности (табл. П.1, схема №3 и схема №4, Приложение А).

Как видно из приведенного анализа, а также данных таблицы П.1 (Приложение А) исследования [74-77] посвящены главным образом исследованию процесса сепарации сильнозасоренного влажного зернового вороха, который, безусловно, отличается от очесанного вороха. Наиболее близким к очесанному вороху по фракционному составу является невеяный ворох, получаемый при работе комбайна с демонтированной очисткой, при реализации технологической схемы уборки «Невейки» [78, 79].

Для сепарации невеяного вороха разработан пневмоинерционный сепаратор, технологическая схема которого приведена на рис. 1.5 [79].

На основании приведенных испытаний экспериментального сепаратора [79] можно сделать следующее заключение. Производительность сепаратора может достигать 72 т/ч, чистота зерна 98,5...99,0%, а потери 0,5%, при условии, что засоренность исходного материала солоmistыми примесями не превышает 30%.

Данный сепаратор непригоден для очистки очесанного вороха зерновых. Во-первых, он достаточно энергоемкий, т.к. он требует затрат энергии на привод приемного транспортера, двух транспортеров инерционного метателя, скребково-штифтового транспортера, зернового шнека, колосового шнека вентилятора, а во-вторых, невеяный ворох по фракционному составу и по биометрическим характеристикам отдельных компонентов все же отличается от

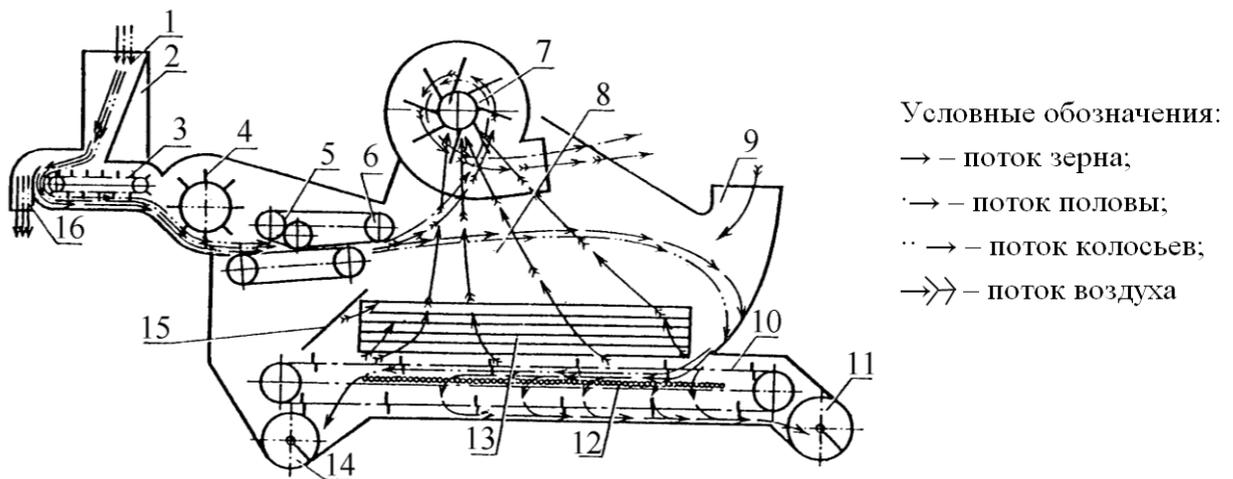


Рис. 1.5. Технологическая схема пневмоинерционного сепаратора: 1 – приемник; 2 – конусный распределитель; 3 – приемный транспортер; 4 – приемный бункер; 5, 6 – транспортеры инерционного метателя; 7 – вентиляционная установка; 8 – камера сепарации; 9 – задний воздухозаборник; 10 – скребково-штифтовый транспортер; 11 – зерновой шнек; 12 – роликовое решето; 13 – боковой воздухозаборник; 14 – колосовой шнек; 15 – скатная доска; 16 – обратный слив приемного устройства очесанного вороха и в силу этого возможны технологические отказы при его работе на очесанном ворохе. В связи с чем, были проведены исследования, направленные на разработку и обоснование рабочих органов для сепарации очесанного вороха [27, 35].

Рассмотрим результаты данных работ более подробно.

В работе [35] обоснованы параметры молотильно-сепарирующего устройства рисоуборочного комбайна очесывающего типа (рис. 1.4), т.е. рассмотрен процесс сепарации очесанного вороха риса, выполняемый экспериментальным молотильно-сепарирующим устройством.

Теоретические исследования ротационного сепаратора (рис. 1.4), приведенные в работе [35] включали в себя обоснование размеров сепарирующей решетки и определение размеров ячейки сепарирующей решетки. Для данных исследований была использована теория массового обслуживания. Автор использовал формулу Эрланга для определения вероятности отказа:

$$P_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{n \cdot \mu}\right)^n \cdot \frac{n^n}{n!}}{\sum_{x=0}^n \left[\left(\frac{\lambda}{n \cdot \mu}\right)^x \cdot \frac{n^x}{n!}\right]} \quad (1.1)$$

где  $P_n$  – вероятность того, что заявки получают отказ;

$\lambda$  – плотность поступления заявок  $\lambda = N$ ;

$n$  – количество ячеек сепарирующей решетки;

$\mu$  – математическое ожидание числа заявок обслуженных одной ячейкой в единицу времени;

$0 < x < n$  – текущее значение количества ячеек.

Расчет вероятности отказа по формуле (1.1) дал возможность построить график зависимости  $P_n = f(n)$  при заданных значениях  $\lambda$  и  $\mu$ .

Далее автор определил количество ячеек в одном ряду, количество ячеек по длине деки и радиус подбарабана [35]:

$$r_i = \frac{B}{e + \delta}; \quad i = \frac{2\pi \cdot R_n \cdot \alpha_{обх}}{360 \cdot (b + d)}; \quad R_n = r_\delta + \frac{(\Delta_{вх} + \Delta_{вых})}{2}, \quad (1.2)$$

где  $B$  – ширина сепарирующей решетки;

$e$  – ширина ячейки;

$\delta$  – диаметр прутка;

$R_n$  – радиус сепарационной решетки;

$\alpha_{обх}$  – угол обхвата решеткой барабана;

$\bar{b}$  – среднеарифметическое значение длины ячейки;

$d$  – толщина поперечной планки;

$\Delta_{вх}$  и  $\Delta_{вых}$  – зазоры на входе и выходе деки;

$r_\delta$  – радиус барабана.

Экспериментальное обоснование параметров ротационного сепаратора было выполнено с помощью дробнофакторного эксперимента ДФЭ  $2^{10-6}$ , в результате чего была получена регрессионная модель процесса сепарации зерна из очесанного вороха риса. Полученная модель дала возможность автору проанализировать степень влияния различных факторов на процесс сепарации. Так было установлено, что наибольшее влияние на эффективность технологического процесса оказывает диаметр барабана. При увеличении диаметра барабана степень сепарации зерна возрастает, однако увеличение диаметра барабана сдерживают габариты серийной молотилки комбайна, поэтому автор рекомен-

дует принять  $d = 0,5$  м. Также было установлено влияние на сепарацию угла охвата барабана, при его увеличении степень сепарации возрастает.

Исходя из соображений сохранения габаритных размеров серийного комбайна, автор рекомендует принять угол охвата равным  $90^\circ$ . Существенным образом на процесс сепарации влияет шаг расстановки штифтов барабана в ряду, при уменьшении шага наблюдается улучшение сепарации.

Автор, также рассматривал влияние рабочего органа на травмирование зерна риса, по его мнению для снижения травмирования зерна необходимо увеличить орган охвата барабана сепарирующей решеткой, уменьшить диаметр барабана, увеличить зазор на входе и шаг расстановки штифтов в рядах и т.д.

На наш взгляд такой рабочий орган все же будет допускать повышенный уровень травмирования вследствие воздействия металлических штифтов установленных на основе барабана, вращающихся с линейной скоростью  $14 \dots 22$  м/с, в результате ударного воздействия штифта на зерновку риса возможно ее травмирование.

Уменьшения травмирования зерна при сепарации очесанного вороха можно достичь путем использования тихоходных цилиндрических решет с наружной рабочей поверхностью.

Аблогин Н. Н. предложил и обосновал в работе [27] конструкцию сепаратора скальператорного типа. При обосновании параметров и режимов работы сепаратора (рис. 1.3) очесанного вороха автор выполнил теоретические и экспериментальные исследования.

Была разработана математическая модель очесанного вороха риса в виде функции [27]:

$$F = F[\alpha; f(l_j); f(m_j)], \quad (1.3)$$

где  $\alpha$  – процентное содержание компонентов в очесанном ворохе;

$f(l_j)$  – плотность распределения вероятности длин компонентов вороха;

$f(m_j)$  – плотность распределения вероятности масс компонентов.

Данная модель дала возможность автору определить размер отверстий се-

парирующей поверхности, в зависимости от требуемой чистоты. Расчеты показали, что чистота отсепаируемого зерна 95% обеспечивается при размерах отверстий 30...60 мм.

Также теоретически были определены угол наклона питающего лотка, угол подачи вороха на решетную поверхность, угол схода зерносомистого вороха с решетного барабана:

$$\alpha \geq \arccos \frac{1}{\sqrt{f^2 + 1}}; \quad \beta = \arcsin \frac{d + 1}{a\sqrt{2 + d}}; \quad \delta = \pi - \beta, \quad (1.4)$$

где  $f$  – коэффициент трения вороха по поверхности лотка;

$a$  – размер квадратного отверстия сетчатой поверхности;

$d$  – диаметр перемычки между отверстиями;

$l_3$  – длина зерна.

Экспериментальные исследования проводились с использованием теории планирования многофакторных экспериментов. В работе был реализован дробнофакторный эксперимент ДФЭ типа  $2^{7-5}$ , где в качестве факторов были приняты диаметр первого решетного барабана, диаметр второго решетного барабана. Линейная скорость первого барабана, угол подачи вороха на первый барабан, линейная скорость второго барабана приведенная подача зерносомистого вороха.

Автор определил область оптимальных значений исследуемых факторов методом крутого восхождения.

Применительно к условиям сепарации очесанного вороха на стационарном пункте был разработан и изготовлен экспериментальный ворохоочиститель технологическая схема и общий вид которой приведены на рис. 1.6 [80].

В уборочный сезон 2013 были проведены полевые испытания ворохоочистителя на очистке очесанного вороха озимой пшеницы, который был получен с помощью прицепного комбайна «Росич».

В результате проведения исследований [80] было установлено, что экспериментальный ворохоочиститель качественно сепарирует очесанный ворох озимой пшеницы при подаче 0,6-2,5 кг/с, при увеличении подачи производи-

тельность ворохоочистителя незначительно возрастает, но качество очистки существенно ухудшается.

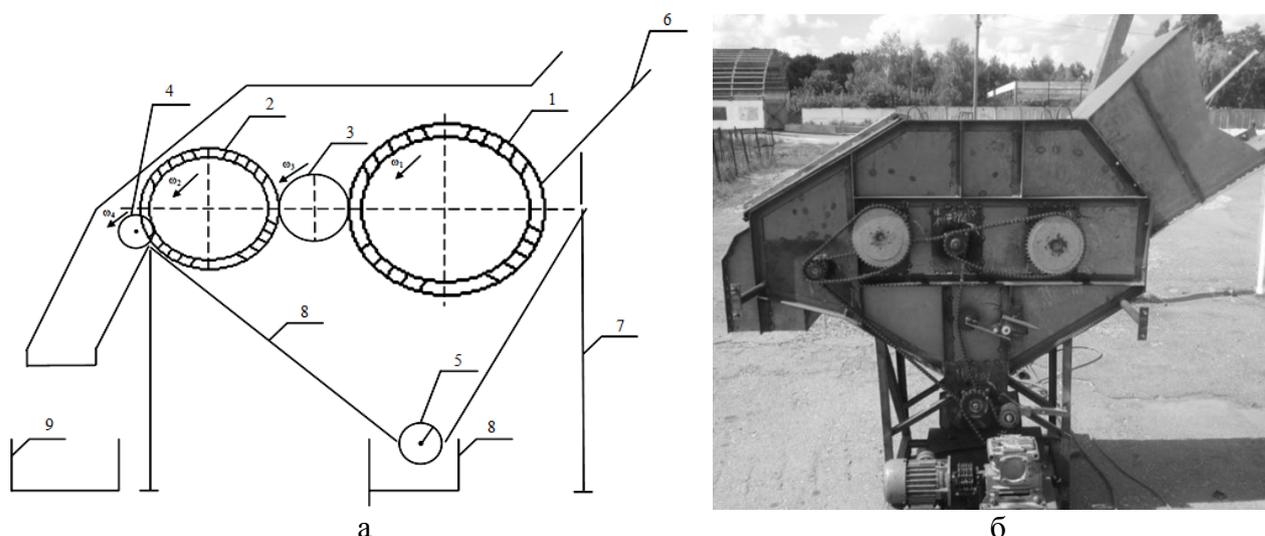


Рис. 1.6. Технологическая схема (а) и общий вид (б) экспериментального ворохоочистителя:  
1, 2 – цилиндрические решета; 3, 4 – ротационные очистительные щетки; 5 – шнек;  
6 – питающий лоток; 7 – рама

Таким образом предложенный в работе [27] сепаратор эффективно работает на очистке очесанного вороха метелочных культур (риса, проса, овса), где имеет место высокий процент содержания свободного зерна (75...95%).

При использовании ворохоочистителя с аналогичной схемой при сепарации очесанного вороха зерновых колосовых не удастся достичь таких результатов. В связи с чем возникает необходимость разработки рабочего органа для сепарации очесанного вороха зерновых колосовых, основанного на новых принципах.

### 1.5. Постановка цели и задач исследований

Как видно из приведенного анализа литературных источников широкое внедрение стационарной технологии уборки зерновых колосовых методом их очесывания на корню сдерживается отсутствием рабочих органов для сепарации очесанного вороха.

В связи с этим была сформулирована цель исследований.

Целью исследований является повышение эффективности процесса сепарации очесанного вороха зерновых колосовых путем обоснования технологиче-

ской схемы, параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- исследовать физико-механические свойства очесанного вороха зерновых – как объекта его сепарации;
- разработать математическую модель просеивания зерна через слои очесанного вороха;
- разработать методику теоретического обоснования параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа;
- экспериментально исследовать процесс сепарации очесанного вороха;
- провести производственную проверку ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами и дать технико-экономическую оценку его работы.

## РАЗДЕЛ II

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА ПШЕНИЦЫ

#### 2.1. Фракционный состав очесанного вороха пшеницы

##### 2.1.1. Программа и методика определения содержания отдельных компонентов в очесанном ворохе пшеницы

Программа определения содержания отдельных компонентов в очесанном ворохе пшеницы включала в себя:

- проведение полевых исследований уборочного агрегата с целью сбора очесанного вороха;
- вычисление основных статистических характеристик и установления законов распределения компонентов очесанного вороха пшеницы.

Очесанный ворох получается в результате механического воздействия гребенок очесывающего устройства на соцветия зерновых культур. Очесывающее устройство устанавливается на прицепную уборочную машину [84], которая агрегируется трактором МТЗ-80. Общий вид уборочного агрегата приведен на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Общий вид уборочного агрегата

Для получения первичной информации о фракционном составе очесанного вороха пшеницы были проведены полевые исследования на полях учебно-

опытного хозяйства «Лазурное» Таврического государственного агротехнологического университета в уборочный сезон 2012 года. Методика проведения исследований была следующей. Опытное поле разбивалось на зачетные участки длиной 20 м. Для разгона и выхода уборочного агрегата из загонки выделялся участок длиной 10 м. На границах зачетных участков устанавливались специальные вехи.

Уборочный агрегат по сигналу проходил весь зачетный участок на одной передаче. После выхода агрегата из зачетного участка из прицепа-тележки отбирался в полиэтиленовый мешочек очесанный ворох. После отбора пробы агрегат опять заходил в загонку и все повторялось сначала. Таким образом, отбиралось 50 проб. Отобранные пробы транспортировались в лабораторию, где проводился их разбор.

Разбор проб осуществлялся следующим образом. Вначале каждая проба взвешивалась на весах ВЛТК-500, т.е. определялась ее общая масса, затем на решетках выделялось свободное зерно, остальные фракции выделялись методом ручного разбора. Каждая фракция взвешивалась.

Результаты всех взвешиваний заносились в журнал первичной информации.

Расчет содержания каждого компонента проводился по методике изложенной в [27].

Результаты расчетов процентного содержания каждого компонента заносились в журнал первичной информации.

Таким образом, получался массив объемом 50 значений содержания каждой фракции в очесанном ворохе.

#### 2.1.2. Статистические характеристики содержания свободного зерна в очесанном ворохе пшеницы

Расчет основных статистических характеристик содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы по формулам приведенным в [81-83] показал, что его среднее значение равно  $\bar{X}_z = 53,77\%$ , при этом отно-

сительная погрешность определения среднего арифметического равно  $\delta\bar{X}_3 = 2,1\%$ , т.е. среднее значение определено с достаточной точностью, т.к.  $\delta\bar{X}_3 < 5\%$ , среднеквадратическое отклонение составляет  $\sigma_3 = 7,97\%$ , а коэффициент вариации  $V = 14,82\%$ . Невысокое значение коэффициента вариации свидетельствует о незначительном разбросе значения содержания свободного зерна в очесанном ворохе относительно среднего.

Используя методику, приведенную в [81] строим экспериментальную кривую плотности распределения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы, для чего сначала вычисляем исходные данные и заносим их в таблицу П.2 (Приложение Б).

Используя данные табл. П.2 (Приложение Б) строим экспериментальную кривую плотности распределения (рис. 2.2) [85].

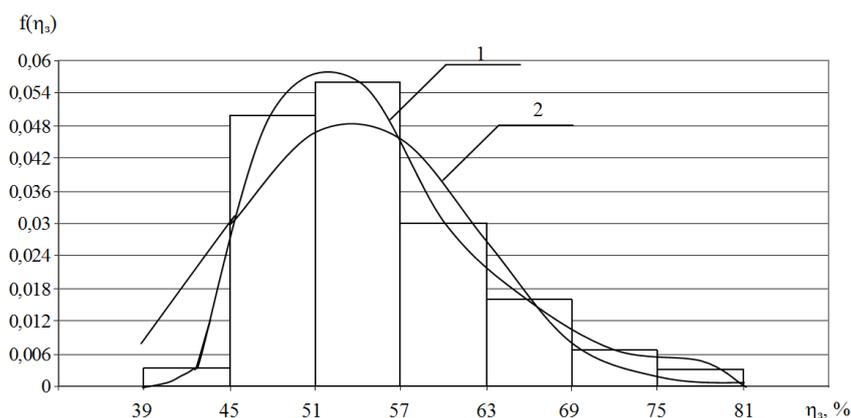


Рис. 2.2. Плотность распределения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы:

- 1 – экспериментальная кривая плотности распределения;  
2 – теоретическая кривая плотности распределения

Подставляя значения среднего арифметического  $\bar{X}_3$  и среднеквадратического  $\sigma_3$  в формулы приведенные в [81] получим точки теоретической кривой табл. П.3 (Приложение Б).

Используя данные табл. П.3 (Приложение Б), строим теоретическую кривую плотности распределения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы. Проверку адекватности полученного закона распределения выполняем по критерию Пирсона. После подставки исходных данных получаем, что  $\chi_3^2 = 0,03$ . Согласно [81] значение  $\chi_T^2 = 1,145$ . Следовательно  $\chi_T^2 > \chi_3^2$ , значения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы подчиняется нормальному закону. Статистическая модель содержания свободного зерна в очесанном ворохе имеет вид [85]:

$$f(\eta_3) = 0,05 \times e^{-\frac{(53,77 - \eta_{3i})^2}{127}}. \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Анализ содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы

После расчета статистических характеристик по формулам [81] были получены следующие их значения  $\bar{X}=4,13\%$ ,  $\sigma=1,45\%$  и  $V=35\%$ . Достаточно высокое значение коэффициента вариации  $V=35\%$  свидетельствует о существенном разбросе значений содержания оборванных колосков относительно среднего значения [86].

Дальнейшая обработка информации заключалась в нахождении абсолютной и относительной ошибок. Подставляем в формулы [81] исходные данные и находим значения абсолютной и относительной ошибок  $\Delta X_k=0,205\%$  и  $\delta X_k=4,95\%$ . Как видно из полученных расчетов среднее арифметическое значение содержания оборванных колосков мы определили с достаточной точностью  $\delta X_k < 5\%$ .

По методике, приведенной в [81] строим экспериментальную кривую плотности распределения вероятности содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы (рис. 2.3) [86].

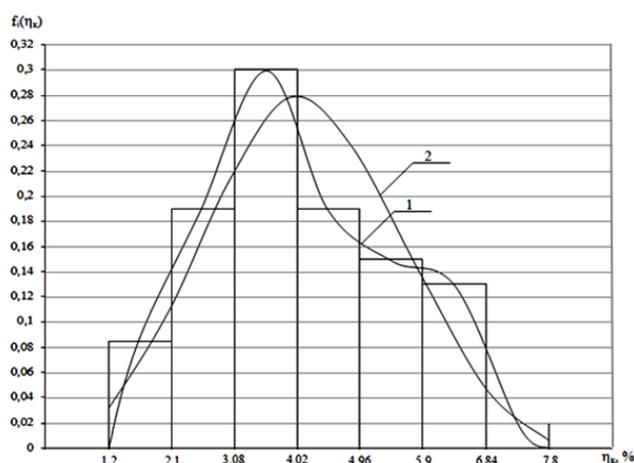


Рис. 2.3. Плотность распределения содержания оборванных колосков в очесанном ворохе: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Исходные данные для построения экспериментальной кривой приведены в табл. П.4 (Приложение Б).

Построим теоретическую кривую плотности распределения значений содержания оборванных колосков в очесанном ворохе (рис. 2.3) [86], результаты расчетов приведены в табл. П.5 (Приложение Б).

Для оценки адекватности полученного закона распределения значений со-

держания оборванных колосков используем критерий Пирсона. Расчетное значение критерия Пирсона  $\chi^2_T = 0,25$ , а табличное значение составляет  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$  [83].

Как видно из полученных результатов  $\chi^2_T > \chi^2_{\text{т}}$ , таким образом, распределения полученных значений оборванных колосков подчиняются нормальному закону.

Статистическая модель содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы имеет вид [86]:

$$f(\eta_k) = 0,28 \times e^{-\frac{(4,13 - \eta_k)^2}{4,2}}. \quad (2.2)$$

#### 2.1.4. Оценка содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы

Полученные в результате разбора проб данные подставляем в формулы для расчета статистических характеристик [81] и получаем, что среднее значение содержания половы составляет  $\bar{X}_n = 8,86\%$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma_n = 2,1\%$  и коэффициент вариации  $V_n = 23,6\%$ . Затем по формулам [81] определяем точность среднеарифметического значения. В результате расчетов получено, что  $\Delta X_n = 0,297\%$  и  $\delta X_n = 3,34\%$ , т.е. получена погрешность, которая не превышает 5%.

Строим экспериментальную и теоретическую кривые рис. 2.4 [87].

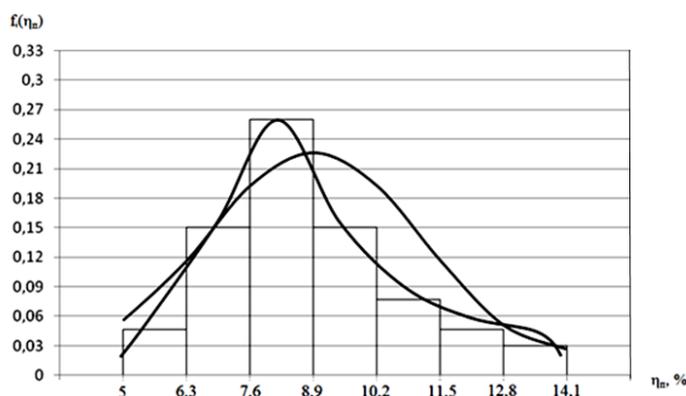


Рис. 2.4. Плотность распределения значений содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы: 1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая

Для проверки адекватности закона распределения используем критерий Пирсона [83], вычисляем  $\chi^2_{\text{т}}$  и сравниваем с  $\chi^2_T$ . В результате расчетов получаем, что расчетное значение  $\chi^2_{\text{т}} = 0,179$ , а табличное значение  $\chi^2_T = 1,145$  [83]. Таким образом,  $\chi^2_T > \chi^2_{\text{т}}$ , т.е. значения содержания половы в очесанном во-

рохе озимой пшеницы подчиняются нормальному закону. Статистическая мо-

дель содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы имеет вид [87]:

$$f(\eta_n) = \frac{1}{5,26} \times e^{-\frac{(8,86-\eta_n)^2}{8,82}}. \quad (2.3)$$

### 2.1.5. Статистический анализ содержания соломы в очесанном ворохе пшеницы

Расчет основных статистических характеристик показал, что соломы в очесанном ворохе в среднем содержится  $\bar{X} = 33,2\%$ , среднеквадратическое отклонение составило  $\sigma = 8,1\%$ , а коэффициент вариации равен  $24,4\%$  [88].

Расчет коэффициента вариации показал, что значения содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы имеют существенный разброс относительно среднеарифметического.

Определим точность вычисления среднеарифметического, по рекомендациям [82] найдем абсолютную и относительную ошибки. Абсолютная ошибка  $\Delta X = 1,15\%$ , а относительная ошибка  $\delta X = 3,45\%$ , так как относительная ошибка  $\delta X < 5\%$ , то можно сделать вывод о достоверности определения среднеарифметического значения содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы.

Для оценки распределения значений содержаний соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы строим экспериментальную и теоретическую кривые плотности распределения (рис. 2.5) [88].

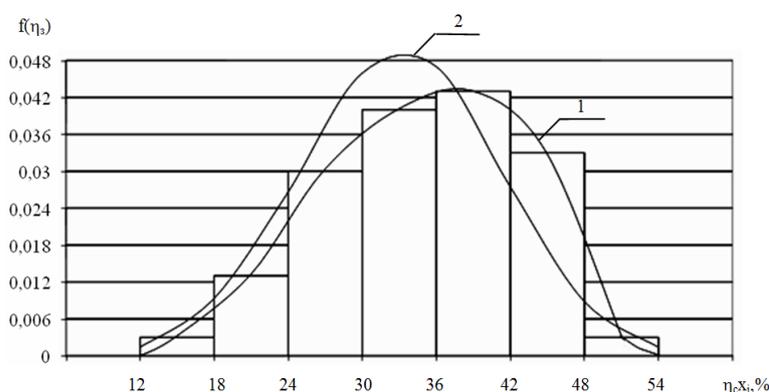


Рис. 2.5. Плотность распределения содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы:

- 1 – экспериментальная кривая плотности распределения;
- 2 – теоретическая кривая плотности распределения

Исходные данные для построения экспериментальной кривой приведены в табл. П.7 (Приложение Б).

Как видно из рис. 2.5 минимальное значение содержания соломы составляет  $12\%$ , а максимальное  $54\%$ , следовательно, численные значения

содержания соломы находятся в диапазоне  $12\% \dots 54\%$ .

Расчет адекватности закона распределения по критерию Пирсона показал, что распределение значений содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы подчиняются нормальному закону  $\chi^2_{\text{э}} = 0,011$ , а  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$ , следовательно, необходимое условие  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$  выполняется. Данное заключение подтверждает характер протекания теоретических и экспериментальных кривых распределения. Из рис. 2.5 видно, что в целом точки экспериментальной кривой незначительно отстоят от точек теоретической кривой.

Статистическая модель содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы имеет вид [88]:

$$f(\eta_3) = 0,05 \times e^{-\frac{(35,2 - \eta_3)^2}{131}}. \quad (2.4)$$

### 2.1.6. Общий анализ содержания различных компонентов в очесанном ворохе озимой пшеницы



Рис. 2.6. Общий вид очесанного вороха озимой пшеницы

Очесанный ворох озимой пшеницы (рис. 2.6) представляет собой четырехкомпонентную зерносоломистую смесь.

Он в среднем содержит: свободного зерна 53,77%, соломы и крупных примесей 33,2%, половы 8,86% и оборванных колосков 4,13%. Данные результаты приведены на диаграмме рис. 2.7 [89].

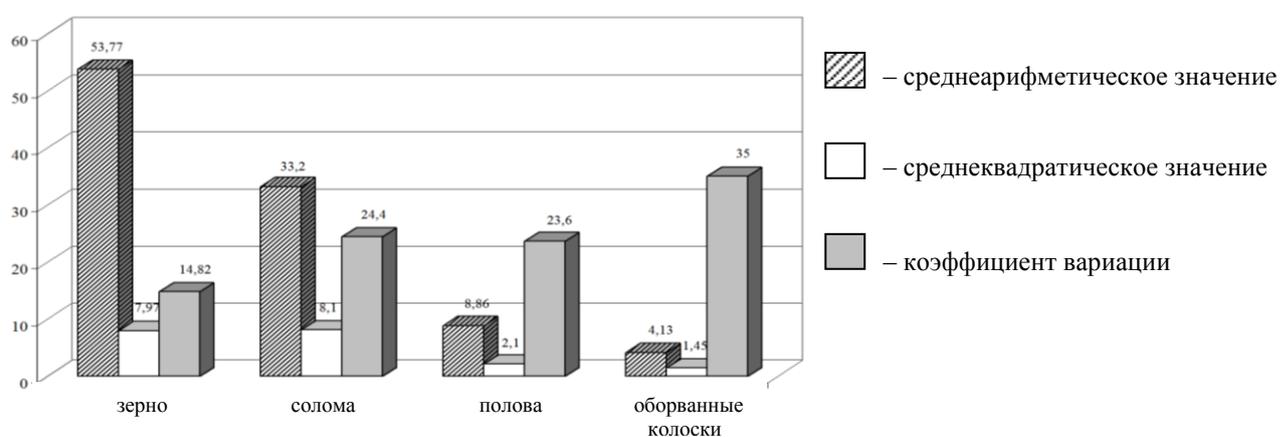


Рис. 2.7. Диаграмма статистических характеристик содержания отдельных компонентов в очесанном ворохе

Анализируя диаграмму следует отметить, что наиболее весомыми фракциями являются зерновая и соломенная фракции на их долю приходится практически 87%. Две другие фракции – оборванные колоски и полова гораздо меньше, их суммарный вклад не дотягивает и до 13%. Мы рассмотрели среднеарифметические значения компонентов очесанного вороха. Статистические характеристики содержания каждого компонента в очесанном ворохе приведены на рис. 2.8 [89].

Как видно из диаграммы (рис. 2.7) наибольший разброс значений относительно среднего наблюдается у колосовой фракции, коэффициент вариации составил 35%, наименьший разброс значений у зерновой фракции, здесь коэффициент вариации составил 14,82%.

В целом если рассматривать очесанный ворох зерновых с позиции его доработки, то в качестве первоочередной задачи просматривается отделение крупных солоmistых примесей и оборванных колосков от свободного зерна.

## 2.2. Биометрические характеристики компонентов очесанного вороха пшеницы

### 2.2.1. Программа и методика исследования биометрии

Программа исследования биометрии компонентов очесанного вороха включала следующие вопросы:

- определение статистических характеристик и построение кривых плотности распределения размеров зерновки;
- установление статистических оценок и построение кривых распределения биометрических характеристик компонентов соломенной фракции;
- статистический анализ биометрии оборванных колосков.

Для выполнения программы изучения биометрии очесанного вороха зерновых были проведены полевые исследования. Методика получения исходного материала приведена ранее (п. 2.1.1).

Для определения биометрических характеристик производились измерения линейных размеров составляющих каждой фракции. Все полученные результа-

ты заносились в журнал первичной информации. Для дальнейшей обработки первичной информации были использованы методы теории вероятностей и математической статистики [81-83].

### 2.2.2. Определение биометрических характеристик зерновок

Как известно зерновка характеризуется тремя параметрами – длиной, толщиной и шириной [70]. Размерные характеристики отдельных зерновок на сегодняшний день уже достаточно изучены и описаны в литературе, например [43, 44, 45, 70]. Однако для изучения свойств очесанного вороха зерновых и дальнейшего моделирования происходящих с ним процессов необходимо знание статистических характеристик биометрии зерновки. Кроме того следует отметить, что в последние годы селекционерами выведены новые сорта зерновых, у которых геометрические размеры зерновок имеют биометрические отличия. Поэтому в программу исследований были включены вопросы о размерных характеристиках отдельных зерновок.

Полученная в результате измерений первичная информация о биометрии зерновки была обработана по формулам приведенным в [81], полученные результаты даны в таблице 2.1 [90].

Таблица 2.1

#### Статистические характеристики биометрии зерновки

| Статистические характеристики   | Ед. изм. | Длина | Толщина | Ширина |
|---------------------------------|----------|-------|---------|--------|
| Среднеарифметическое значение   | мм       | 6,7   | 2,33    | 2,78   |
| Среднеквадратическое отклонение | мм       | 5,7   | 0,28    | 0,286  |
| Коэффициент вариации            | %        | 8,45  | 12,02   | 10,29  |
| Абсолютная ошибка               | мм       | 0,8   | 0,04    | 0,04   |
| Относительная ошибка            | %        | 1,19  | 1,71    | 2,14   |

Как видно из приведенной таблицы среднеарифметическое значение длины зерновки озимой пшеницы составило 6,7 мм, толщины 2,33 мм и ширины 2,78 мм, при этом погрешность определения среднеарифметического равна соответственно для длины зерновки 1,19%, для толщины 1,71% и для ширины 1,46%. Таким образом для всех трех биометрических параметров зерновки

среднеарифметическое значение определено с достаточной точностью, т. е.  $\delta x < 5\%$ .

Для установления закона распределения случайных величин характеризующих изменение размерных характеристик зерновки были построены кривые экспериментальной и теоретической плотности распределения (рис. 2.8...2.10), на которых цифрой 1 обозначим экспериментальную кривую, а цифрой 2 – теоретическую.

Расчетные данные для построения кривых распределения приведены в Приложении Б (табл. П.5...П.10).

Как видно из рис. 2.8 длина зерновки изменяется в диапазоне 5,2...8,0 мм. Наибольшее количество значений находится в пределах 6,0...7,2 мм. Оценка адекватности закона распределения длины зерновки проводилась по критерию Пирсона, расчетное значение критерия Пирсона составило  $\chi^2_{\text{э}} = 0,21$ , а табличное равно соответственно  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$  учитывая, что  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$  можно сделать заключение об адекватности полученного закона распределения, этот факт подтверждает близость точек экспериментальной кривой (кривая 1) рис. 2.8 и теоретической (кривая 2) рис. 2.8.

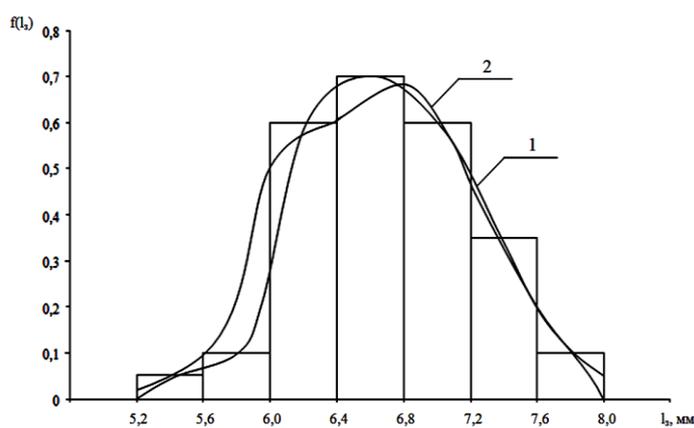


Рис. 2.8. Плотность распределения длины зерновки

Таким образом, закон распределения длин зерновок озимой пшеницы описывается выражением [90].

$$f(l_3) = 0,7 \cdot e^{-\frac{(6,7-l_3)^2}{0,65}} \quad (2.5)$$

Распределение полученных значений длин зерновок подчиняется нормальному закону распределения.

Толщина зерновки изменяется в пределах 1,6...3,0 мм. Проверка адекватности закона распределения значений толщины зерновки показала, что  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$ , т. е.  $\chi^2_{\text{э}} = 0,915$ ,  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$ . Исходя из этого следует, что статистическая модель,

описывающая распределение толщины зерновки адекватная и распределение значений толщины зерновки подчиняются нормальному закону:

$$f(h_3) = 1,43 \cdot e^{-\frac{(2,33-h_3)^2}{0,16}}. \quad (2.6)$$

Аналогичным образом рассчитаны параметры закона распределения ширины зерновки, графическая интерпретация приведена на рис. 2.9, а аналитически закон распределения описывается выражением (2.7) [90].

$$f(a_3) = 1,4 \cdot e^{-\frac{(2,78-a_3)^2}{0,163}}. \quad (2.7)$$

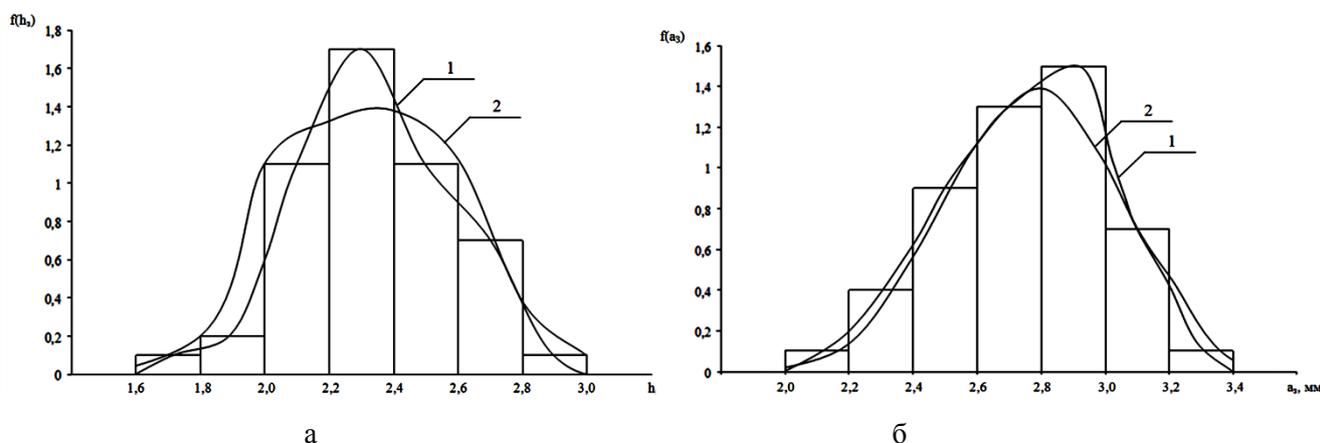


Рис. 2.9. Плотность распределения толщины (а) и ширины (б) зерновки

### 2.2.3. Установление размерных характеристик компонентов соломенной фракции

Расчетных основных статистических характеристик компонентов соломенной фракции проводился по методике приведенной в [81], результаты расчетов даются в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Статистические характеристики биометрии компонентов соломенной фракции

| № | Статистические характеристики   | Единица измерения | Диаметр соломины | Длина соломины |
|---|---------------------------------|-------------------|------------------|----------------|
| 1 | Среднеарифметическое значение   | мм                | 2,8              | 254            |
| 2 | Среднеквадратическое отклонение | мм                | 0,44             | 85             |
| 3 | Коэффициент вариации            | %                 | 16,07            | 33,46          |
| 4 | Абсолютная ошибка               | мм                | 0,06             | 12             |
| 5 | Относительная ошибка            | %                 | 2,14             | 4,72           |

Приведенные в таблице 2.2 данные свидетельствуют о том, что среднее значение диаметра соломины равно 2,8 мм, при этом относительная ошибка определения среднеарифметического значения составляет 2,14%, т. е. среднее значение диаметра соломины определено с достаточной точностью  $\delta x_c < 5\%$ . Среднеарифметическое значение длины соломины составляет 254 мм, оценка точности определения среднеарифметического значения длины соломины, показало, что погрешность не превышает 5%. Степень разброса значений относительно среднего значения оценивалось среднеквадратическим отклонением и коэффициентом вариации. Среднеквадратическое отклонение диаметра соломины равно 0,44 мм, при этом коэффициент вариации составил 16,07%. Для длины соломины  $\sigma = 85$  мм, а коэффициент вариации 33,46%, что свидетельствует о достаточно высоком разбросе численных значений длин соломин относительно среднего.

Построим экспериментальную и теоретическую кривые распределения значений диаметра и длины соломины (рис. 2.10...2.11), для чего используем результаты расчетов, которые приведены в табл. П.16...П.19. Экспериментальные кривые плотности распределения обозначены индексом «1», а теоретические – индексом «2».

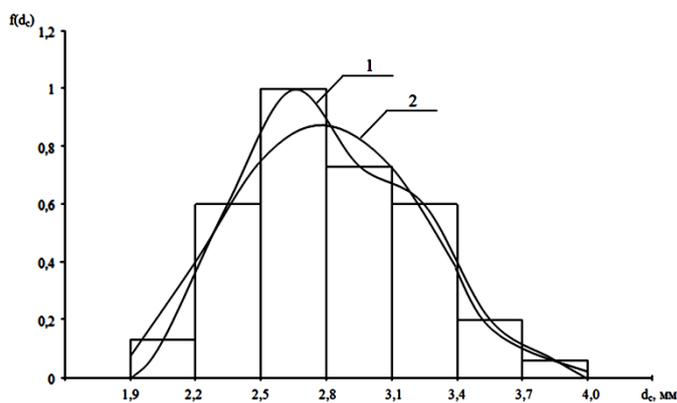


Рис. 2.10. Плотность распределения диаметра соломины

Как видно из рис. 2.10 численные значения диаметра соломины находятся в интервале 1,9...4,0 мм, наибольшее число значений лежит в диапазоне 2,2...3,3 мм. Точки теоретической и экспериментальной кривой практически совпадают, что свидетельствует об адекватности статистической модели, данные расчета критерия Пирсона подтвердило это заключение. Согласно расчетов,  $\chi^2_9 = 0,439$ , а табличное значение  $\chi^2_T = 1,145$ .

Следовательно, распределение значений диаметра соломины подчиняется

нормальному закону распределения, а статистическая модель имеет вид:

$$f(d_c) = 0,91 \cdot e^{-\frac{(2,8-d_c)^2}{0,39}}. \quad (2.8)$$

Рассмотрим распределение значений длины соломины.

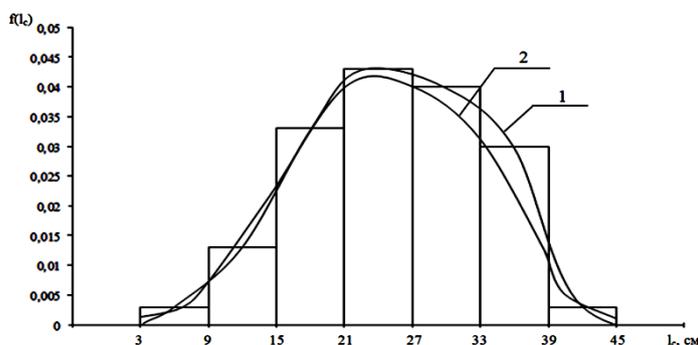


Рис. 2.11. Плотность распределения длины соломины

Значения длины соломины находятся в диапазоне 30...450 м. Кривая 1 практически совпадает с кривой 2, т. е. экспериментальная кривая совпадает с теоретической, об этом же свидетельствует критерий

$\chi^2_{\text{э}} = 0,022$ . В тоже время табличное значение  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$ , т. е.  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$ , т. е. распределение значений длин соломин подчиняется нормальному закону распределения случайных величин, который имеет вид:

$$f(l_c) = 0,0047 \cdot e^{-\frac{(254-l_c)^2}{14450}}. \quad (2.9)$$

#### 2.2.4. Анализ биометрии оборванных колосков озимой пшеницы

Статистические характеристики биометрии оборванных колосков приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

##### Статистические характеристики биометрии оборванных колосков

| № | Статистические характеристики   | Единица измерения | Диаметр колоска | Длина колоска |
|---|---------------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| 1 | Среднеарифметическое значение   | мм                | 7,72            | 88,9          |
| 2 | Среднеквадратическое отклонение | мм                | 1,53            | 28,5          |
| 3 | Коэффициент вариации            | %                 | 19,82           | 32,11         |
| 4 | Абсолютная ошибка               | мм                | 0,216           | 4             |
| 5 | Относительная ошибка            | %                 | 2,8             | 4,5           |

Результаты проведенных расчетов статистических характеристик биометрических параметров оборванных колосков показывают, что среднеарифметическое значение диаметра оборванного колоска составляет 7,72 мм, при этом

его длина равна 88,9 мм. Проверка точности определения среднеарифметического значения показала, что для диаметра колоска  $\delta x = 2,8\%$ , а для его длины 4,5%, т. е. для диаметра и для длины колоска среднеарифметическое значение определено с достаточной точностью  $\delta x < 5\%$ . Среднеквадратическое отклонение диаметра колоска равно 1,53 мм, а длины – 28,5 мм, при этом коэффициенты вариации составили 19,82% и 32,11% соответственно.

С целью установления закона распределения численных значений размерных характеристик оборванных колосков были построены экспериментальные 1 и теоретические 2 кривые распределения размерных характеристик оборванных колосков (рис. 2.12-2.13).

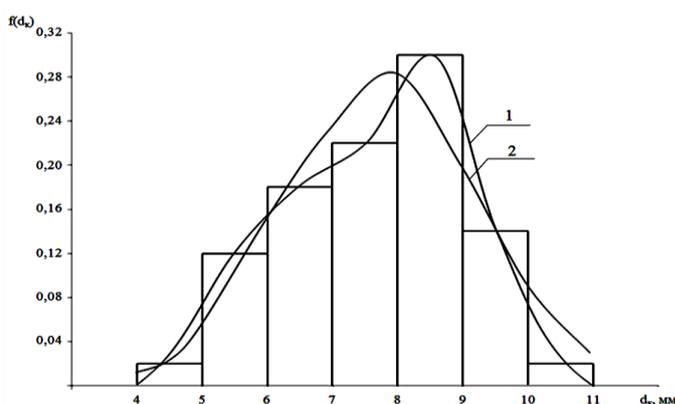


Рис. 2.12. Плотность распределение диаметра оборванного колоса

Как видно из рис. 2.12 численные значения диаметра оборванных колосков лежат в пределах 4...11 мм. Визуально экспериментальная кривая распределения имеет некоторую асимметрию, об этом свидетельствует факт смещения среднеарифметического значения в сторону больших значений.

Проверка адекватности закона распределения значений диаметра оборванных колосков показала, что  $\chi^2_{\text{э}} = 0,21$ , при  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$ , т. е.  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$  и распределение значений диаметра оборванных колосков подчиняется нормальному закону распределения.

Проверка адекватности закона распределения значений диаметра оборванных колосков показала, что  $\chi^2_{\text{э}} = 0,21$ , при  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$ , т. е.  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$  и распределение значений диаметра оборванных колосков подчиняется нормальному закону распределения.

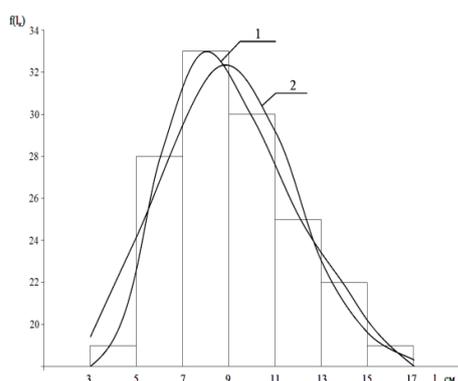


Рис. 2.13. Плотность распределение длины оборванного колоса

Статистическая модель распределения значений диаметра оборванных колосков имеет вид:

$$f(d_k) = 0,26 \cdot e^{-\frac{(7,72-d_k)^2}{0,21}} \quad (2.10)$$

Кривые плотности распределения длины оборванного колоска представлены на рис. 2.13,

а расчетные данные в табл. П.20 (Приложение Б).

Значения длины оборванных колосков находятся в диапазоне 20...34 мм, наибольшее количество значений лежит в пределах 24...30 мм. Распределение значений длины оборванных колосков также, как и распределение значений диаметра оборванных колосков имеет некоторую асимметрию и также среднеарифметическое смещено в сторону больших значений. Хотя в целом распределение подчиняется нормальному закону распределения,  $\chi^2_{\text{э}} = 0,07$ , а  $\chi^2_{\text{т}} = 1,145$  [81], т. е.  $\chi^2_{\text{т}} > \chi^2_{\text{э}}$ .

Статистическая модель имеет вид:

$$f(l_k) = 0,014 \cdot e^{-\frac{(88,9-l_k)^2}{16245}}. \quad (2.11)$$

### 2.2.5. Общий статистический анализ размерных характеристик компонентов очесанного вороха пшеницы

Статистические характеристики всех компонентов очесанного вороха озимой пшеницы приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

#### Статистические характеристики биометрии очесанного вороха озимой пшеницы

| № | Статистические характеристики   | Ед. изм. | Наименование компонентов очесанного вороха |         |        |         |       |                    |       |
|---|---------------------------------|----------|--|---------|--------|---------|-------|--------------------|-------|
|   |                                 |          | зерновка                                   |         |        | солома  |       | оборванные колоски |       |
|   |                                 |          | длина                                      | толщина | ширина | диаметр | длина | диаметр            | длина |
| 1 | Среднее арифметическое значение | мм       | 6,7  | 2,33    | 2,78   | 2,8     | 254   | 7,72               | 88,9  |
| 2 | Среднеквадратическое отклонение | мм       | 0,57                                       | 0,28    | 0,286  | 0,44    | 85    | 1,53               | 28,5  |
| 3 | Коэффициент вариации            | %        | 8,45                                       | 12,02   | 10,29  | 16,07   | 33,46 | 19,82              | 32,11 |
| 4 | Абсолютная ошибка               | мм       | 0,08                                       | 0,04    | 0,04   | 0,06    | 12    | 0,216              | 4     |
| 5 | Относительная ошибка            | %        | 1,19                                       | 1,71    | 1,46   | 2,14    | 4,72  | 2,8                | 4,5   |

Анализируя данные таблицы 2.4 следует отметить, что линейные размеры зерновки и соломины отличаются существенным образом. Так среднее значение длины зерновки составляет 6,7 мм, а среднее значение длины соломины – 254 мм. Даже с учетом вероятностной природы биометрических характеристик номальная длина соломины превышает длину зерновки в 5...6 раз. Аналогичная картина наблюдается с биометрическими параметрами зерновки и оборванного колоска. Минимальная длина колоска 30 мм, а максимальная длина зерновки 8 мм, т. е. практически четырехкратная разница. Поэтому при разработке рабочего органа для отделения свободного зерна от соломенной и колосовой фракции необходимо учесть разницу в размерах зерновки, соломины и оборванного колоска. Серийно выпускаемые решета для данной цели не пригодны.

Поскольку основной характеристикой случайных величин является их распределение, рассмотрим законы распределения размерных параметров составляющих очесанного вороха зерновых.

Параметры статистических моделей биометрических характеристик компонентов очесанного вороха приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Статистические модели биометрических параметров компонентов очесанного вороха зерновых

| № | Наименование геометрического параметра | Ед. изм. | Статистическая модель                                   | Значение критерия $\chi^2$ |           |
|---|--|----------|---|----------------------------|-----------|
|   |  |          |   | расчетное                  | табличное |
| 1 | Толщина зерновки                       | мм       | $f(h_1) = 1,43 \times e^{-\frac{(2,33-h_1)^2}{0,16}}$   | 0,915                      | 1,145     |
| 2 | Ширина зерновки                        | мм       | $f(a_3) = 1,4 \times e^{-\frac{(2,78-a_3)^2}{0,163}}$   | 1,144                      | 1,145     |
| 3 | Длина зерновки                         | мм       | $f(l_3) = 0,7 \times e^{-\frac{(6,7-l_3)^2}{0,65}}$     | 0,21                       | 1,145     |
| 4 | Длина соломины                         | мм       | $f(l_c) = 0,0047 \times e^{-\frac{(254-l_c)^2}{14450}}$ | 0,022                      | 1,145     |
| 5 | Диаметр соломины                       | мм       | $f(d_c) = 0,91 \times e^{-\frac{(2,8-d_c)^2}{0,39}}$    | 0,439                      | 1,145     |
| 6 | Длина оборванного колоска              | мм       | $f(l_k) = 0,014 \times e^{-\frac{(88,9-l_k)^2}{16245}}$ | 0,07                       | 1,145     |
| 7 | Диаметр оборванного колоска            | мм       | $f(d_k) = 0,26 \times e^{-\frac{(7,72-d_k)^2}{0,21}}$   | 0,21                       | 1,145     |

Приведенные в табл. 2.5 данные свидетельствуют о том, что все полученные модели адекватные, а биометрические параметры компонентов очесанного вороха зерновых подчиняются нормальному закону распределения случайных величин.

### 2.3. Определение плотности очесанного вороха озимой пшеницы

#### 2.3.1. Программа и методика нахождения плотности очесанного вороха озимой пшеницы

Программа определения плотности очесанного вороха озимой пшеницы включала в себя:

- проведение полевых исследований с целью получения первичной информации;
- определение статистических характеристик плотности очесанного вороха и нахождение закона распределения значений плотности очесанного вороха;
- установление зависимости между плотностью очесанного вороха и содержанием в нем свободного зерна.

Для получения первичной информации о плотности очесанного вороха были проведены полевые исследования.

Методика проведения опытов была следующей. На уборочной машине (рис. 2.1) снималась цепь привода скребкового транспортера, а в приемном отделении расстилался брезент размером 2×2 м. Потом машина проходила зачет-



Рис. 2.14. Взвешивание отобранных проб очесанного вороха озимой пшеницы

ный участок. После прохода участка и остановки уборочного агрегата снималась боковая панель очесывающего устройства и брезент вместе с ворохом изымался из машины и пересыпался в специально изготовленный деревянный ящик размерами 0,5×0,5×0,5 м. Затем ящик вместе с ворохом взвешивался на весах (рис. 2.14) [92].

После взвешивания отбиралась проба для определения содержания свободного зерна, и ворох из ящика высыпался в за-

ранее заготовленный мешок. Затем брезент снова расстился в приемном отделении и боковая панель устанавливалась на свое место. Уборочный агрегат заходил в загонку и опыт повторялся. В результате чего был получен массив численных значений плотности очесанного вороха объемом равным 50 и 50 проб для последующего разбора в лаборатории и определения содержания свободного зерна. Разбор проб проводился по методике приведенной в 2.1.1.

### 2.3.2. Статистические характеристики плотности очесанного вороха озимой пшеницы

Полученная в результате проведенного в полевых условиях первичная информация о плотности очесанного вороха была обработана согласно методике [81]. Результаты расчетов приведены в таблице 2.6 [92].

Таблица 2.6

#### Статистические характеристики плотности очесанного вороха

| № | Наименование статистических характеристик                    | Ед. изм.          | Значение |
|---|--|-------------------|----------|
| 1 | Среднеарифметическое значение                                | кг/м <sup>3</sup> | 129      |
| 2 | Среднеквадратическое отклонение                              | кг/м <sup>3</sup> | 20,6     |
| 3 | Коэффициент вариации   | %                 | 15,7     |
| 4 | Абсолютная ошибка определения среднеарифметического значения | кг/м <sup>3</sup> | 2,91     |
| 5 | Относительная ошибка определения среднеарифметического       | %                 | 2,26     |

Как видно из данных приведенных в таблице 2.6 среднеарифметическое значение плотности очесанного вороха составляет 129 кг/м<sup>3</sup>. Точность определения среднеарифметического значения плотности очесанного вороха равняется 2,26%, т. е. среднее значение определено с достаточной точностью, погрешность определения среднего значения не превышает 5%, т. е.  $\delta x < 5\%$ . Полученные данные можно использовать для дальнейшего анализа. Среднеквадратическое отклонение плотности очесанного вороха характеризующее рассеивание случайной величины по отношению к математическому ожиданию составило 20,6 кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент вариации, свидетельствующий о степени измен-

чивости значений плотности очесанного вороха относительно его среднего значения равен 15,7%.

Среднеарифметическое значение плотности очесанного вороха озимой пшеницы равное  $129 \text{ кг/м}^3$  свидетельствует о том, что очесанный ворох как объект сепарации существенным образом отличается от зернового вороха получаемого от комбайна. Зерновой ворох озимой пшеницы имеет плотность  $750 \dots 800 \text{ кг/м}^3$  [45], а очесанный ворох  $80 \dots 178 \text{ кг/м}^3$  [92]. Это приводит к целому ряду специфических особенностей сепарации очесанного вороха, а именно подаче на рабочий орган многослойной зерносоломистой смеси, наличию в ворохе значительной соломистой примеси, существенным образом отличающейся линейными размерами и т.д.

Данные свойства очесанного вороха естественным образом будут влиять на технологический процесс сепарации и на наш взгляд серийно выпускаемые машины для очистки зернового вороха не пригодны для сепарации очесанного вороха. Для выделения свободного зерна из очесанного вороха необходимо разработать новые рабочие органы, учитывающие специфику его механико-технологических свойств.

Построим экспериментальную (1) и теоретическую (2) кривые плотности распределения. Для построения кривых 1 и 2 используем расчетные данные из таблиц П.20-П.21 (Приложение Б).

Плотности распределения приведены на рис. 2.15 [92].

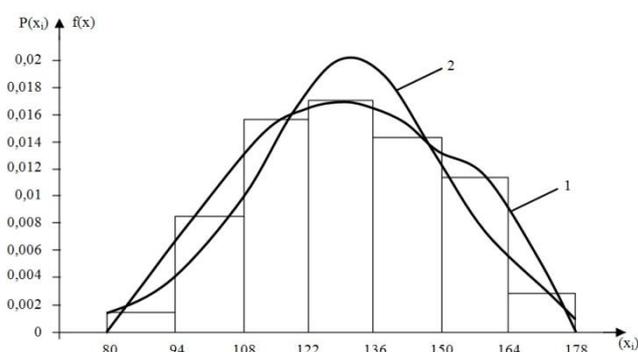


Рис. 2.15. Экспериментальная (1) и теоретическая (2) кривые плотности распределения вероятностей

разом, значения плотности очесанного вороха озимой пшеницы подчиняются

Для проверки адекватности закона распределения численных значений плотности распределения используем критерий Пирсона. Расчет критерия  $\chi^2$  показал что его расчетное значение равно 0,013, а табличное – 1,145, т. е.  $\chi_T^2 > \chi_{\alpha}^2$ . Таким образом,

нормальному закону распределения. Статистическая модель имеет вид:

$$f(\rho_s) = 0,019 \times e^{-\frac{(129-\rho_s)^2}{8,98}}. \quad (2.12)$$

В результате разбора проб, полученных экспериментальным путем были получены численные значения содержания свободного зерна в каждом из ящиков и соответственным образом плотность вороха. Таким образом, получился

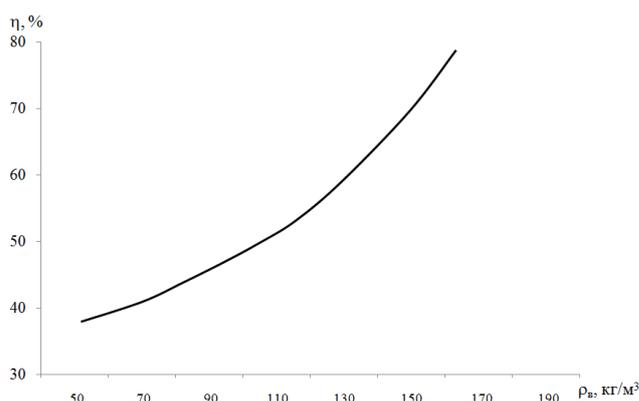


Рис. 2.16. Зависимость содержания свободного зерна от плотности очесанного вороха

числовой ряд значений содержания свободного зерна и соответствующий ему ряд значений плотности очесанного вороха. График зависимости содержания свободного зерна от плотности очесанного вороха приведен на рис. 2.16.

Экспериментальная кривая зависимости содержания свободного зерна от плотности очесанного вороха была аппроксимирована выражением

$$\eta_s = 2 \cdot 10^{-5} \rho^3 - 3,1 \cdot 10^{-3} \rho^2 + 0,3 \rho + 30,4 \quad (2.13)$$

## 2.4. Определение динамического коэффициента трения скольжения

### 2.4.1. Программа и методика нахождения динамического коэффициента трения

– определение динамического коэффициента трения скольжения соломы по очесанному вороху;

– определение динамического коэффициента трения скольжения очесанного вороха по очесанному вороху;

– определение динамического коэффициента трения скольжения очесанного вороха по металлу;

– определение динамического коэффициента трения скольжения соломы по металлу;

– вычисление статистических характеристик динамического коэффициента

трения скольжения.

Для определения динамического коэффициента трения используем метод наклонной плоскости. Сущность метода заключается в том, что на наклонную плоскость помещается тело, принимаемое за материальную точку. Под действием силы тяжести (точнее ее касательной составляющей) материальная точка движется по наклонной поверхности. Время, необходимое точке, на преодоление зачетного участка зависит от величины силы трения. В свою очередь, сила трения зависит от коэффициента трения. Динамический коэффициент трения скольжения определялся по формуле [93]:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2S}{g \cos \alpha \cdot t^2}, \quad (2.14)$$

где  $f$  – динамический коэффициент трения;

$\alpha$  – угол наклона плоскости можно устанавливать произвольно, но больше угла трения;

$S$  – длина участка, м;

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

$t$  – время движения, с.

Таким образом мы видим, что коэффициент трения скольжения непосредственно связан со временем движения грузика по наклонной плоскости.

Для проведения эксперимента была изготовлена лабораторная установка с помощью которой определялся динамический коэффициент трения (рис. 2.17), которая представляла собой неподвижную раму 1, к которой шарнирно крепится подвижный желоб 2. Внутри желоба с помощью шурупов устанавливается шероховатая поверхность 3, на которой был наклеен очесанный ворох.

Экспериментальные образцы были изготовлены из деревянных брусков. На поверхность одного деревянного бруска была наклеена солома (экспериментальный образец №1), а на поверхность другого бруска был наклеен очесанный ворох (экспериментальный образец №2).

На рисунке 2.18 приведен общий вид экспериментального образца №1, а на рисунке 2.19 – общий вид экспериментального образца №2.



Рис. 2.17. Общий вид лабораторной установки для определения динамического коэффициента трения

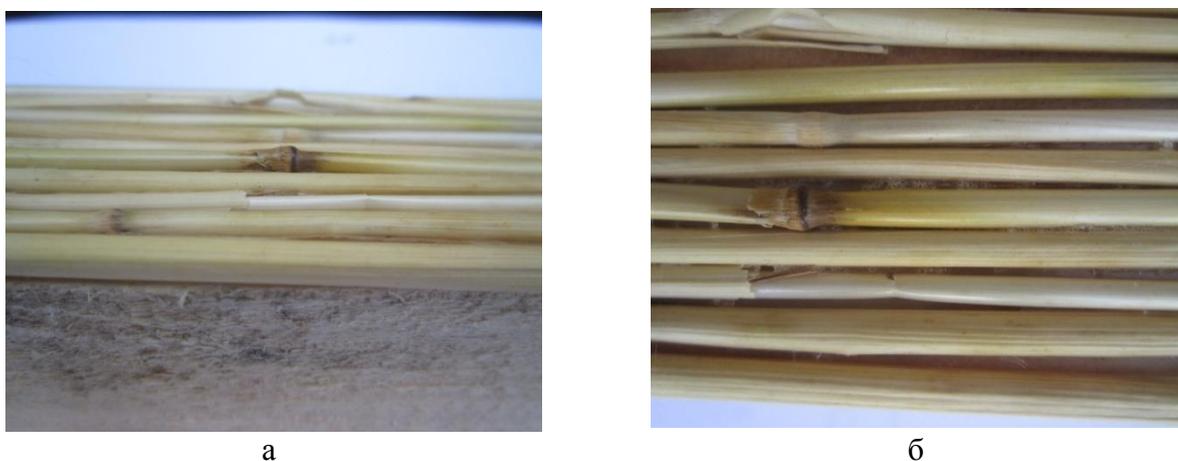


Рис. 2.18. Общий вид экспериментального образца №1: а – вид сбоку; б – вид сверху



Рис. 2.19. Общий вид экспериментального образца №2: а – вид сбоку; б – вид сверху

Согласно программе исследований эксперименты проводились в четыре этапа. На первом этапе определялся динамический коэффициент трения скольжения соломы по очесанному вороху. Для этого подвижный желоб лабораторной установки устанавливался под углом  $30^\circ$  и фиксировался с помощью упорного башмака 1. Угол измерялся с помощью транспортира 2 (рис. 2.20). На

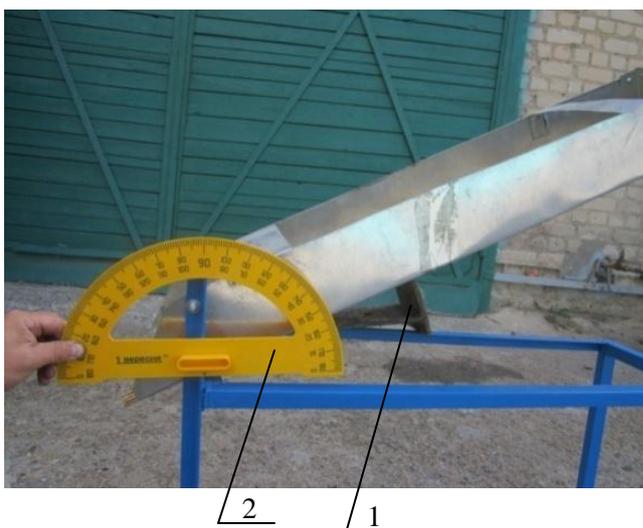


Рис. 2.20. Лабораторная установка  
в рабочем положении

шероховатую поверхность 3 помещался экспериментальный образец №1. Под действием горизонтальной составляющей силы тяжести он начал свое движение по поверхности и проходил весь путь за время  $t$ .

Время перемещения экспериментального образца измерялось с помощью электронного секундомера. Для получения достоверной информации

опыт повторялся 30 раз. Полученные результаты измерения времени движения заносились в журнал первичной информации, затем обрабатывались по методике приведенной в [81], после этого по формуле (2.14) вычислялся динамический коэффициент трения скольжения соломы по очесанному вороху.

На втором этапе определялся динамический коэффициент трения скольжения очесанного вороха по очесанному вороху. Для этого на шероховатую поверхность помещался экспериментальный образец №2. Все остальные операции были аналогичными приведенным выше.

Для проведения третьего этапа исследований шероховатая поверхность была снята и движение экспериментального образца происходило по металлической поверхности. На третьем этапе, согласно программе исследований определялся динамический коэффициент трения скольжения очесанного вороха по металлу. Для этого на наклонную металлическую поверхность помещался экспериментальный образец №2. Все последующие действия были аналогичными. И наконец, четвертый этап исследований, который предполагал определение динамического коэффициента трения соломы по металлу, проводился по той же методике, что и третий этап, за исключением того, что использовался экспериментальный образец №1.

#### 2.4.2. Результаты определения динамического коэффициента трения скольжения

Для вычисления динамического коэффициента трения использовалось выражение (2.14), в котором параметр  $t$  определялся экспериментальным путем, и поэтому было необходимо оценить достоверность его определения статистическими методами.

При проведении экспериментальных исследований по определению динамического коэффициента трения скольжения соломы по очесанному вороху был получен массив значений времени движения экспериментального образца по наклонной шероховатой поверхности. В результате расчетов установлено, что среднее значение времени движения составило 0,98 с, среднеквадратическое отклонение равно 0,062 с, а коэффициент вариации 6,3%. Невысокое значение коэффициента вариации свидетельствует о том, что значения времени движения имеют незначительный разброс относительно среднего значения. Расчетами установлено, что абсолютная погрешность составляет 0,011 с, а относительная погрешность 1,11%. Таким образом, полученные результаты статистической обработки массива значений времени движения экспериментального образца №1 по наклонной шероховатой поверхности позволяют сделать заключение о том, что данный параметр определен с достаточной точностью, относительная погрешность составляет 1,11%, что значительно меньше допускаемой пятипроцентной погрешности и это дает возможность использовать полученные экспериментальным путем значения для определения по формуле (2.14) коэффициента трения скольжения соломы по очесанному вороху.

При определении времени движения экспериментального образца №2 по наклонной шероховатой поверхности получены следующие статистические характеристики: среднеарифметическое значение 1,10 с, среднеквадратическое отклонение 0,066 с и коэффициент вариации 6,03%. Вычисление погрешностей проведения экспериментов показало, что опыты проведены с достаточной точностью, абсолютная ошибка равна 0,012 с, а относительная погрешность соста-

вила 1,09%, т.е. достоверность полученных результатов достаточная и полученные данные можно использовать при расчете коэффициента трения скольжения очесанного вороха по очесанному вороху.

Для определения динамического коэффициента трения скольжения соломы по металлу шероховатая поверхность была демонтирована и движение экспериментального образца №1 происходило по оцинкованной металлической поверхности являющейся днищем подвижного желоба 2 (рис. 2.22). В результате проведения экспериментальных исследований был получен массив значений времени перемещения образца №1 по наклонной металлической поверхности, который был обработан по методике, приведенной в п. 2.1. Среднеарифметическое значение времени движения экспериментального образца №1 по наклонной металлической поверхности составило 0,86 с, при этом среднеквадратическое отклонение равно 0,037 с и коэффициент вариации 4,3%. В качестве критериев точности определения времени движения были использованы следующие критерии: абсолютная и относительная ошибки среднего арифметического. В результате вычислений оказалось, что абсолютная ошибка среднеарифметического составила 0,0068 с, а относительная – 0,79%. Незначительность полученной относительной ошибки свидетельствует о том, что полученные результаты достоверны, относительная ошибка не превышает 5%, и эти данные можно использовать при расчете коэффициента трения скольжения по формуле (2.14).

Время перемещения экспериментального образца №2 по наклонной металлической поверхности было определено аналогично предыдущему случаю. После расчета статических характеристик были получены следующие результаты. Среднеарифметическое значение времени перемещения равно 0,89 с, среднеквадратическое отклонение 0,05 с, а коэффициент вариации составил 5,7%. Следует отметить, что в двух последних случаях коэффициент вариации получился незначительным, этот факт говорит о том, что численные значения времени перемещения имеют несущественный разброс относительно среднеарифметического значения. Определение абсолютной и относительной погрешности

показало, что абсолютная погрешность составила 0,0091 с, а относительная – 1,02%, что само собой разумеется меньше допускаемых 5%. Полученные результаты расчета статистических характеристик времени перемещения экспериментальных образцов по наклонной поверхности приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Статистические характеристики времени перемещения экспериментальных образцов по наклонной поверхности

| Статистические характеристики   | Ед. изм. | Номер экспериментального образца    |                                       |                                     |                                       |
|---------------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                 |          | Эксперим. образец №1                |                                       | Эксперим. образец №2                |                                       |
|                                 |          | движение по шероховатой поверхности | движение по металлической поверхности | движение по шероховатой поверхности | движение по металлической поверхности |
| Среднее арифметическое значение | с        | 0,98                                | 0,86                                  | 1,10                                | 0,89                                  |
| Среднеквадратическое отклонение | с        | 0,062                               | 0,037                                 | 0,066                               | 0,05                                  |
| Коэффициент вариации            | %        | 6,3                                 | 4,3                                   | 6,03                                | 5,7                                   |
| Абсолютная ошибка               | с        | 0,011                               | 0,0068                                | 0,012                               | 0,0091                                |
| Относительная ошибка            | %        | 1,11                                | 0,79                                  | 1,09                                | 1,02                                  |

Как видно из данных таблицы 2.7, а также проведенного статистического анализа полученных экспериментальных данных все полученные результаты достоверны и их можно использовать для расчета по формуле 2.14 динамического коэффициента трения скольжения.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Динамический коэффициент трения скольжения

| № | Трущиеся материалы                   | Численное значение динамического коэффициента трения |
|---|--------------------------------------|--|
| 1 | Солома по очесанному вороху          | 0,33   |
| 2 | Очесанный ворох по очесанному вороху | 0,39   |
| 3 | Солома по металлу                    | 0,26   |
| 4 | Очесанный ворох по металлу           | 0,28   |

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований, их последующего статистического анализа и расчетов по формуле 2.14

были получены численные значения динамического трения скольжения, которые будут использованы при последующем моделировании.

#### Выводы по второму разделу

1. Очесанный ворох представляет собой четырехкомпонентную смесь, состоящую из свободного зерна, соломы, полосты и оборванных колосков, причем математическое ожидание содержания свободного зерна в очесанном ворохе пшеницы составляет 53,77%, соломы 33,2%, полосты 8,86%, оборванных колосков 4,13%, а среднее значение длины, ширины и толщины зерновки 6,7 мм, 2,33 и 2,78 мм, в тоже время средняя длина соломины составила 2,54 мм, а оборванного колоса 88,9 мм, полученные результаты дают возможность определить вероятность просеивания свободного зерна через слои очесанного вороха.

2. Определен динамический коэффициент трения скольжения численное значение которого соответственно равно при трении соломы по очесанному вороху – 0,33, очесанного вороха по очесанному вороху – 0,39, соломы по металлу – 0,26 и очесанного вороха по металлу – 0,28, полученные результаты были использованы при моделировании движения соломы по экспериментальному рабочему органу.

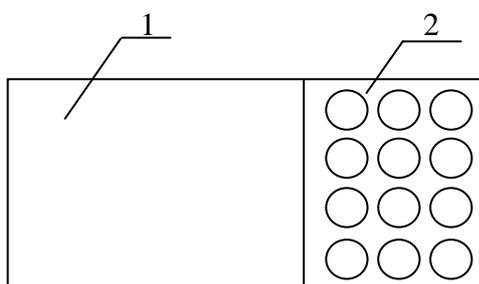
### РАЗДЕЛ III

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА

### 3.1. Методические предпосылки к разработке рабочего органа для сепарации очесанного вороха

Как уже ранее отмечалось очесанный ворох представляет собой смесь состоящую из свободного зерна, соломы, половы и оборванных колосков.

Задачей данного исследования является разработка и обоснование рабочего органа для выделения свободного зерна. Данный процесс можно выполнить в два этапа. На первом этапе перераспределить зерновки из верхних слоев вороха в нижний, а на втором этапе отсепарировать предварительно сегрегированный зерносоломистый материал. Таким образом ворох разделится на две фракции: крупные соломистые примеси смешанные с оборванными колосками



и свободное зерно с половой и мелкими примесями.

Для обеспечения выполнения данных операций предлагается рабочий орган, который состоит из сегрегатора 1 и решета 2 рис. 3.1 [94].

Рис. 3.1. Рабочий орган для сепарации очесанного вороха:

1 – сегрегатор; 2 – решето

Сегрегатор представляет собой сплошную металлическую поверхность. На поверхности решета выполнены круглые отверстия для прохода зерновой фракции.

Следующим этапом разработки рабочего органа является его теоретическое обоснование.

В теоретическом плане задача заключается в установлении зависимости между геометрическими размерами соломин и зерновок и вероятностного прохождения зерновки через слой соломы.

Наиболее приемлемым способом решения данной задачи является методика геометрического вычисления вероятностей [95]. Впервые метод геометрического вычисления вероятностей был предложен Бюффеном и был опубликован

в его работе [96].

Используя теоретическую базу [9, 95, 96] определим вероятность просеивания зерновки через слой соломы, для чего построим математическую модель сепарации зерна через слой очесанного вороха.

### 3.2. Математическая модель сепарации зерна через слой очесанного вороха

При просеивании зерновок через две соломины, возможны несколько случаев, которые обусловлены взаимным расположением соломин и отношением размеров зерновки к расстоянию между соломинами. Первый случай – расстояние между соломинками больше суммы длины зерновки и диаметра соломины. Второй случай – расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и длины зерновки и больше суммы диаметров соломины и зерновки и третий случай – расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и зерновки.

Рассмотрим первый случай, когда расстояние между соломинками больше суммы длины зерновки и диаметра соломины.

$$2\rho \geq 2l + 2r_c \rightarrow a \geq l, \quad (3.1)$$

где  $2\rho$  – расстояние между осями соломинок;

$2l$  – длина зерновки;

$2r_c$  – диаметр соломины.

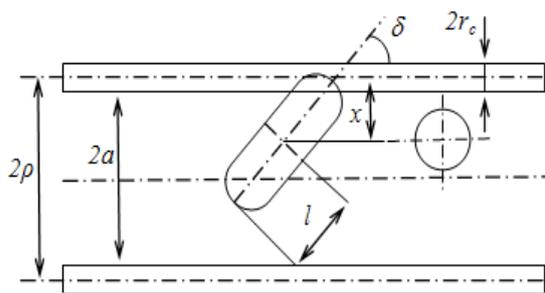


Рис. 3.2. Схема просеивания зерновки через две параллельные соломины, для первого случая

Введем обозначение  $a = \rho - r_c$ , тогда исходя из неравенства (3.1) следует, что  $a \geq l$ . Изобразим графически схему просеивания зерновки при параллельном расположении соломин (рис. 3.2).

Предположим, что

$$0 \leq x \leq r_c, \quad (3.2)$$

где  $x$  – расстояние от центра тяжести зерновки до оси соломины.

Таким образом, при таких значениях  $x$  зерно после удара, либо остается на поверхности соломины, либо отскочит и просеется. При изменении  $\delta$  от 0 до  $\pi$

и  $x$  от 0 до  $\rho$ , положение зерновки относительно соломин изменяется таким образом, что вероятность просеивания становится 100%. Благоприятным случаем для непросеивания зерновки является, исходя из неравенства (3.1), значение соответствующих величин, равное  $\pi$  и  $r_c$ .

Тогда используя определение геометрической вероятности, вероятность непросеивания зерна при его горизонтальном расположении:

$$p_1^I = \frac{\pi \cdot r_c}{\pi \cdot \rho} = \frac{r_c}{\rho}, \quad (3.3)$$

где  $p_1^I$  – вероятность непросеивания зерновки, при горизонтальном ее положении для первого случая.

При вертикальном расположении зерновки, вероятность непросеивания, исходя из рисунка 3.2, будет идентичной:

$$p_2^I = \frac{r_c}{\rho}, \quad (3.4)$$

где  $p_2^I$  – вероятность непросеивания зерновки, при вертикальном ее положении для первого случая.

Общая вероятность непросеивания зерновки для первого случая  $a \geq l$  при горизонтальном и вертикальном ее расположении составит:

$$p^I = \frac{p_1^I + p_2^I}{2} = \frac{r_c}{\rho}. \quad (3.5)$$

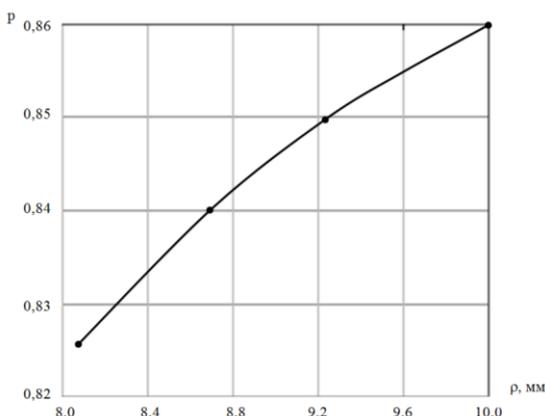


Рис. 3.3. Зависимость вероятности просеивания зерновки от расстояния между соломинами для первого случая при параллельном расположении соломин

Построим график зависимости вероятности просеивания от расстояния между соломинами для первого случая, когда  $a \geq l$ . Исходные данные для размеров зерновки и соломины возьмем из таблицы 2.4.

При построении графика использовалась вероятность просеивания зерновки для получения ее значений от единицы вычитался

результат вычисленный по формуле (3.5).

На рисунке 3.3 показан случай, когда соломины расположены параллельно

друг другу, однако в реальной действительности возможны различные случаи взаимного расположения соломин. Рассмотрим несколько наиболее часто встречающихся случаев, а именно, когда одна соломина находится под наклоном к другой (рис. 3.4) или когда соломины находятся под наклоном по отношению друг к другу (рис. 3.5) и наконец, когда соломины пересекаются (рис. 3.6).

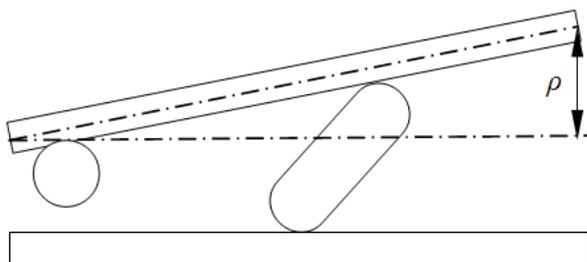


Рис. 3.4. Схема просеивания зерновки через две соломины, когда одна из соломин находится под наклоном к другой

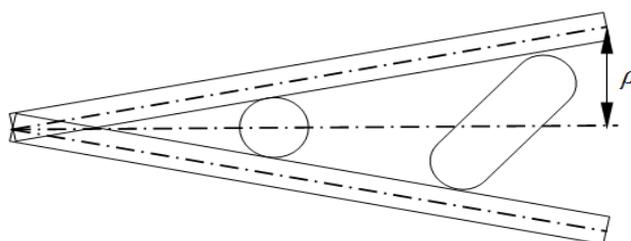


Рис. 3.5. Схема просеивания зерновки через две соломины, когда обе соломины находятся под наклоном по отношению друг к другу

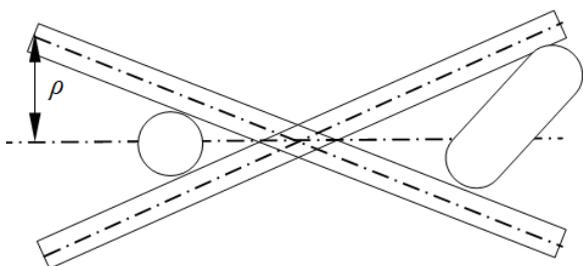


Рис. 3.6. Схема просеивания зерновки через две соломины, когда соломины пересекаются

Во всех представленных случаях происходит изменение межцентрового расстояния между соломинами.

Для дальнейших исследований введем параметр  $\tau \in [0; 1]$ , который характеризует изменение  $\rho$ . При использовании

параметра  $\tau$ , вероятность будет представлять из себя среднее арифметическое вероятностей, в тех формулах, в которых будут использоваться разные значения параметра  $\tau$ . Точность такого расчета будет прямопропорциональна шагу параметра  $\tau$  на всей области его определения. То есть, если  $\tau \in [0; 1]$ , то шаг 0,1 и 10 значений параметра  $\tau$ , при расчете дадут менее точный результат, чем шаг 0,01 и 100 значений параметра. Поэтому, при вычислении вероятности с использованием формул, в которых применяется параметр  $\tau$ , следует использовать вычислительные мощности ПК из-за значительного объема обрабатываемых данных.

Для случая, когда одна из соломин находится под наклоном по отношению

к другой (рис. 3.4) – расстояние между соломинами изменяется от  $\rho$  до  $2\rho$ , а  $\tau$  соответственно – от 0,5 до 1. Следовательно, вероятность непросеивания для этого случая, будет выглядеть:

$$p_{\tau_1}^2 = \frac{r_c}{\tau\rho}, \quad (3.6)$$

где  $\tau \in [0,5; 1]$ , а  $\rho \in [\rho; 2\rho]$ .

Построим график зависимости вероятности просеивание зерновки сквозь две соломины от расстояния между ними в случае, когда одна соломина нахо-

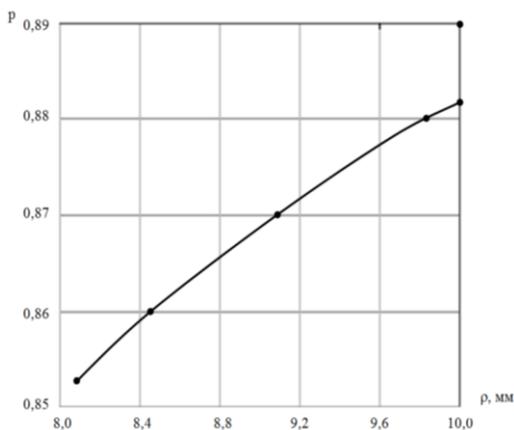


Рис. 3.7. Зависимость вероятности просеивания от расстояния между соломинами для первого случая, когда одна соломина находится под наклоном к другой

дится под наклоном к другой (рис. 3.7).

Как видно, из рисунка 3.7 с увеличением межцентрального расстояния  $\rho$  вероятность просеивания зерновки увеличивается.

Рассмотрим случай, когда соломины находятся под наклоном к друг другу (рис. 3.5).

Расстояние между соломинами изменяется от 0 до  $2\rho$ , а  $\tau$  от 0 до 1.

В точке пересечения соломин вероятность непросеивания 100%. Следовательно,

общая вероятность непросеивания для этого случая, будет выглядеть:

$$p_{\tau_2}^I = \frac{r_c}{\tau\rho}, \quad (3.7)$$

где  $\tau \in [0; 1]$ , а  $\rho \in [0; 2\rho]$ .

И для последнего случая, когда соломины пересекаются (рис. 3.6) параметр  $\tau$  будет уменьшаться от 1 до 0 на половине рассматриваемого участка и увеличиваться от 0 до 1 на другой половине, т. е.  $\tau = 0,5\tau [1; 0] + 0,5\tau (0; 1]$ .

Слагаемые равны между собой, следовательно:

$$p_{\tau_3}^I = \frac{r_c}{\tau\rho}, \quad (3.8)$$

где  $\tau \in (0; 1]$ , а  $\rho \in [0; 2\rho]$ .

Для случая, когда соломины пересекаются, построим график зависимости

вероятности просеивания от расстояния между соломинами (рис. 3.8).

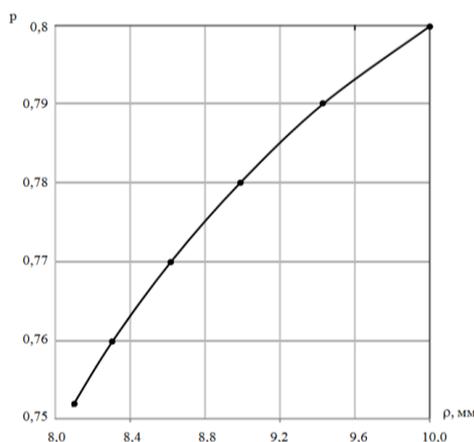


Рис. 3.8. Зависимость вероятности просеивания от расстояния между соломинами для первого случая, когда соломины пересекаются между собой

График показывает, что так же, как в предыдущем случае с увеличением расстояния между соломинами увеличивается вероятность прохождения зерновки между ними.

Таким образом, мы получили значения вероятностей для всех рассмотренных случаев взаимного расположения соломин, а именно, когда соломины параллельны друг другу (рис. 3.2), когда одна из соломин находится под углом к другой (рис. 3.4), когда обе соломины находятся под углом друг к другу (рис. 3.5) и наконец при пересечении соломин (рис. 3.6). Общая вероятность исходя из выражений (3.5), (3.6), (3.7) и (3.8) будет выглядеть следующим образом [97]:

$$p^I = \left( \frac{r_c}{\rho} + \frac{r_c}{\tau_{[0,5;1]}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1]}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1]}\rho} \right) / 4 = \frac{r_c (\tau_{[0,5;1]} \tau_{(0;1]} + 2\tau_{[0,5;1]} + \tau_{(0;1]})}{4\tau_{[0,5;1]} \tau_{(0;1]}\rho}. \quad (3.9)$$

Проведем расчет согласно выражений (3.9) и определим вероятность не-

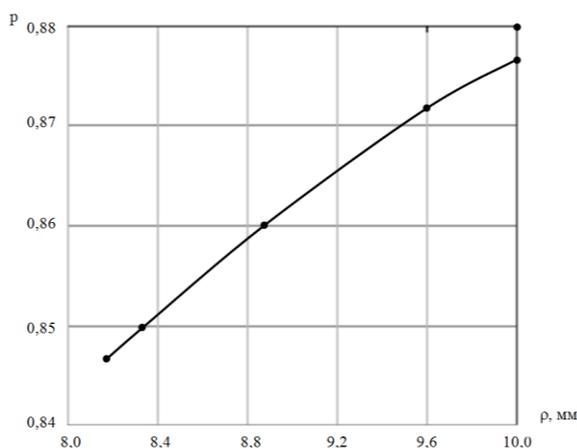


Рис. 3.9. Зависимость полной вероятности просеивания от расстояния между соломинами для первого случая

просеивания, затем по выражению  $P_{прос} = I - p^I$  определяем вероятность просеивания, и построим график зависимости полной вероятности просеивания от расстояния между соломинами (рис. 3.9).

Из рисунка 3.9 видно, что полная вероятность просеивания увеличивается с увеличением расстояния между соломинами.

II случай. Расстояния между соломинами меньше суммы диаметра соломины и длины зерновки и больше суммы диаметра соломины и ширины зерновки (рис. 3.10).

$$2r_c + 2r_3 \leq 2\rho \leq 2l + 2r_c \rightarrow r_3 \leq a \leq l. \quad (3.10)$$

где  $2r_3$  – ширина зерновки.

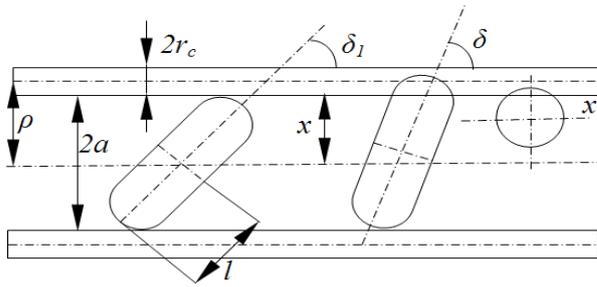


Рис. 3.10. Схема просеивания зерновки через две параллельные соломинки для второго случая

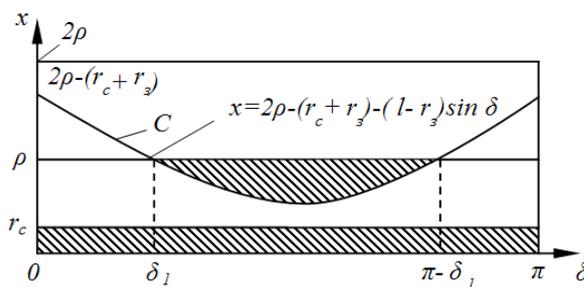


Рис. 3.11. Схема к расчету вероятности непросеивания зерновки, если кривая C не пересекает прямую  $x = r_c$

Рассмотрим случаи благоприятные непросеиванию зерновки. На рис. 3.11 показана заштрихованная площадь, иллюстрирующая благоприятные случаи непросеивания зерновки. В зависимости от соотношений  $r_c$ ,  $r_3$ ,  $l$  и  $\rho$ , можно рассмотреть два подслучая.

1. Кривая распределения вероятности непросеивания (кривая C) не пересекает прямую  $x = r_c$ , то есть:

$$a < r_c + r_3 + (l - r_3) - \rho \leq \rho - r_c$$

или

$$\frac{1}{2} \leq a \leq l, (\text{при } \frac{l}{2} > r_3) \text{ и } \frac{1}{2} \leq a \leq l, (\text{при } \frac{l}{2} \leq r_3).$$

Из рисунка 3.11 следует, что вероятность непросеивания при горизонтальном расположении зерновки будет:

$$p_1'' = \frac{\pi r_c + \int_{\delta_1}^{\pi - \delta_1} [\rho - 2\rho + r_c + r_3 + (l - r_3) \sin \delta] d\delta}{\pi \rho}. \quad (3.11)$$

Если принять, что  $\delta_1 = \arcsin \frac{a - r_3}{l - r_3}$ , а  $\frac{a - r_3}{l - r_3} = \frac{\rho - r_c - r_3}{l - r_3} = \lambda^l$ , то выражение (3.11)

принимает вид [97]:

$$p_1'' = \frac{r_c}{\rho} + \frac{2(l - r_3)}{\pi \rho} \left[ \sqrt{1 - (\lambda^l)^2} - \lambda^l \arccos \lambda^l \right] \quad (3.12)$$

При  $a = l$  или  $\lambda^l = 1$  выражение (3.12) переходит в выражение (3.3) т.е.

$$p_1'' = \frac{r_c}{\rho} = p_1'.$$

2. Кривая C пересекает в точках  $\delta_2$  и  $\pi - \delta_2$  прямую  $x = r_c$ :

$$r_c + r_3 + (l - r_3) - \rho \geq \rho - r_c,$$

или

$$r_3 \leq a \leq \frac{l}{2}. \quad (3.13)$$

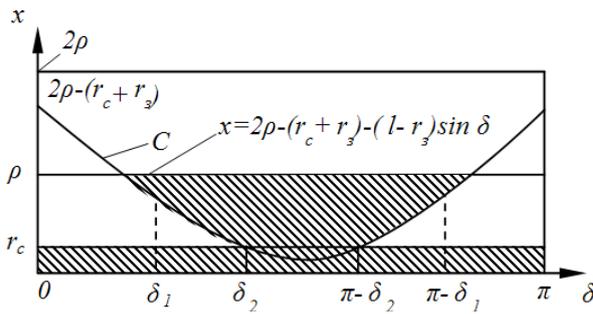


Рис. 3.12. Схема к расчету вероятности непросеивания зерновки, если кривая С пересекает прямую  $x=r_c$

Как видно из рисунка 3.12 появляется область пересечения вероятностей непросеивания зерна. Тогда формула вероятности непросеивания будет иметь следующий вид:

$$p_1''' = \frac{\pi r_c + \int_{\delta_1}^{\pi-\delta_1} [\rho - 2\rho + r_c + r_3 + (l - r_3) \sin \delta] d\delta}{\pi \rho} - \frac{\int_{\delta_2}^{\pi-\delta_2} [r_c - 2\rho + r_c + r_3 + (l - r_3) \sin \delta] d\delta}{\pi \rho}, \quad (3.14)$$

где  $p_1'''$  – вероятность непросеивания зерновки для второго случая, при условии что кривая С пересекает прямую  $x=r_c$  если зерновка расположена горизонтально.

$$\delta_1 = \arcsin \frac{a - r_3}{l - r_3} \quad \delta_1 = \arcsin \frac{2a - r_3}{l - r_3}$$

Произведем в выражении (3.14) замены идентичные заменам в зависимости (3.12):

$$p_1''' = \frac{r_c}{\rho} + \frac{2(l - r_3)}{\pi \rho} \left[ \sqrt{1 - (\lambda')^2} - \lambda' \arccos \lambda' - \sqrt{1 - (\lambda'')^2} - \lambda'' \arccos \lambda'' \right] \quad (3.15)$$

где  $\lambda'' = \frac{2a - r_3}{l - r_3}$ .

При  $2a = l$  или  $\lambda'' = 1$ , получим  $p_1''' = p_1''$ .

Вероятность непросеивания при вертикальном расположении зерновки для обоих подслучаев второго случая будет:

$$p_2''' = p_2'' = \frac{r_c}{\rho}. \quad (3.16)$$

Общая вероятность непросеивания  $p''$  для второго случая, когда кривая С не пересекает прямую  $x=r_c$  будет определяться из соотношения:

$$p'' = \frac{p_1'' + p_2''}{2} = \frac{r_c}{\rho} + \frac{l - r_3}{\pi \rho} \left[ \sqrt{1 - (\lambda')^2} - \lambda' \arccos \lambda' \right] \quad (3.17)$$

Общая вероятность непросеивания  $p^{\text{III}}$  для второго случая, при условии, что кривая С пересекает прямую  $x=r_3$  находим из выражения:

$$p^{\text{III}} = \frac{p_1^{\text{III}} + p_2^{\text{III}}}{2} = \frac{r_c}{\rho} + \frac{2(l-r_3)}{\pi\rho} \times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{\text{II}})^2} - \lambda^{\text{II}} \arccos \lambda^{\text{II}} \right] \quad (3.18)$$

Рассмотрим методику вычисления вероятности непросеивания зерновки в случае параллельного расположения соломин между собой, для чего используем формулы 3.5...3.7. Изменение величины  $\rho$  будет аналогичным первому случаю. Запишем формулу (3.17) исходя из изменяющегося расстояния между соломинами [97]:

$$\begin{aligned} p^{\text{II}} &= \left( \frac{r_c}{\rho} + \frac{r_c}{\tau_{[0.5;1]}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1)}\rho} \right) / 4 + \\ &+ \left( \frac{l-r_3}{\pi\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{[0.5;1]}\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{(0;1)}\rho} \right) \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I \right] / 4 = \\ &= \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)}\pi\rho} \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I \right] \end{aligned} \quad (3.19)$$

Аналогичным образом формула (3.18) после соответствующих подстановок принимает вид [97]:

$$\begin{aligned} p^{\text{III}} &= \left( \frac{r_c}{\rho} + \frac{r_c}{\tau_{[0.5;1]}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{r_c}{\tau_{(0;1)}\rho} \right) / 4 + \\ &+ \left( \frac{l-r_3}{\pi\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{[0.5;1]}\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{l-r_3}{\pi\tau_{(0;1)}\rho} \right) \times \\ &\times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{\text{II}})^2} - \lambda^{\text{II}} \arccos \lambda^{\text{II}} \right] / 4 = \\ &= \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)}\rho} + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]}\tau_{(0;1)}\pi\rho} \times \\ &\times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{\text{II}})^2} - \lambda^{\text{II}} \arccos \lambda^{\text{II}} \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

Построим графики зависимости вероятности просеивания зерновки от расстояния между соломинами для второго случая при условии что кривая распределения вероятности непросеивания (кривая С) не пересекает прямую  $x=r_c$  (рис. 3.13), и когда кривая С пересекает прямую  $x=r_c$  (рис. 3.14).

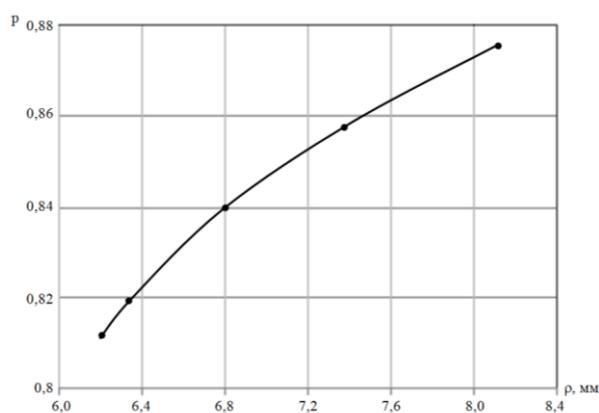


Рис. 3.13. График зависимости вероятности просеивания зерновки от расстояния между соломинами для второго случая при условии, что кривая  $C$  не пересекает прямую  $x=r_c$

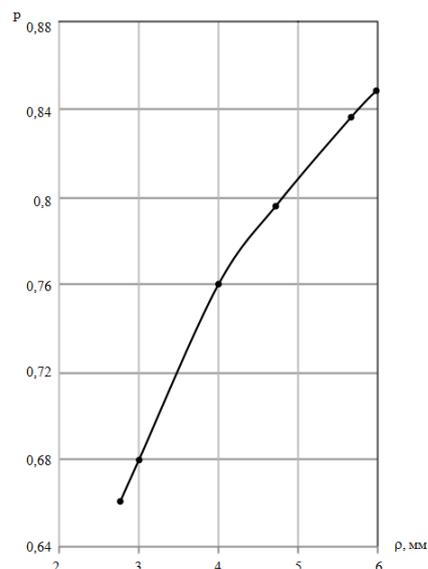


Рис. 3.14. График зависимости вероятности просеивания зерновки от расстояния между соломинами для второго случая, если кривая  $C$  пересекает прямую  $x=r_c$

III случай. Расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и ширины зерновки:

$$2\rho < 2r_c + 2r_3 \rightarrow a < r_3. \quad (3.21)$$

В этом случае, как при горизонтальном расположении зерновки, так и при вертикальном, вероятность непросеивания равна 1:

$$p_1^{IV} = p_2^{IV} = 1, \text{ а } p^{IV} = \frac{p_1^{IV} + p_2^{IV}}{2} = 1. \quad (3.22)$$

где  $p_1^{IV}$  – вероятность непросеивания для третьего случая при горизонтальном расположении зерновки;

$p_2^{IV}$  – вероятность непросеивания для третьего случая при вертикальном расположении зерновки;

$p^{IV}$  – общая вероятность непросеивания для третьего случая.

Исходя из полученных результатов можно вычислить общую вероятность непросеивания зерновки через один слой соломы. Она будет представлять собой систему из четырех уравнений.

$$p_e = \begin{cases} p^I = \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \rho}; \\ p^II = p^I + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \times \\ \times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I \right]; \\ p^III = p^I + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \times \\ \times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{II})^2} - \lambda^{II} \arccos \lambda^{II} \right]; \\ p^{IV} = 1. \end{cases} \quad (3.23)$$

Итоговая вероятность непросеивания будет зависеть от вероятности появления того или иного случая и подслучая взаимного расположения соломин. Если принять, что вероятность появления этих случаев взаимного расположения соломин одинакова, то общая вероятность непросеивания зерновки будет представлять из себя среднее арифметическое всех вероятностей из системы (3.23).

$$p_e = \left( \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \rho} + \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \rho} + \right. \\ \left. + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I \right] + \right. \\ \left. \frac{r_c(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \rho} + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \right. \\ \left. \times \left[ \sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{II})^2} - \lambda^{II} \arccos \lambda^{II} \right] + 1 \right) / 4 = \\ = \left( \frac{3r_c(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \rho} + \frac{(l-r_3)(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{4\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \right) \times \\ \times \left[ 2\sqrt{1-(\lambda^I)^2} - 2\lambda^I \arccos \lambda^I - \sqrt{1-(\lambda^{II})^2} - \lambda^{II} \arccos \lambda^{II} \right] + 1) / 4 = \\ = \frac{(\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} + 2\tau_{[0.5;1]} + \tau_{(0;1)})}{16\tau_{[0.5;1]} \tau_{(0;1)} \pi \rho} \times \\ \times (3\pi r_c + (l-r_3) \left[ 2(\sqrt{1-(\lambda^I)^2} - \lambda^I \arccos \lambda^I) - \sqrt{1-(\lambda^{II})^2} - \lambda^{II} \arccos \lambda^{II} \right]) + 0,25. \quad (3.24)$$

Как видно из полученной модели и последующего моделирования основным критерием вероятности просеивания зерновки через слой соломы является расстояние между соломинами, и чем оно больше, тем вероятность просеивания выше, и тем самым сегрегация идет интенсивнее.

Интенсификация процесса сегрегации очесанного вороха зерновых колосовых может быть достигнута за счет колебательного движения рабочего органа. Ускорить перемещение зерносоломистого материала по поверхности рабо-

чего органа можно путем расположения его под углом к горизонту. Таким образом имеет место движение очесанного вороха по наклонной колеблющейся поверхности.

### 3.3. Моделирование процесса перемещение соломины по рабочему органу

#### 3.3.1. Методика моделирования

В п.п. 3.2 установлено, что рабочий орган представляет собой наклонную колеблющуюся поверхность, колебательное движение которой генерируется эксцентриковым валом.

За один оборот эксцентрикового вала соломина перемещается вниз, а затем вверх, поэтому дифференциальные уравнения при движении соломины вниз и при ее движение вверх различные.

Для движения соломины вниз по рабочему органу [70]:

$$m \frac{d^2 \rho_{\text{ВН}}}{dt^2} = m\omega^2 r \cos(\alpha + \beta) \cdot \cos(\omega t) + mg \sin \alpha - mf [g \cos \alpha - r\omega^2 \sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\omega t)]. \quad (3.25)$$

Для движения соломины вверх по рабочему органу [70]:

$$m \frac{d^2 \rho_{\text{ВВ}}}{dt^2} = m\omega^2 r \cos(\alpha + \beta) \cdot \cos(\omega t) - mg \sin \alpha - mf [g \cos \alpha + r\omega^2 \sin(\alpha + \beta) \cdot \cos(\omega t)]. \quad (3.26)$$

где  $\rho_{\text{ВН}}$  – перемещение соломины вниз, м;

$\rho_{\text{ВВ}}$  – перемещение соломины вверх, м;

$r$  – амплитуда колебаний, м;

$\omega$  – частота колебаний рабочего органа,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\alpha$  – угол наклона рабочего органа, град.;

$\beta$  – угол направленности колебаний, град.;

$f$  – динамический коэффициент трения соломины.

Решение дифференциальных уравнений (3.25) и (3.26) имеет вид:

– при движении соломины вниз [70, 98]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ВН}} = & -r\cos(\alpha + \beta)\cos(\omega t) + \frac{gt^2}{2}\sin\alpha - gf\frac{t^2}{2}\cos\alpha - \\ & -rfsin(\alpha + \beta)\cos(\omega t) + r\cos(\alpha + \beta) + rfsin(\alpha + \beta); \end{aligned} \quad (3.27)$$

– при движении соломины вверх [70, 98]:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ВВ}} = & -r\cos(\alpha + \beta)\cos(\omega t) - \frac{gt^2}{2}\sin\alpha - gf\frac{t^2}{2}\cos\alpha + \\ & +rfsin(\alpha + \beta)\cos(\omega t) + r\cos(\alpha + \beta) - rfsin(\alpha + \beta). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Как видно из данных формул на процесс перемещения соломины по рабочему органу влияют четыре фактора. А именно: угол наклона рабочего органа  $\alpha$ , угол направленности колебаний  $\beta$ , частота колебаний  $\omega$ , а также эксцентриситет эксцентрикового вала  $r$ , от величины которого зависит амплитуда колебаний.

Что касается углов  $\alpha$  и  $\beta$ , а также эксцентриситета  $r$ , влияющих на процесс перемещения соломины то здесь можно использовать для моделирования теоретические основы комбинаторного анализа [99, 100]. Несколько сложнее дело обстоит с частотой колебаний.

Частота колебаний решета входит в уравнения (3.27, 3.28) в качестве аргумента тригонометрической функции в сочетании с еще одним параметром  $t$  (временем) и в общем их произведении равно углу поворота эксцентрикового вала  $\Theta = \omega t$ .

Поэтому рассмотрим различные комбинации первых трех факторов при фиксированном значении частоты колебаний. Каждый из параметров, влияющих на процесс перемещения соломины может иметь множество значений, нам необходимо выбрать из этого множества те значения, при которых соломина за один оборот эксцентрикового вала будет иметь максимальное перемещение. При одном обороте эксцентрикового вала соломина вначале движется вниз, а затем вверх. Общее перемещение ее за один оборот эксцентрикового вала опре-

делится из соотношения:

$$\rho = \rho_{\text{вн}} - \rho_{\text{вв}}. \quad (3.29)$$

Максимальное полное перемещение соломины будет в том случае, если соломина вниз переместится на максимальное расстояние, а вверх – на минимальное. Каждый из параметров, влияющих на перемещение соломины находится в определенном диапазоне, границы которого приведены в литературных источниках [46, 64, 70, 101-103]. Обозначим минимальное и максимальное значение для угла наклона решета через  $a$  и  $c$ , для угла направленности колебаний решета по отношению к горизонтам через  $d$  и  $k$ , а также для амплитуды колебаний через  $l$  и  $m$ .

Для удобства поиска оптимальных параметров введем еще по одному значению внутри каждого диапазона, которые определяются из соотношений:

$$b = a + i_1, \quad h = d + i_2, \quad n = l + i_3, \quad (3.30)$$

где  $b$  – дополнительное значение угла наклона рабочего органа;

$h$  – дополнительное значение угла направленности колебаний;

$n$  – дополнительное значение амплитуды колебаний;

$i_1, i_2, i_3$  – интервалы варьирования факторами.

Интервалы варьирования параметрами определяются по формулам:

$$i_1 = \frac{c-a}{2}; \quad i_2 = \frac{k-d}{2}; \quad i_3 = \frac{m-l}{2}. \quad (3.31)$$

Таким образом, у нас имеется три параметра, влияющих на процесс перемещения соломины, которые изменяются определенным образом в некоторых диапазонах, характеризуемые тремя значениями. Обозначения параметров и их численные значения приведены в таблице 3.1.

Общее количество комбинаций можно определить из формулы [104, 105].

$$N = 3! + 3(2C_3^2 + C_3^3), \quad (3.32)$$

где  $N$  – общее количество комбинаций;

$3!$  – количество перестановок из 3 параметров по одному;

$C_3^2$  – количество параметров сгруппированных по 2;

$C_3^3$  – количество параметров сгруппированных по 3.

Таблица 3.1

## Численные значения параметров

| № | Наименование параметров                | Единицы измерения | Обозначения параметров | Численные значения параметров |
|---|--|-------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1 | Угол наклона решета, $\alpha$          | град.             | $a$                    | 3                             |
|   |  |                   | $b$                    | 5                             |
|   |  |                   | $c$                    | 7                             |
| 2 | Угол направленности колебаний, $\beta$ | град.             | $d$                    | 8                             |
|   |  |                   | $h$                    | 14                            |
|   |  |                   | $k$                    | 20                            |
| 3 | Амплитуда колебаний, $r$               | м.                | $l$                    | 0,006                         |
|   |  |                   | $n$                    | 0,008                         |
|   |  |                   | $m$                    | 0,01                          |

После расчетов по формуле (3.32), получаем, что общее число комбинаций параметров с различными значениями равно 27.

Возможные комбинации значений параметров, влияющих на перемещение соломины приведены в табл. П. 24 (Приложение Д).

Если подставить возможные комбинации параметров, которые приведены в табл. П.24 в уравнение (3.27), то получим 27 уравнений для расчета перемещения соломины при ее движении вниз, которые приведены в приложении В, формулы ПФ 1.1...ПФ 1.27.

Аналогичным образом для определения перемещения соломины вверх подставим возможные комбинации значений параметров в уравнение 3.27, и также получим 27 расчетных уравнений, для определения движения соломины вверх (Приложение В, формулы ПФ 2.1...ПФ 2.27).

Задачей моделирования является установление комбинации значений параметров, при которой происходит максимальное полное перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала.

Перемещение рабочего органа вниз соответствует обороту эксцентрикового вала на  $\pi$  радиан; аналогичным образом его перемещение вверх также обусловлено оборотом эксцентрикового вала на  $\pi$  радиан. Поэтому при моделиро-

вании уравнения (ПФ 1.1... ПФ 1.27) подставляем угол  $(\omega t) = \pi$ . Моделирование проводилось для трех значений частоты вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ . Следовательно, время поворота эксцентрикового вала на угол равный  $\pi$ , определится из соотношения  $t = \frac{\pi}{\omega}$ , и в нашем случае  $t_1 = 0,0698\text{ с}$ ,  $t_2 = 0,0628\text{ с}$  и  $t_3 = 0,0571\text{ с}$ . Кроме того при составлении окончательных расчетных формул было учтено, что  $\cos\pi = -1$ . Уравнения движения соломины вниз приведены в приложении В, формулы ПФ 3.1...ПФ 3.27.

Для получения расчетных зависимостей перемещения соломины вверх в уравнения (ПФ 2.1...ПФ 2.27) подставляем угол  $(\omega t) = \pi$  и также для трех частот вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ . Проводим расчеты, по расчетным соотношениям приведенным в приложении В. В выражениях (ПФ 4.1...ПФ 4.27)  $t_1$  означает время поворота эксцентрикового вала на угол равный  $\pi$ , при частоте вращения  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$  для частот  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$  будет равно  $t_2$  и  $t_3$  соответственно.

Результаты расчетов сводятся в таблицы (для движения вниз и движения вверх), по данным которых строятся диаграммы перемещения соломины вниз и перемещения вверх при различных значениях частот вращения эксцентрикового вала. На диаграммах указываются комбинации значений параметров и режимов функционирования рабочего органа и проводится ранжирование значений перемещения соломины, для движения вниз от максимального значения к минимальному, а для движения вверх от минимального к максимальному.

По формуле (3.29) определяется полное перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала и также расчетные данные сводятся в таблицу, по результатам которой строятся диаграммы полного перемещения соломины при различных частотах вращения эксцентрикового вала ( $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  и  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ ), а затем также проводится ранжирование значений полного перемещения соломины от максимального к минимальному. В результате построений получается три диаграммы, в каждой из которых имеется максимальное

значение перемещения.

Из каждой диаграммы выбираются максимальные значения перемещения соломины для каждой из частот, которые получены при соответствующей комбинации значений параметров и режимов рабочего органа.

### 3.3.2. Результаты моделирования

Моделирование процесса перемещения соломины по поверхности рабочего органа выполнялось в три этапа. На первом этапе рассмотрено движение соломины вниз. Для расчета перемещения использовались выражения (ПФ 3.1...ПФ 3.27).

Расчеты проведены для трех значений частот  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  и  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ . Результаты моделирования движения соломины вниз приведены на диаграмме (Приложение Е, рис. 1П).

Как видно из рис. 1П максимальные перемещения соломины вниз происходят при комбинации значений параметров  $s$ ,  $h$ ,  $m$  для всех трех частот вращения эксцентрикового вала. При частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$  это перемещение составляет 0,0161 м, при  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  оно равняется 0,01706 м и наконец при  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$  соломина переместится на 0,01776 м.

Полученные результаты указывают на то, что наибольшее значение перемещения соломины вниз получено при частоте  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$  и при комбинации значений параметров и режимов работы решета  $s$ ,  $h$ ,  $m$ , что соответствует в численном значении  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 14^\circ$  и  $r = 0,01$  м, следует отметить, что близкими к максимальным значениям являются перемещения, которые получаются при комбинациях параметров  $s$ ,  $d$ ,  $m$  и  $s$ ,  $k$ ,  $m$ , причем эта закономерность наблюдается при всех значениях исследуемых частот. Как мы видим сочетания значений параметров и режимов работы решета  $s$ ,  $h$ ,  $m$ ;  $s$ ,  $d$ ,  $m$  и  $s$ ,  $k$ ,  $m$  приводят к незначительно отличающимся перемещениям соломины эту закономерность видно из рис. 1П. Минимальные значения перемещения соломины вниз получены при комбинациях  $a$ ,  $h$ ,  $l$ ;  $a$ ,  $k$ ,  $l$  и  $a$ ,  $d$ ,  $l$ . Например, при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$  эти перемещения численно равны 0,006 м,

0,0059 м и 0,0059 м соответственно. Из приведенного анализа следует сделать следующий вывод, что максимальное перемещение соломины обеспечивает комбинация значений параметров решета  $c$ ,  $h$ ,  $m$ , т. е. угол наклона решета  $\alpha = 7^\circ$ , угол направленности колебаний решета  $\beta = 14^\circ$  и амплитуда колебаний  $r = 0,01$  м. Максимальное перемещение соломины наблюдается при частоте  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ .

На втором этапе исследований рассмотрено движение соломины вверх. Расчет перемещения соломины выполнен по уравнениям (ПФ 4.1...ПФ 4.27). При движении соломины вверх нас в первую очередь интересуют те сочетания параметров и режимов работы решета, которые обеспечивают минимальное перемещение соломины. Результаты расчетов перемещения соломины при движении ее вверх по решету приведены на диаграммах (Приложение Е, рис. 2П). Как видно из диаграмм минимальные значения перемещения соломины наблюдаются при комбинации значений параметров и режимов работы решета  $c$ ,  $k$ ,  $l$ , причем это сочетание сохраняется на всех исследуемых частотах вращения эксцентрикового вала. Так при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ ,  $\rho_{\text{вв}} = -0,0018$  м, при  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  соответственно  $\rho_{\text{вв}} = 0,0022$  м, и наконец при  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$  перемещение соломины составляет  $\rho_{\text{вв}} = 0,0017$  м. Знак «минус» перед значением перемещения указывает на направление движения, т.е. в данном случае соломина движется вниз, такое же направление движения соломины наблюдается при следующих комбинациях значений параметров и режимов работы решета  $c$ ,  $h$ ,  $l$ ;  $b$ ,  $k$ ,  $l$  и  $c$ ,  $d$ ,  $l$  при частоте вращения эксцентрикового вала  $45\text{с}^{-1}$ , на других частотах такое явление не наблюдается. В целом сохраняется тенденция увеличения перемещения при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала. Численные значения параметров и режимов работы решета при минимальном перемещении соломины вверх составляют соответственно  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$  и  $r = 0,06$  м.

Максимальные значения перемещения соломины вверх наблюдаются при комбинации значений  $a$ ,  $d$ ,  $m$ , при этом перемещение вверх составляет 0,0093 м, 0,01099 м и 0,0123 м. Как видно тенденция к увеличению перемеще-

ния при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала сохраняется.

На третьем этапе моделирования рассмотрим динамику полного перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала. Полученные результаты ранжируем по возрастающей и строим диаграмму перемещений (Приложение Е, рис. 3П).

Как видно из рис. 3П, максимальное перемещение соломины наблюдается при сочетании параметров и режимов функционирования рабочего органа  $c$ ,  $k$ ,  $m$  при частоте вращения эксцентрикового вала равной  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ , эта же закономерность наблюдается на других исследуемых частотах ( $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  и  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ ), с той лишь разницей, что полное перемещение соломины меньше, чем при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ . В численном виде это выглядит следующим образом при  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$  перемещение равно 0,0118 м, при  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  полное перемещение уже меньше и составляет 0,0107 м и наконец при  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$  перемещение соломины еще меньше и равняется 0,00987 м. Таким образом мы наблюдаем явление уменьшения полного перемещения соломины с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала, при одной и той же комбинации значений параметров и режимов функционирования рабочего органа. В раскодированном виде это сочетание выглядит следующим образом: угол наклона рабочего органа  $\alpha = 7^\circ$ , угол направленности колебаний  $\beta = 20^\circ$  и амплитуда колебаний  $r = 0,01$  м.

Минимальное перемещение соломины наблюдается при комбинации значений  $a$ ,  $d$ ,  $l$ , это соответствует перемещению 0,00399 м при  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$ , 0,00357 м при  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  и 0,0032 м при  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$ . Как видно, тенденция к уменьшению значений перемещения соломины при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала сохраняется.

Таким образом моделирование, проведенное в три этапа показало, что наиболее рациональный режим для наибольшего перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала будет режим при котором угол наклона рабочего органа  $\alpha = 7^\circ$ , угол направленности колебаний  $\beta = 20^\circ$ , амплитуда колебаний  $r = 0,01$  м и частота вращения эксцентрикового вала  $\omega = 45\text{с}^{-1}$ .

### 3.4. Программа и методика теоретического обоснования параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа

Программа теоретического обоснования параметров и режимов работы рабочего органа для сепарации очесанного вороха включала в себя:

- обоснование угла наклона сепарирующего рабочего органа;
- обоснование угла направленности колебаний;
- обоснование амплитуды и частоты колебаний сепарирующего рабочего органа.

Анализ полученных уравнений движения соломины по наклонной колеблющейся поверхности дает возможность обосновать параметры и режимы работы сепарирующего рабочего органа. Критерием позволяющим сделать данный выбор является перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала.

Для обоснования параметров функционирования рабочего органа определим наибольшее значение при движении соломины вниз используя методы математического анализа [106, 107], а затем определим наименьшее перемещение соломины при ее движении вверх, используя при этом те же методы, на завершающем этапе рассмотрим полное перемещение. Следует отметить, что при дифференцировании уравнения движения в первом случае будем считать угол  $\alpha$  переменным, а все остальные факторы ( $\beta$ ,  $r$ ,  $t$  – постоянным), во втором случае будем считать угол  $\beta$  переменным, а все остальные факторы постоянными. Такая методика исследования используется на основании того, что нами уже проведено математическое моделирование и получены комбинации значений параметров и режимов работы сепарирующего рабочего органа обеспечивающие наибольшее перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала.

Задача данного исследования установить влияние каждого из факторов на перемещение соломины, и на основании проведенного анализа установить оптимальные параметры и режимы работы сепарирующего рабочего органа.

### 3.5. Теоретическое обоснование угла наклона сепарирующего рабочего органа

Рассмотрим вначале движение соломины вниз. Это движение описывается уравнением (3.27).

Учитывая тот факт, что мы рассматриваем перемещение соломины при условии поворота эксцентрикового вала на угол равный  $\pi$  радиан, в этом случае уравнение несколько упростится и примет вид:

$$\rho_{BH} = 2r[\cos(\alpha + \beta) + f \cdot \sin(\alpha + \beta)] + \frac{gt^2}{2}(\sin\alpha - f\cos\alpha) \quad (3.33)$$

Если в уравнение (3.33) подставить формулы сложения углов [108]:

$$\begin{aligned} \sin(\alpha + \beta) &= \sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta \\ \cos(\alpha + \beta) &= \cos\alpha \cdot \cos\beta - \sin\alpha \cdot \sin\beta \end{aligned}$$

то выражение (3.33) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \rho_{BH} &= 2r\cos\alpha \cdot \cos\beta - 2r\sin\alpha \cdot \sin\beta + 2rf\sin\alpha \cdot \cos\beta + \\ &+ 2rf\cos\alpha \cdot \sin\beta + \frac{gt^2}{2}\sin\alpha - \frac{gt^2}{2}f\cos\alpha. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Продифференцируем выражение (3.34) по углу  $\alpha$ , учитывая, что параметры  $r$ ,  $\beta$  и  $t$ , которые входят в уравнение (3.34) являются постоянными

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{BH}}{d\alpha} &= -2r\cos\beta \cdot \sin\alpha - 2r\sin\beta \cdot \cos\alpha + 2rf\cos\beta \cdot \cos\alpha - \\ &- 2rf\sin\beta \cdot \sin\alpha + \frac{gt^2}{2}\cos\alpha + \frac{gt^2}{2}f\sin\alpha. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Продифференцируем выражение (3.35) по углу  $\alpha$ , т. е. найдем  $\frac{d^2\rho_{BH}}{d\alpha^2}$ .

$$\begin{aligned} \frac{d^2\rho_{BH}}{d\alpha^2} &= -2r\cos\beta \cdot \cos\alpha + 2r\sin\beta \cdot \sin\alpha - 2rf\cos\beta \cdot \sin\alpha - 2r\sin\beta \cdot \cos\alpha - \\ &- \frac{gt^2}{2}\sin\alpha + \frac{gt^2}{2}f\cos\alpha = -\left(2r\cos\beta + 2rf\sin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right)\cos\alpha + \\ &+ \left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\sin\alpha\right) = \\ &= -\cos\alpha \left[\left(2r\cos\beta + 2rf\sin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right) - \left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \cdot \operatorname{tg}\alpha\right]. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Приравняем к нулю выражение (3.35), т.е.  $\frac{d\rho_{BH}}{d\alpha} = 0$ .

$$-\left(2r\cos\beta + 2rf\sin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right)\sin\alpha - \left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \cdot \cos\alpha = 0. \quad (3.37)$$

Преобразуем уравнение (3.37) следующим образом. Перенесем слагаемое  $\left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \cdot \cos\alpha$  в правую часть:

$$-\left(2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \sin\alpha = \left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \cdot \cos\alpha = 0. \quad (3.38)$$

Разделим левую и правую часть выражения (3.38) на  $\left(2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}\right) \cdot \cos\alpha$ .

В результате получим

$$tg \alpha = -\frac{2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}}{2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}} \text{ или } tg \alpha = \frac{2rf\cos\beta - 2r\sin\beta + \frac{gt^2}{2}}{2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}}. \quad (3.39)$$

Подставим выражение (3.39) в уравнение (3.36)

$$\frac{d^2\rho_{BH}}{dt^2} = -\cos\alpha \left[ \left(2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right) + \frac{\left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right)^2}{2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}} \right]. \quad (3.40)$$

Как известно из курса математического анализа [107] наибольшее значение функции будет в том случае, если вторая производная отрицательная, т. е.  $\frac{d^2\rho}{d\alpha^2} < 0$ . Проанализируем выражение (3.40), учитывая, при этом, что  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ ,  $0 < \beta < \frac{\pi}{2}$ ,  $t > 0$ . После подстановки значений  $r$ ,  $\beta$  и  $t$  (причем берем численные значения для  $t$  равным  $t_1 = 0,0697$  с,  $t_2 = 0,0628$  с и  $t_3 = 0,0571$  с, что соответствует частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45$  с<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 50$  с<sup>-1</sup> и  $\omega_3 = 55$  с<sup>-1</sup> во второй сомножитель выражения (3.40), получаем, что он положительный для всех трех частот выражения эксцентрикового вала, т. е.

$$\left[ \left(2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right) + \frac{\left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right)^2}{2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}} \right] > 0. \quad (3.41)$$

Учитывая, что первый сомножитель выражения (3.40) отрицательный, то в целом выражение (3.40) меньше нуля т. е.

$$-\cos\alpha \left[ \left(2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}f\right) + \frac{\left(2r\sin\beta - 2rf\cos\beta - \frac{gt^2}{2}\right)^2}{2r\cos\beta + 2rfsin\beta - \frac{gt^2}{2}} \right] < 0. \quad (3.42)$$

Следовательно, мы имеем наибольшее значение угла  $\alpha$ , которое определяется из зависимости [109]:

$$\alpha_{\text{наиб}} = \arctg \frac{2rf - 2r\sin\beta + \frac{gt^2}{2}}{2r\cos\beta + 2rf\sin\beta - \frac{gt^2}{2}f}. \quad (3.43)$$

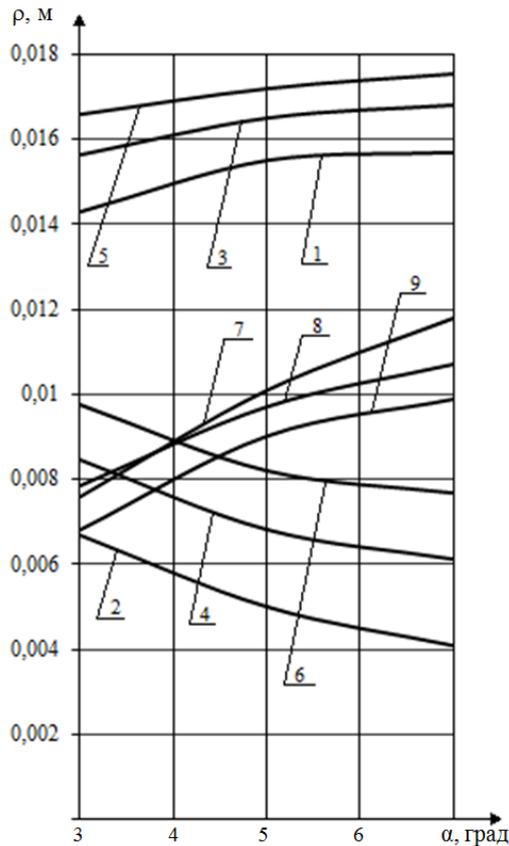


Рис. 3.15. Зависимости перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала при разных частотах его вращения, от угла наклона рабочего органа 1, 2 и 7 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\alpha)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\alpha)$  и  $\rho = f(\alpha)$ , при  $\omega_1 = 45\text{с}^{-1}$  3, 4 и 8 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\alpha)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\alpha)$  и  $\rho = f(\alpha)$ , при  $\omega_2 = 50\text{с}^{-1}$  5, 6 и 9 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\alpha)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\alpha)$  и  $\rho = f(\alpha)$ , при  $\omega_3 = 55\text{с}^{-1}$

$= 7^\circ$ ). Таким образом мы видим совпадение расчетного значения наибольшего угла наклона рабочего органа и значения полученного графическим путем, т. е. путем построения графика зависимости  $\rho_{\text{вн}} = f(\alpha)$ .

Рассмотрим теперь движение соломины вверх. Это движение описывается уравнением

$$\rho_{\text{вв}} = 2rcos\alpha \cdot cos\beta - 2rsina \cdot sin\beta - 2rfsina \cdot cos\beta - 2rffcosa \cdot sin\beta - \frac{gt^2}{2}sina - \frac{gt^2}{2}fcosa. \quad (3.44)$$

Для исследования движения соломины вверх используем аналогичную ме-

После подстановки в выражение (3.43) значений  $r$ ,  $f$ ,  $\beta$  и  $t$  получаем, что  $\alpha_{\text{наиб}} = 7^\circ$ .

Геометрической интерпретацией результатов полученных аналитически является график зависимости перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала от угла наклона рабочего органа (рис. 3.15) [109].

Движение соломины вниз показано кривыми 1, 3 и 5, каждая из кривых отражает движение соломины вниз при различных частотах, так кривая 1 описывает движение соломины вниз, при частоте вращения эксцентрикового вала равной  $45\text{с}^{-1}$ , кривая 3 при частоте  $50\text{с}^{-1}$ , и соответственно кривая 5 при частоте  $55\text{с}^{-1}$ . Как видно из графика эти кривые монотонно возрастающие от своего наименьшего значения значения перемещения (при  $\alpha = 3^\circ$ ) до наибольшего (при  $\alpha$

тодику. Возьмем первую производную от выражения (3.44) по углу наклона рачевого органа, т. е.  $\frac{d\rho_{\text{BB}}}{d\alpha}$ .

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{\text{BB}}}{d\alpha} = & -2r\cos\beta \cdot \sin\alpha - 2r\sin\beta \cdot \cos\alpha - 2rf\cos\beta \cdot \cos\alpha + \\ & + 2rfsin\beta \cdot \sin\alpha - \frac{gt^2}{2} \cos\alpha + \frac{gt^2}{2} f \sin\alpha. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Приравняем полученное выражение нулю, т. е.  $\frac{d\rho}{d\alpha} = 0$ .

$$\begin{aligned} & \left( -2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f \right) \sin\alpha - \\ & - \left( 2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2} \right) \cos\alpha = 0. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Выполняя преобразования уравнения (3.46) аналогичные проведенным ранее находим  $tg\alpha$ .

$$tg \alpha = \frac{2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2}}{-2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f}. \quad (3.47)$$

Находим вторую производную функции  $\rho_{\text{BB}} = f(\alpha)$ , т. е.  $\frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\alpha^2}$ .

$$\begin{aligned} \frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\alpha^2} = & -2r\cos\beta \cdot \cos\alpha + 2r\sin\beta \cdot \sin\alpha + 2rf\cos\beta \cdot \sin\alpha + \\ & + 2r\sin\beta \cdot \cos\alpha + \frac{gt^2}{2} \sin\alpha + \frac{gt^2}{2} f \cdot \cos\alpha = \\ = & \left( -2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f \right) \cos\alpha + \left( 2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2} \right) \sin\alpha = \\ = & \cos\alpha \left[ \left( -2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f \right) + \left( 2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2} \right) \cdot tg\alpha \right] \end{aligned} \quad (3.48)$$

В уравнение (3.48) подставим значение  $tg\alpha$  т. е. выражение (3.47):

$$\frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\alpha^2} = \cos\alpha \left[ \left( -2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f \right) + \frac{\left( 2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2} \right)^2}{-2r\cos\beta + 2rfsin\beta + \frac{gt^2}{2} f} \right]. \quad (3.49)$$

В зависимости от знака выражения (3.49) функция  $\rho_{\text{BB}} = f(\alpha)$  будет иметь наибольшее или наименьшее значение. Если  $\frac{d^2\rho}{d\alpha^2} < 0$ , то функция  $\rho_{\text{BB}} = f(\alpha)$  имеет наибольшее значение, а если  $\frac{d^2\rho}{d\alpha^2} > 0$ , то эта функция будет иметь наименьшее значение. Как мы видим выражение (3.49) представляет собой произ-

ведение первый множитель равен  $\cos\alpha$  будет положительным, т. к.  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ , а второй множитель необходимо определить, для чего подставим значение  $\beta$ ,  $r$  и  $t$  (для всех трех частот вращения эксцентрикового вала). В результате получается, что

$$\left[ \left( -2r\cos\beta + 2rf\sin\beta + \frac{gt^2}{2}f \right) \cos\alpha + \frac{\left( 2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2} \right)^2}{-2r\cos\beta + 2rf\sin\beta + \frac{gt^2}{2}f} \right] > 0 \quad (3.50)$$

Угол  $\alpha$  соответствующий наименьшему значению функции  $\rho_{\text{ВВ}} = f(\alpha)$  найдем из соотношения [109]:

$$\alpha_{\text{наим}} = \arctg \frac{2r\sin\beta + 2rf\cos\beta + \frac{gt^2}{2}}{-2r\cos\beta + 2rf\sin\beta + \frac{gt^2}{2}f}. \quad (3.51)$$

С целью графической интерпретации полученных результатов построим графики зависимости  $\rho_{\text{ВВ}} = f(\alpha)$  для всех исследуемых частот вращения эксцентрикового вала ( $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$ ).

Приведенные на рис. 3.15 графики показывают, что наибольшее значение функции  $\rho_{\text{ВВ}}$  наблюдается при угле наклона сепарирующего рабочего органа  $3^\circ$ , в этом случае  $\rho_{\text{ВВ}} = 0,0067 \text{ м}$ , при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$  (кривая 2), при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала до  $50 \text{ с}^{-1}$  (кривая 4) наибольшее значение перемещения соломины равно соответственно  $\rho_{\text{ВВ}} = 0,00845 \text{ м}$  и эта же тенденция наблюдается при частоте вращения эксцентрикового вала равной  $55 \text{ с}^{-1}$  в этом случае перемещение соломины равно  $\rho_{\text{ВВ}} = 0,00975 \text{ м}$  (кривая 6). С увеличением угла наклона рабочего органа уменьшается перемещение соломины, и при угле наклона равным  $7^\circ$  она достигает наименьшего значения на всех исследуемых частотах вращения эксцентрикового вала.

Идентичный результат получен расчетным путем по формуле (3.51). Таким образом, угол наклона сепарирующего рабочего органа  $\alpha = 7^\circ$ , является условием наибольшего значения функции  $\rho_{\text{ВВ}} = f(\alpha)$  и одновременно наименьшего значения функции  $\rho_{\text{ВВ}} = f(\alpha)$  и это дает возможность максимальному полному перемещению соломины за один оборот эксцентрикового вала, при прочих рав-

ных условиях, т. е. при одинаковых значениях угла направленности колебаний и амплитуды колебаний  $r$ .

Рассмотрим полное перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала. Оно определяется из формулы:

$$\rho = 4rfsin\alpha \cdot cos\beta + 4rfcosa \cdot sin\beta + gt^2sin\alpha. \quad (3.52)$$

Используя методику, приведенную в [106], проанализируем функцию (3.52). Для этого вначале возьмем первую производную от полного перемещения соломины  $\rho$  по углу наклона сепарирующего рабочего органа  $\alpha$ , т. е.  $\frac{d\rho}{d\alpha}$ .

$$\frac{d\rho}{d\alpha} = 4rfcos(\alpha + \beta) + gt^2cosa. \quad (3.53)$$

Приравняем выражение (3.53) к нулю, т. е.  $\frac{d\rho}{d\alpha} = 0$ .

$$4rfcos(\alpha + \beta) + gt^2cosa = 0. \quad (3.54)$$

Используя формулы сложения углов [108] запишем выражение (3.53) в виде:

$$4rfcosa \cdot cos\beta - 4rfsin\beta \cdot sina + gt^2cosa = 0. \quad (3.55)$$

Учитывая, что  $cosa \neq 0$  разделим левую и правую части уравнения (3.55) на  $cosa$ , в результате получим:

$$4rfcos\beta - 4rfsin\beta \cdot tg\alpha + gt^2 = 0; \quad (3.56)$$

$$-4rfsin\beta \cdot tg\alpha = -4rfcos\beta - gt^2. \quad (3.57)$$

Умножим левую и правую части выражения (3.57) на -1.

$$4rfsin\beta \cdot tg\alpha = 4rfcos\beta + gt^2. \quad (3.58)$$

Из формулы (3.58) находим  $tg\alpha$ .

$$tg\alpha = \frac{4rfcos\beta + gt^2}{4rfsin\beta}. \quad (3.59)$$

Исходя из выражения (3.59) определяем формулу для расчета угла  $\alpha$  [109].

$$\alpha_{\text{наиб}} = arctg \frac{4rfcos\beta + gt^2}{4rfsin\beta}. \quad (3.60)$$

Покажем, что при этом значении угла  $\alpha$  функция будет иметь наибольшее значение.

$$\frac{d^2\rho}{d\alpha^2} = -4rfsin(\alpha + \beta) - gt^2cosa = -(4rfsina \cdot cos\beta + 4rfcosa \cdot sin\beta +$$

$$\begin{aligned}
+gt^2 \cos\alpha) &= -\cos\alpha(4rf\cos\beta \cdot tg\alpha + 4rfsin\beta + gt^2) = \\
&= -\cos\alpha \left( 4r\cos\beta \cdot \frac{4rf\cos\beta + gt^2}{4rfsin\beta} + 4rfsin\beta + gt^2 \right). \quad (3.61)
\end{aligned}$$

При  $\alpha \in [0; 90^\circ]$ ,  $\beta \in [0; 90^\circ]$ ,  $0 < f < 1$ ,  $t > 0$   $\frac{d^2\rho}{d\alpha^2} < 0$ .

Используя функцию (3.52) построим графики полного перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала при разных частотах его вращения (рис. 3.15) [109]. Кривая 7 показывает изменение полного перемещения соломины при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ , на кривой 8 приведен график полного перемещения соломины при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$  и наконец кривая 9 характеризует изменение перемещения соломины от угла  $\alpha$  при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$ . Как видно из рис. 3.15 кривые 7, 8, 9, возрастают с увеличением угла наклона рабочего сепарирующего органа. Так при  $\alpha = 3^\circ$   $\rho = 0,0076 \text{ м}$  при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$  с увеличением угла наклона до  $7^\circ$  полное перемещение соломины достигает  $0,0118 \text{ м}$ , аналогичный характер протекания графиков (кривые 8 и 9) наблюдается и на других частотах вращения эксцентрикового вала. При частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$  наименьшее значение перемещения наблюдается при  $\alpha = 3^\circ$  и с увеличением угла  $\alpha$  оно растет до  $0,0107 \text{ м}$ , такая же картина наблюдается и при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$  перемещение соломины растет с увеличением  $\alpha$  от  $\rho = 0,00682 \text{ м}$  до  $0,00987 \text{ м}$ . Следует отметить о двух закономерностях, первая для всех трех частот наибольшее значение перемещения наблюдается при одном и том же  $\alpha = 7^\circ$  и вторая – при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала значение перемещения уменьшается, от  $\rho = 0,0118 \text{ м}$  при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$  до  $\rho = 0,00987 \text{ м}$  при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$ .

### 3.6. Теоретическое обоснование угла направленности колебаний

Исследование влияния угла  $\beta$  на процесс перемещения соломины и выбор рационального его значения выполним двумя методами – аналитическим и графическим. Аналитический метод заключается в исследовании условий при которых функция принимает наибольшее или наименьшее значение, по методике изложенной в [106, 107].

В основе графического метода лежит построение графиков зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(\beta)$  и  $\rho = f(\beta)$ , и их анализ.

Аналитическое исследование начнем с рассмотрения движения соломины вниз, которое осуществляется согласно уравнению (3.26). Движение соломины вниз происходит при повороте эксцентрикового вала на угол равный  $\pi$  радиан, т. е.  $\Theta = \omega t = \pi$ , подставляя этот угол в уравнение (3.26) и в результате получаем уравнение (3.32), которое преобразовываем с использованием формул сложения углов и в конечном виде для анализа мы имеем уравнение (3.34).

Возьмем первую производную  $\frac{d\rho_{\text{вн}}}{d\beta}$ , при условии, что  $\alpha$ ,  $r$  и  $t$ , входящие в уравнение (3.34) являются постоянными

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{\text{вн}}}{d\beta} = & -2r\cos\beta \cdot \sin\beta - 2rs\sin\alpha \cdot \cos\beta - 2rfs\sin\alpha \cdot \sin\beta + \\ & + 2rf\cos\alpha \cdot \cos\beta. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Приравняем к нулю выражение (3.62),  $\frac{d\rho_{\text{вн}}}{d\beta} = 0$

$$-2r\cos\beta \cdot \sin\beta - 2rs\sin\alpha \cdot \cos\beta - 2rfs\sin\alpha \cdot \sin\beta + 2rf\cos\alpha \cdot \cos\beta = 0. \quad (3.63)$$

Сгруппируем все слагаемые уравнения (3.63) и вынесем  $-2r$  за скобки.

$$-2r(\cos\alpha \cdot \sin\beta + s\sin\alpha \cdot \cos\beta + fs\sin\alpha \cdot \sin\beta - f\cos\alpha \cdot \cos\beta) = 0. \quad (3.64)$$

Разделим левую и правую части уравнения (3.64) на  $-2r$ .

$$\cos\alpha \cdot \cos\beta + s\sin\alpha \cdot \cos\beta + fs\sin\alpha \cdot \sin\beta - f\cos\alpha \cdot \cos\beta = 0. \quad (3.65)$$

или

$$(\cos\alpha + fs\sin\alpha) \cdot \sin\beta - (f\cos\alpha - s\sin\alpha) \cdot \cos\beta = 0. \quad (3.66)$$

Перенесем второе слагаемое выражения (3.66) в правую часть:

$$(\cos\alpha + fs\sin\alpha) \cdot \sin\beta = (f\cos\alpha - s\sin\alpha) \cdot \cos\beta. \quad (3.67)$$

Разделим левую и правую части равенства (3.67) на  $(\cos\alpha + fs\sin\alpha)$ .

$$\sin\beta = \frac{f\cos\alpha - s\sin\alpha}{\cos\alpha + fs\sin\alpha} \cos\beta \quad (3.68)$$

Так как  $\cos\beta \neq 0$ , разделим левую и правую части выражения (3.68) на  $\cos\beta$ .

$$\text{tg}\beta = \frac{f\cos\alpha - s\sin\alpha}{\cos\alpha + fs\sin\alpha} \quad (3.69)$$

Находим вторую производную  $\frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta}$ .

$$\begin{aligned} \frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta^2} &= -2rcos\alpha \cdot cos\beta + 2rsina \cdot sin\beta - 2rfsina \cdot cos\beta - 2rfcosa \cdot sin\beta = \\ &= -2rcos\beta [cosa + fsina + (fcosa - sina) \cdot tg\beta] \end{aligned} \quad (3.70)$$

Подставляем выражение (3.69) в равенство (3.70)

$$\frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta^2} = -2rcos\beta \left[ cosa + fsina + \frac{(fcosa - sina)^2}{cosa + fsina} \right] \quad (3.71)$$

Проанализируем выражение (3.71). Оно состоит из двух множителей, первый множитель  $-2rcos\beta$ , явно меньше нуля т. к.  $0 < \beta < \frac{\pi}{2}$ , т. е.  $-2rcos\beta < 0$ .

От знака второго сомножителя зависит будет ли  $\frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta^2} < 0$  или  $\frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta^2} > 0$ .

Его анализ указывает на то, что второй сомножитель положительный т. е.

$$\left[ cosa + fsina + \frac{(fcosa - sina)^2}{cosa + fsina} \right] > 0. \quad (3.72)$$

Это обстоятельство имеет достаточно простое доказательство, т. к. все слагаемые входящие в неравенство (3.72) положительны, а числитель дроби  $\frac{(fcosa - sina)^2}{cosa + fsina}$  берется в квадрате, так что он также в любом случае положительный. Если из двух сомножителей один положительный, а второй отрицательный то в целом их произведение отрицательное т. е.

$$-2rcos\beta \left[ cosa + fsina + \frac{(fcosa - sina)^2}{cosa + fsina} \right] < 0. \quad (3.73)$$

Таким образом, поскольку вторая производная от перемещения вниз соломины  $\rho_{\text{ВН}}$  по углу  $\beta$  отрицательна, т. е.  $\frac{d^2\rho_{\text{ВН}}}{d\beta^2} < 0$ , то функция  $\rho_{\text{ВН}}$  имеет наибольшее значение, которое определяется из выражения (3.74).

$$\beta_{\text{наиб}} = \arctg \frac{fcosa - sina}{cosa + fsina} \quad (3.74)$$

Подставим в уравнение (3.74) значение коэффициента трения  $f$  и рационального значения угла наклона рабочего органа получаем, что наибольшее значение функции  $\rho_{\text{ВН}} = f(\beta)$  будет при  $\beta = 14^\circ$ .

Рассмотрим теперь движение соломины вверх, и выявим влияние угла  $\beta$  на поведение функции  $\rho_{\text{ВН}} = f(\beta)$ . Исследование функции проведен по методике,

аналогичной той, что была приведена выше. Как уже отмечалось движение вверх описывается уравнением:

$$\rho_{\text{BB}} = 2rcos\alpha \cdot cos\beta - 2rsin\alpha \cdot sin\beta - 2rfsin\alpha \cdot cos\beta - 2rfcos\alpha \cdot sin\beta - \\ - \frac{gt^2}{2} sin\alpha - \frac{gt^2}{2} fcos\alpha.$$

Если считать параметры  $r$ ,  $\alpha$ ,  $t$ , которые входят в уравнение постоянными то

$$\frac{d\rho_{\text{BB}}}{d\beta} = -2rcos\alpha \cdot sin\beta - 2rsin\alpha \cdot cos\beta + 2rfsin\alpha \cdot sin\beta - \\ - 2rfcos\alpha \cdot cos\beta. \quad (3.75)$$

Приравняем выражение (3.75) нулю, т. е.  $\frac{d\rho_{\text{BB}}}{d\beta} = 0$ .

$$-2r(cos\alpha \cdot sin\beta + sin\alpha \cdot cos\beta - fsin\alpha \cdot sin\beta + fcos\alpha \cdot cos\beta) = 0 \quad (3.76)$$

Преобразуем выражение (3.76) методом описанным ранее и найдем  $tg\beta$ .

$$(cos\alpha - fsin\alpha) \cdot sin\beta + (sin\alpha + fcos\alpha) \cdot cos\beta = 0 \\ tg\beta = \frac{sin\alpha + fcos\alpha}{fsin\alpha - cos\alpha} \quad (3.77)$$

Продифференцируем второй раз функцию  $\rho_{\text{BB}} = f(\beta)$  по углу  $\beta$ , т. е. найдем  $\frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\beta^2}$ .

$$\frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\beta^2} = -2rcos\alpha \cdot cos\beta + 2rsin\alpha \cdot sin\beta + 2rfsin\alpha \cdot cos\beta + 2rfcos\alpha \cdot sin\beta = \\ = 2rcos\beta[(sin\alpha + fcos\alpha) \cdot tg\beta + (fsin\alpha - cos\alpha)] \quad (3.78)$$

После подстановки  $tg\beta$  (уравнение (3.77)) в выражение (3.78) получим

$$\frac{d^2\rho_{\text{BB}}}{d\beta^2} = 2rcos\beta \left[ \frac{(sin\alpha + fcos\alpha)^2}{fsin\alpha - cos\alpha} + fsin\alpha - cos\alpha \right]. \quad (3.79)$$

Проанализируем выражение (3.79). Это выражение имеет два сомножителя. Первый сомножитель  $2rcos\beta$ , явно положительный, т. к.  $r > 0$  и  $0 < \beta < 90$  а вот второй сомножитель отрицательный, т. е.

$$\left[ \frac{(sin\alpha + fcos\alpha)^2}{fsin\alpha - cos\alpha} + fsin\alpha - cos\alpha \right] < 0.$$

Следовательно равенство (3.79) меньше нуля

$$2rcos\beta \left[ \frac{(sin\alpha + fcos\alpha)^2}{fsin\alpha - cos\alpha} + fsin\alpha - cos\alpha \right] < 0. \quad (3.80)$$

Таким образом поскольку вторая производная от перемещения соломины

$\rho_{\text{вв}} = f(\beta)$  по углу  $\beta$  отрицательна, то функция  $\rho_{\text{вв}} = f(\beta)$  имеет наибольшее значение при

$$\beta = \text{arctg} \left| \frac{\sin\alpha + f\cos\alpha}{f\sin\alpha - \cos\alpha} \right|. \quad (3.81)$$

Проанализируем полное перемещение соломины. Полное перемещение соломины происходит согласно уравнению (3.52).

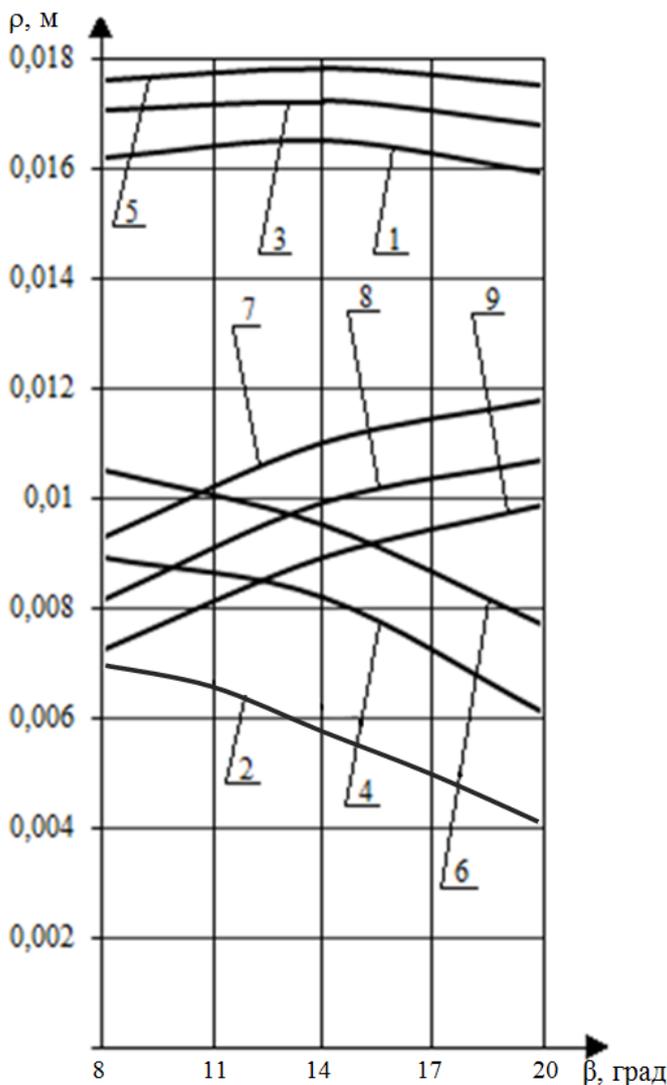


Рис. 3.16. Зависимости перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала, при разных частотах его вращения, от угла направленности колебаний,  $\beta$   
 1, 2 и 7 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\beta)$  и  $\rho = f(\beta)$  при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ ;  
 3, 4 и 8 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\beta)$  и  $\rho = f(\beta)$  при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$ ;  
 5, 6 и 9 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\beta)$  и  $\rho = f(\beta)$  при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$

различных частотах вращения эксцентрикового вала, на кривой 1 (рис. 3.16)

Возьмем первую производную

$$\frac{d\rho}{d\beta}.$$

$$\frac{d\rho}{d\beta} = 4rf\cos(\alpha + \beta) \quad (3.82)$$

Продифференцируем функцию  $\rho = f(\beta)$  второй раз, то определим  $\frac{d^2\rho}{d\beta^2}$ .

$$\frac{d^2\rho}{d\beta^2} = -4rfsin(\alpha + \beta) \quad (3.83)$$

т. к.

$$\sin(\alpha + \beta) > 0 \rightarrow -4rfsin(\alpha + \beta) < 0$$

Следовательно, функция имеет наибольшее значение, угол  $\beta$  соответствующей наибольшему значению определяется по аналогичной методике.

Выполним второй этап исследований влияния угла  $\beta$  на функции  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ ,  $\rho_{\text{вс}} = f(\beta)$  и  $\rho = f(\beta)$ , построим графики этих функций и проанализируем их поведение.

Рассмотрим графики движения соломины вниз  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$ , при

приведен график зависимости  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$  при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ .

Как видно из графика значение перемещения вначале возрастает от 0,0161 м до 0,0164 м, а затем начинает убывать до 0,0159 м.

Наибольшего значения функция  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$  достигает при  $\beta = 14^\circ$ , а при  $\beta = 20^\circ$  функция имеет наименьшее значение перемещения. Такая же закономерность сохраняется при всех частотах вращения эксцентрикового вала. Поведение кривых 3 и 5 (рис. 3.16) абсолютно аналогичное поведению кривой 1.

Кривая 3 является графиком функции  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$  при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$ , а кривая 5 – график функции  $\rho_{\text{вн}} = f(\beta)$  при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$ . Эти кривые достигают наибольшего значения при  $\beta = 14^\circ$ , а наименьшего значения при  $\beta = 20^\circ$ . Как видно из графиков с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала перемещение соломины возрастает.

Движение соломины вверх представлено кривыми 2, 4, 6 (рис. 3.16). Кривая 2 характеризует движение соломины при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ , кривая 4 – при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$ , а кривая 6 – при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$ .

Протекание этих кривых идентично, они монотонно убывают. При движении соломины вверх нас в первую очередь интересует наименьшее значение перемещения. Наименьшее значение функция  $\rho_{\text{вв}} = f(\beta)$  достигает при  $\beta = 20^\circ$ . При этом наблюдается следующая закономерность – с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала увеличивается численное значение наименьшего перемещения. Так при частоте вращения  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$   $\rho_{\text{вв}} = 0,0041 \text{ м}$ , при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$   $\rho_{\text{вв}} = 0,0061 \text{ м}$ , а при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$   $\rho_{\text{вв}} = 0,00767 \text{ м}$ .

Графики функции  $\rho = f(\beta)$  характеризующей полное перемещение соломины приведены на кривых 7, 8, 9 (рис. 3.16). Эти кривые монотонно возрастающие, они достигают наибольшего значения при  $\beta = 20^\circ$ . При частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$  полное перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала равно  $\rho = 0,0118 \text{ м}$ , при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$   $\rho = 0,0107 \text{ м}$  и наконец, при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$   $\rho = 0,00987 \text{ м}$ , т. е. с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала идет уменьшение перемещения.

Исходя из вышеизложенного наиболее благоприятный, с позиций предварительной сегрегации, режим работы сепарирующего рабочего органа заключается в следующем – угол направленности колебаний  $\beta = 20^\circ$ , частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega = 45 \text{ с}^{-1}$ .

### 3.7. Теоретическое обоснование амплитуды и частоты колебаний сепарирующего рабочего органа

Рассмотрим влияние амплитуды колебаний на процесс перемещения соломины. Как уже отмечалось перемещение соломины вниз описывается уравнением

$$\rho_{\text{вн}} = 2r[\cos(\alpha + \beta) + f\sin(\alpha + \beta)] + \frac{gt^2}{2}(\sin\alpha - f\cos\alpha). \quad (3.84)$$

Продифференцируем это выражение по амплитуде  $r$ , при условии, что  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $t$  постоянные, в результате получим

$$\frac{d\rho_{\text{вн}}}{dr} = 2 \cdot [\cos(\alpha + \beta) + f\sin(\alpha + \beta)] = \text{const}. \quad (3.85)$$

В таком случае функция монотонно возрастает. Ее наименьшее значение будет в начальной точке исследуемого диапазона, а наибольшее значение в конечной точке диапазона.

Рассмотрим движение соломины вверх, т.е. зависимость  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$ . Движение соломины вверх описывается уравнением

$$\rho_{\text{вв}} = 2r[\cos(\alpha + \beta) - f\sin(\alpha + \beta)] - \frac{gt^2}{2}(\sin\alpha + f\cos\alpha).$$

Возьмем первую производную от данного уравнения по амплитуде  $r$ .

$$\frac{d\rho}{dr} = 2[\cos(\alpha + \beta) - f\sin(\alpha + \beta)] = \text{const} \quad (3.86)$$

В данном случае функция также монотонно возрастает. Наименьшее значение этой функции в начале участка слева, а наибольшее значение в крайней правой точке.

Полное перемещение соломины осуществляется согласно уравнения

$$\rho = 4rfsin(\alpha + \beta) + gt^2sin\alpha.$$

Если учесть, что в нашем случае  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $t$  постоянные, то первая производная от перемещения по амплитуде колебаний, т. е.  $\frac{d\rho}{dr} = \text{const}$ .

$$\frac{d\rho}{dr} = 4f \sin(\alpha + \beta) = \text{const}$$

При полном перемещении, так же, как и в предыдущих двух случаях, т. е. при движении соломины вниз и при движении соломины вверх функция  $\rho = f(r)$  будет монотонно возрастающей, с наименьшим значением в начале исследуемого интервала и наибольшим значением в конце интервала.

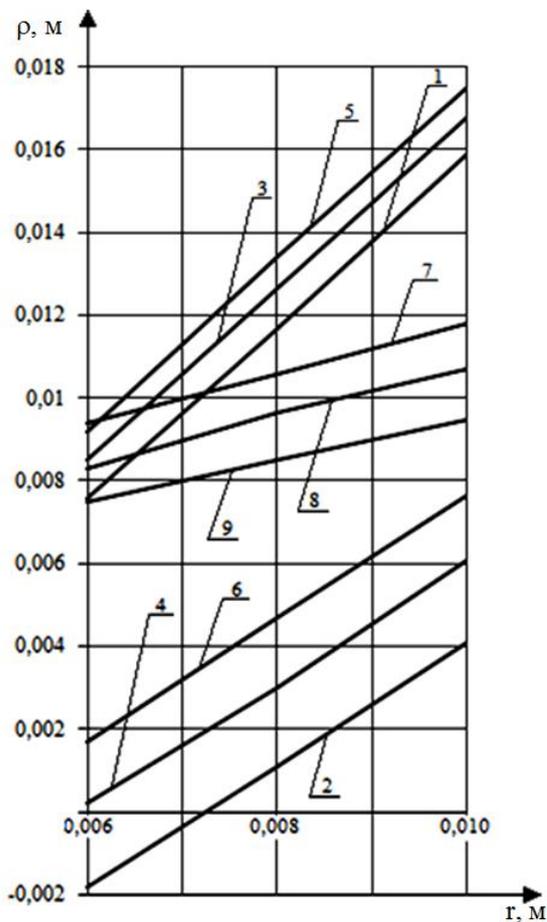


Рис. 3.17. Зависимости перемещения соломины от амплитуды колебаний за один оборот эксцентрикового вала, при разных частотах вращения  
 1, 2 и 7 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(r)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$  и  $\rho = f(r)$  при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ ; 3, 4 и 8 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(r)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$  и  $\rho = f(r)$  при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$ ;  
 5, 6 и 9 – графики зависимостей  $\rho_{\text{вн}} = f(r)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$  и  $\rho = f(r)$  при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$

Геометрической интерпретацией сделанных выводов являются графики функций  $\rho_{\text{вн}} = f(r)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$  и  $\rho = f(r)$ .

На рис. 3.17 приведены графики зависимости перемещения соломины от амплитуды колебаний за один оборот эксцентрикового вала  $\rho_{\text{вн}} = f(r)$ ,  $\rho_{\text{вв}} = f(r)$  и  $\rho = f(r)$  при различных частотах его вращения.

Рассмотрим движение соломины вниз. Графики представляют собой отрезки прямых, т. е. имеют место линейные зависимости. Наименьшие значения перемещения наблюдаются при амплитуде  $r = 0,006 \text{ м}$ , во всем частотном диапазоне.

Так при частоте вращения эксцентрикового вала  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$  (график 1)  $\rho_{\text{вн}} = 0,0076 \text{ м}$ , при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$  (график 3)  $\rho_{\text{вн}} = 0,0085 \text{ м}$  и наконец при  $\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$  (график 5)  $\rho_{\text{вн}} = 0,0092 \text{ м}$ . Как видно из характера протекания графиков с увеличением амплитуды колебаний сепарирующего рабочего органа перемещение вниз возрастает и достигает наибольшего значения при амплитуде колебаний  $r = 0,01 \text{ м}$ . Наибольшее значение перемещения вниз наблюдается при частоте вращения эксцентрикового вала

при частоте вращения эксцентрикового вала

$\omega_3 = 55 \text{ с}^{-1}$  (график 5)  $\rho_{\text{вн}} = 0,01754 \text{ м}$ , с уменьшением частоты вращения эксцентрикового вала перемещение соломины вниз убывает. Так при  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$  (кривая 3) перемещение вниз равно  $\rho_{\text{вн}} = 0,0168 \text{ м}$ , а при  $\omega_1 = 45 \text{ с}^{-1}$ ,  $\rho_{\text{вн}} = 0,0159 \text{ м}$ .

При движении соломины вверх наблюдается такое явление, когда перемещение вверх имеет отрицательный знак, это говорит о том, что соломина движется не вверх, а вниз (рис. 3.17, график 2). Этот факт объясняется тем, что сила инерции меньше суммы силы трения и касательной составляющей силы тяжести. Поэтому соломина не может преодолеть суммарного воздействия этих сил, т. к. их вектора направлены вниз. Однако при увеличении частоты вращения эксцентрикового вала соломина начинает двигаться вверх, т. к. увеличивается

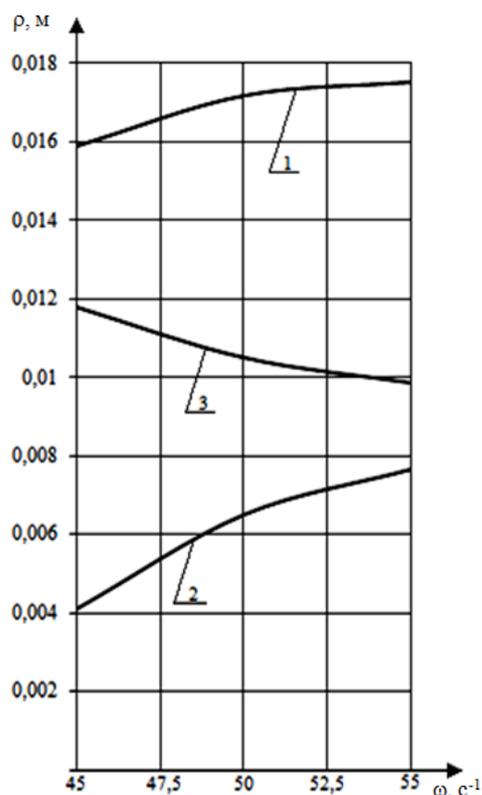


Рис. 3.18. Зависимости перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала от частоты колебаний рабочего органа 1 – график перемещения соломины при ее движении вниз; 2 – график перемещения соломины при ее движении вверх; 3 – график полного перемещения соломины за один оборот эксцентрикового вала от частоты колебаний (рис. 3.18).

сила инерции, которая зависит от частоты в квадрате, т. е.  $P = m\omega^2 r \cos(\omega t)$ .

Наименьшее перемещение соломины наблюдается при амплитуде колебаний  $r = 0,006 \text{ м}$ . С увеличением амплитуды колебаний увеличивается перемещение соломины вверх, эта тенденция наблюдается при всех частотах.

Полное перемещение соломины имеет также линейную зависимость и с увеличением амплитуды имеет тенденцию к увеличению.

Рассмотрим влияние частоты колебаний сепарирующего рабочего органа. В качестве критерия эффективного режима колебаний выберем максимальное перемещение соломины за один оборот эксцентрикового вала.

Построим графики зависимостей перемещения соломины за один оборот эксцентрикового

График зависимости движения соломины вниз от частоты колебаний сепарирующего рабочего органа  $\rho_{\text{вн}} = f(\omega)$  приведен на рис. 3.18 (кривая 1).

Как видно из характера протекания графика функция  $\rho_{\text{вн}} = f(\omega)$  монотонно возрастающая от наименьшего ее значения. Наименьшее значение функции  $\rho_{\text{вн}} = f(\omega)$  наблюдается при  $\omega = 45 \text{ с}^{-1}$ , затем с ростом частоты колебаний рабочего органа увеличивается перемещение соломины. Наибольшее значение перемещения вниз будет при  $\omega = 55 \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, увеличение частоты колебаний рабочего органа ведет к увеличению перемещения соломины вниз. Для просеивания зерновки это положительная тенденция, т. к. чем больше расстояние между соломинами, тем вероятность прохождения зерновки из верхних слоев вороха вниз будет выше.

Рассмотрим теперь движение соломины вверх. График  $\rho_{\text{вв}} = f(\omega)$  приведен на рис. 3.18 (кривая 2). Протекание этого графика аналогичное графику функции  $\rho_{\text{вн}} = f(\omega)$  (кривая 1). Также наименьшее значение функции находится при частоте колебаний сепарирующего рабочего органа  $\omega = 45 \text{ с}^{-1}$ , а наибольшее значение функции  $\rho_{\text{вв}} = f(\omega)$  соответствует частоте  $\omega = 55 \text{ с}^{-1}$ . Функция  $\rho_{\text{вв}} = f(\omega)$  монотонно возрастающая. Увеличение перемещения соломины вверх явление нежелательное, т. к. при этом уменьшается полное перемещение соломины.

График функции полного перемещения соломины показывает, что с увеличением частоты колебаний уменьшается перемещение соломины. Наибольшее значение перемещения находится на отметке  $\omega = 45 \text{ с}^{-1}$ , а наименьшее значение при  $\omega = 55 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, наиболее приемлемым режимом работы сепарирующего рабочего органа является работа с частотой колебаний равной  $45 \text{ с}^{-1}$ .

#### Выводы по третьему разделу

1. Построена математическая модель просеивания зерна через слой очесанного вороха, которая устанавливает зависимость между вероятностью прохождения зерновки сквозь слои вороха и расстоянием между соломинами с

учетом взаимного расположения соломин и отношением размеров зерновки к расстоянию между соломинами, позволяющая установить, что:

– в случае, когда расстояние между соломинами больше длины зерновки и диаметра соломины, вероятность просеивания зерновки составляет 0,875 при условии, что расстояние между соломинами равно 10 мм;

– если расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и длины зерновки и одновременно больше суммы диаметра соломины и ширины зерновки, то вероятность прохождения зерновки через соломины находится в пределах 0,85...0,877 при расстоянии между соломинами 6,0...8,05 мм;

– при условии, что расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и ширины зерновки вероятность просеивания как при горизонтальном расположении зерновки, так и при вертикальном равна нулю.

2. Разработана методика покомпонентной процедуры анализа функционирования сепарирующего рабочего органа, которая дала возможность теоретически обосновать рациональные значения параметров и режимов его работы, а именно:

– угол наклона сепарирующего рабочего органа  $\alpha = 7^\circ$ ;

– угол направленности колебаний  $\beta = 20^\circ$ ;

– амплитуда колебаний  $r = 0,01$  м;

– частота колебаний  $\omega = 45\text{с}^{-1}$ .

## РАЗДЕЛ IV

### ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 4.1. Программа экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований являлась проверка теоретических исследований и экспериментальное обоснование основных параметров и кинематических режимов экспериментального рабочего органа для сепарации очесанного вороха пшеницы.

Программой и задачами экспериментальных исследований предусматривалось проведение лабораторных исследований технологического процесса сепарации очесанного вороха пшеницы разработанным рабочим органом, а также проверка в производственных условиях функционирования данного рабочего органа установленного на серийный ворохоочиститель. В программу экспериментальных исследований были включены следующие вопросы:

- построение математической модели технологического процесса сепарации свободного зерна экспериментальным рабочим органом;
- определение оптимальных значений параметров и режимов работы экспериментального рабочего органа;
- установление влияния конструктивных, технологических и кинематических параметров рабочего органа на качественные показатели его работы;
- проведение исследований в производственных условиях и определение статистических характеристик количественных и качественных показателей работы серийно-выпускаемого ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами на обработке очесанного вороха зерновых.

#### 4.2. Методика экспериментальных исследований

##### 4.2.1. Описание лабораторной установки приборов и оборудования для проведения экспериментальных исследований

Лабораторные исследования проводились на экспериментальной уста-



стью 0,9 кВт через клиноременную передачу 8, эксцентриковый вал 3 и шатун 4. Частота вращения электродвигателя регулируется с помощью автотрансформатора (ЛАТРА). Пульт управления, закрепленный в передней части рамы, позволяет осуществить управление работой лабораторной установки. На панели пульта выведены кнопки «пуск» и «стоп» для включения электродвигателя



а



б



в

Рис. 4.2. Решета с круглыми отверстиями а.  $d = 15$  мм, б.  $d = 25$  мм, в.  $d = 35$  мм

привода решетного стана и рукоятка ЛАТРА для регулирования частоты колебаний решетного стана. Остальные аппараты электрической схемы экспериментальной лабораторной установки расположены в отдельном ящике, закрепленном в нижней части рамы 5.

В верхней части решетного стана установлен рабочий орган, который состоит из двух жестко соединенных частей. Первая часть рабочего органа – сегрегатор 14, представляет собой гладкую поверхность, а вторая часть – решето 15 с круглыми отверстиями (рис. 4.1, в).

Для проведения полнофакторного эксперимента были изготовлены три решета с различными диаметрами отверстий. Первое решето с отверстиями  $\varnothing 15$  мм, второе с отверстиями  $\varnothing 25$  мм и третье с  $\varnothing 35$  мм (рис. 4.2).

Для вывода фракций материала предусмотрены два наклонных лотка. Для вывода проходовой фракции наклонный лоток 16, а для сходовой фракции наклонный лоток 17 (рис. 4.1, а).

Сбор фракций осуществляется с помощью пробоотборников 18 и 19. Проходовая фракция собиралась в пробоотборнике 18, а сходовая – в

пробоотборнике 19.

Технологический процесс лабораторной установки осуществлялся следующим образом. Искусственно приготовленная смесь включающая в себя свободного зерна 55%, оборванных колосков 5%, солоmistых частиц 35% (методика приготовления исходного материала приведена в [27]) загружалась на транспортер 2. Откуда она поступала на сегрегатор 14, который вместе с решетным станом совершает колебательное движение. За счет колебаний солоmistые частицы перемещаясь образовали пустоты через которые просеивалось зерно вниз и собиралось в нижней части зерносолоmistого слоя. Сегрегированный слой поступал на решето 15, где разделялся на две фракции. Крупные солоmistые примеси и оборванные колоски шли сходом с решета и по наклонному лотку 17 попадали в пробоотборник 19. Зерно проходило через отверстия решета и по наклонному лотку 16 попадало в пробоотборник 18 (рис. 4.1, а).

Таким образом, в результате работы установки исходный материал делился на две фракции сходовую (рис. 4.3) и проходную (рис. 4.4).



Рис. 4.3. Сходовая фракция



Рис. 4.4. Проходная фракция

Экспериментальные исследования проводились с помощью приборов и оборудования, перечень которого приведен в таблице П.25 (Приложение 3).

#### 4.2.2. Критерии оценки эффективности процесса сепарации очесанного вороха

Теория сепарирования зерновых смесей предлагает оценивать работу зерноочистительных машин с помощью показателя, характеризующего отношение массы прохода ко всей массе мелких зерен в зерновом материале, поступившим на решето за то же время. Данный показатель носит название полнота разделе-

ния и определяется по формуле [64].

$$E = \frac{\Phi}{U}, \quad (4.1)$$

где  $\Phi$  – отношение массы прохода через решето к массе зернового материала поступившего на него;

$U$  – относительное содержание мелких зерен в исходном материале.

Однако использовать этот показатель для оценки работы экспериментального рабочего органа для сепарации очесанного вороха, нецелесообразно.

Наиболее приемлемым применительно к поставленной задаче является предложенный в работе [27] коэффициент сепарации, который дает информацию о количестве выделенного свободного зерна. Этот коэффициент численно равен отношению массы зерна в проходе к массе зерна в исходном материале, и определяется по формуле:

$$\mu = \frac{m_{з.п.}}{m_{з.и.}}, \quad (4.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент сепарации;

$m_{з.п.}$  – масса зерна в проходе;

$m_{з.и.}$  – масса зерна в исходном материале.

Коэффициент сепарации указывает на полноту выделения свободного зерна из очесанного вороха, зная его численное значение можно сделать вывод о свободном зерне, которое не выделилось в проход, а ушло сходом вместе с соломистыми примесями и оборванными колосками для дальнейшего обмолота, в целом явление нежелательное, чем выше коэффициент сепарации, тем меньше зерна уходит сходом. Наиболее приемлемым вариантом является приближение численного значения коэффициента сепарации к единице.

В общем этот показатель можно использовать для оценки работы экспериментального рабочего органа, но полной картины его работы этот критерий не дает.

Поэтому предполагается для оценки работы экспериментального рабочего органа использовать еще один показатель – коэффициент эффективности выде-

ления примесей, который определяется по формуле:

$$\nu = 1 - \frac{\xi_n}{\xi_u}, \quad (4.3)$$

где  $\nu$  – коэффициент эффективности выделения примесей;

$\xi_n$  – содержание солоmistых примесей в проходовой фракции, %;

$\xi_u$  – содержание солоmistых примесей в исходном материале, %.

Коэффициент эффективности выделения примесей несет информацию о качественной стороне процесса сепарации, т.е. он характеризует работу экспериментального рабочего органа с позиций выделения крупных примесей, главным образом соломы и оборванных колосков.

Таким образом, используя два критерия оценки эффективности работы экспериментального рабочего органа – коэффициент сепарации и коэффициент эффективности выделения примесей можно с достаточной полнотой достоверности охарактеризовать его функционирование. Исходя из вышеизложенного для оценки полнофакторного эксперимента принимаются две функции отклика. Первая функция отклика – изменение коэффициента сепарации, а вторая – изменение коэффициента эффективности выделения примесей.

#### 4.2.3. Факторы влияющие на функционирование экспериментального рабочего органа

Анализ литературных источников, а также проведенные теоретические исследования дают возможность сделать заключение, что на процесс работы экспериментального рабочего органа влияют следующие факторы:

- удельная подача исходного материала на рабочий орган,  $\text{кг/с} \cdot \text{м}^2$ ;
- частота его колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;
- диаметр отверстий решета, мм;
- угол наклона рабочего органа, град;
- угол направленности колебаний по отношению к горизонтали, град;
- длина рабочего органа, м;

- исходная засоренность подаваемого материала, %;
- амплитуда колебаний, м;
- влажность зерна, %;
- влажность солоmistых частиц.

Безусловно провести исследования используя методы планирования эксперимента с таким количеством факторов влияющих на функционирование рабочего органа крайне сложно. Поэтому возникает необходимость уменьшения числа факторов, не допуская при этом искажения реальной картины его функционирования.

Рассмотрим каждый из приведенных факторов и дадим анализ его влияния на эффективность работы экспериментального рабочего органа.

Первый фактор – удельная подача исходного материала на решето. Вопрос в общем широко изучен и достаточно подробно изложен в литературе [64, 70, 101, 110], однако в приведенных работах рассматривался в качестве исходного материала зерновой ворох, получаемый от комбайна, который по фракционному составу существенным образом отличается от очесанного вороха. Влияние подачи очесанного вороха на плоское решето ранее не рассматривалось. Поэтому возникает необходимость рассматривать воздействие удельной подачи на эффективность функционирования экспериментального рабочего органа.

Второй фактор – частота колебаний рабочего органа. В целом влияние частоты колебаний вопрос изученный, однако применительно к экспериментальному рабочему органу влияние частоты колебаний на наш взгляд представляет определенный интерес. Кроме того влияние частоты колебаний на работу экспериментального рабочий орган рассмотрено в теоретических исследованиях. Изучение влияния частоты колебаний в экспериментальных исследованиях даст возможность сопоставить результаты полученные теоретическим и экспериментальным путем.

Третий фактор – диаметр отверстий решета. При сепарации очесанного вороха имеет место существенный разброс значений размерных характеристик компонентов вороха. Длина солоmistых примесей в несколько раз превышает

длину зерновки [90]. Поэтому диаметр отверстий решета должен быть изучен в достаточной мере с учетом биометрических характеристик компонентов вороха. Учитывая вышеизложенное диаметр отверстий решета также принимается в качестве фактора.

Четвертый фактор – угол наклона рабочего органа. Влияние этого фактора достаточно изучено и приведено в литературе [64, 101]. Кроме того в процессе теоретических исследований определено рациональное значение угла наклона рабочего органа [109]. На экспериментальной установке рабочий орган установлено под углом, который обоснован теоретически. Исходя из этого угол наклона рабочего органа не был включен в программу экспериментальных исследований.

Пятый фактор – угол направленности колебаний по отношению к горизонтали. Данный параметр уже изучен и диапазон его значений уже приведен в литературе [64, 70, 101, 110], а также его влияние на работу решета рассмотрено аналитически, установлено рациональное значение угла направленности колебаний. На экспериментальной установке угол направленности колебаний установлен с учетом результатов теоретических исследований.

Шестой фактор – длина рабочего органа. Влияние этого фактора уже изучено и широко опубликовано [64, 70, 101, 110]. Кроме того в настоящее время решета, выпускаемые промышленностью изготовлены с учетом проведенных многолетних исследований. Поэтому этот фактор не был включен в программу экспериментальных исследований.

Седьмой фактор – исходная засоренность подаваемого материала. Фактор безусловно очень важный и он существенным образом влияет на работу экспериментального. Однако, согласно рекомендаций приведенных в литературе [111-113] нежелательно в качестве факторов при планировании эксперимента использовать величины имеющие случайный характер. Поэтому, для того, чтобы исключить влияние этого фактора при проведении полнофакторного эксперимента использовалась искусственно приготовленная смесь с постоянным составом.

Восьмой фактор – амплитуда колебаний рабочего органа. Влияние амплитуды колебаний на процесс сепарации исследовано теоретически, в результате получено рациональное значение амплитуды колебаний, которое учтено в экспериментальной установке. Данный фактор также не включен в программу экспериментальных исследований.

Девятый фактор – влажность зерна. Фактор безусловно важный, но для условий юга Украины, его значимость теряет свою актуальность, в связи с тем, что при уборке зерно имеет влажность 12,5...14,5%. В хозяйствах не предусмотрено даже сушильное оборудование. Поэтому в работе влияния данного фактора не рассматривалось.

Десятый фактор – влажность солоmistых частиц. Данный фактор не был включен в программу экспериментальных исследований по той же причине, что и седьмой фактор, но поскольку он определенным образом влияет на работу экспериментального рабочего органа, то для выравнивания этого влияния смесь искусственным образом приготавливалась, при этом солоmistые частицы предварительно увлажнялись.

Таким образом, проведенный анализ дает возможность сделать вывод о том, что наиболее существенно влияющими факторами являются удельная подача исходного материала,  $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$ ; частота колебаний рабочего органа,  $\text{с}^{-1}$  и диаметр отверстий решета, мм. Планирование эксперимента проводилось для трех факторов.

#### 4.2.4. Методика проведения полнофакторного эксперимента

Анализ различных планов экспериментов позволил выбрать план наиболее рациональный для решения поставленных задач. Таким планом явился некомпозиционный, рототабельный трехуровневый план Бокса-Бенкина [114].

Анализ факторов (п.п. 4.2.3) позволил выявить наиболее весомые на процесс сепарации факторы, а именно удельную подачу исходного материала на рабочий орган, частоту его колебаний и диаметр отверстий решета.

Для оценки эффективности процесса сепарации свободного зерна были

использованы коэффициент сепарации и коэффициент эффективности выделения примесей. Таким образом выполнялся полнофакторный эксперимент на трех уровнях, для трех факторов, который оценивался двумя функциями отклика.

В общем виде математическая модель имеет вид:

$$y_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (4.4)$$

$$y_2 = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_{12} x_1 x_2 + c_{13} x_1 x_3 + c_{23} x_2 x_3 + c_{11} x_1^2 + c_{22} x_2^2 + c_{33} x_3^2,$$

где  $y_1$  – функция отклика, характеризующая изменение коэффициента сепарации;

$y_2$  – функция отклика, характеризующаяся изменение коэффициента эффективности выделения примесей;

$x_1$  – удельная подача исходного материала на рабочий орган;

$x_2$  – частота колебаний рабочего органа;

$x_3$  – диаметр отверстий решета;

$b_0, b_1, b_2, b_3 \dots$  – коэффициенты регрессии первого уравнения;

$c_0, c_1, c_2, c_3 \dots$  – коэффициенты регрессии второго уравнения.

Используя результаты проведенных теоретических исследования, а также анализ литературных источников были выявлены границы значений факторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Уровни варьирования факторами

| Уровень и интервал варьирования факторами | Факторы  |                                    |                       |
|---|--|------------------------------------|-----------------------|
|   | удельная подача материала, кг/с·м <sup>2</sup> | частота колебаний, с <sup>-1</sup> | диаметр отверстий, мм |
|   | $x_1$  | $x_2$                              | $x_3$                 |
| Верхний уровень (+)                       | 3,3  | 55                                 | 35                    |
| Основной уровень (0)                      | 2,7  | 50                                 | 25                    |
| Нижний уровень (-)                        | 2,1  | 45                                 | 15                    |
| Интервал варьирования                     | 0,6  | 5                                  | 10                    |

Для проведения эксперимента была составлена матрица планирования эксперимента, в которой нижний уровень обозначен знаком (-), верхний – знаком (+), а основной уровень – (0) (Приложение И, табл. П.26).

Расчет коэффициентов регрессии проводился по формулам, которые приведены в [115].

Используя результаты экспериментов и известные формулы приведенные в [115] были определены коэффициенты регрессии. Дальнейшая работа была направлена на проведение статистического анализа полученных результатов, а именно определения значимости коэффициентов регрессии и оценки адекватности модели. Значимость коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента, согласно рекомендаций [112]. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера [115].

Опыты проводились по следующей методике. Искусственно подготовленная смесь (методика ее подготовки приведена в [27]) укладывалась в гравитационный транспортер. Количество смеси соответствовало численному значению удельной подачи (методика расчета необходимого количества смеси приведена в [27]). В соответствии с планом эксперимента производилась установка необходимых кинематических и конструктивных параметров. В нашем случае это установка необходимой частоты колебаний и монтаж решета с диаметром отверстий соответствующим плану эксперимента.

Частота колебаний устанавливалась с помощью автотрансформатора (ЛАТРа), путем регулирования частоты вращения электродвигателя. Контроль частоты вращения электродвигателя осуществлялся тахометром.

После визуальной проверки лабораторная установка включалась. Затем на рабочий орган в течении 3 сек. подавался с помощью гравитационного транспортера исходный материал, который в процессе прохождения по решету делился на две фракции, проходовую и сходовую. Проходоная и сходовая фракция поступали в пробоотборники. После полного окончания каждого опыта, лабораторная установка выключалась. Сходовая и проходовая фракции вороха взвешивались с точностью до 0,001 кг. Затем проходовая фракция (зерно) очи-

щалось на лабораторных плоских решетках от крупных примесей. После этого очищенное зерно снова взвешивалось и крупные солоmistые примеси с оборванными колосками также взвешивались.

Результаты взвешиваний заносились в журнал первичных материалов.

Аналогичная работа проводилась со сходовой фракцией, т.е. вначале она вся взвешивалась, а затем на лабораторных решетках выделялось неотсепарированное зерно и также взвешивалось. Полученные результаты также заносились в журнал первичной информации.

После этого гравитационный транспортер снова загружался, а лабораторная установка перенастраивалась на другой режим и проводился новый опыт.

Все опыты проводились в трехкратной повторности. Используя таблицу случайных чисел опыты были рандомизированы, что обеспечило равномерное внесение элемента случайности влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов на функции отклика. Рандомизация также дает возможность исключить неоднократности дискретного и непрерывного типов.

#### 4.2.5. Методика проведения производственной проверки ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами

Для проведения исследований в полевых условиях был использован серийно-выпускаемый самопередвижной очиститель вороха (рис. 4.5).

Как известно [46] данная машина имеет верхний и нижний решетчатые ста-



Рис. 4.5. Общий вид ворохоочистителя

ны работающие параллельно. Приемная камера разделяет исходный материал на две равные части, каждая из которых поступает на решетчатый стон. В решетчатый стон серийной машины вставлены рамки с решетками  $B_1$ ,  $B_2$ , а также В и Г.

Для проведения производственной проверки вместо заводских решет  $B_1$  и  $B_2$  были вставлены два экспериментальных рабочих

органа. Первое решето выполнено в виде сплошной оцинкованной поверхности без отверстий, а второе решето имеет отверстия диаметром 25 мм (рис. 4.6) [94].



Рис. 4.6. Экспериментальный рабочий орган: 1 – сплошное решето (сегрегатор); 2 – решето с отверстием

С целью обеспечения выполнения технологического процесса верхняя скатная доска была демонтирована. Аналогичные операции были проведены и со вторым решетным станом.

Рабочий процесс ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами протекал следующим образом. Скребковые питатели 1, подавали

очесанный ворох к наклонному транспортеру 2 (рис. 4.7) который загружал



Рис. 4.7. Подача очесанного вороха в наклонный транспортер

приемную камеру. Шнек распределял ворох по ширине приемной камеры, затем питающие валики подавали ворох в воздушные каналы, где воздушный поток удалял мелкие примеси.



Рис. 4.8. Общий вид экспериментальных рабочих органов установленных в ворохоочистителе

Очесанный ворох поступал на сплошное решето 1, выполняющего роль сегрегатора (рис. 4.8). Под воздействием колебаний решета зерновки просеивались через пространства образованные соломинами и концентрировались в нижней части сегрегатора. В то же время зерносоломистая смесь пе-

ремещалась вниз к решету 2. Решето 2 выполняло роль делителя, т.е. разделяло сегрегированный поток очесанного вороха на два потока. Проходом шла зерно-

вая фракция вместе с мелкими примесями, которая в результате сегрегации была концентрирована внизу потока, а сходом крупные солоmistые примеси с оборванными колосками. Сходовая фракция выводилась из машины, а проходная поступала на решета В и Г, на которых проходом шли мелкие примеси, а сходом очищенное зерно.

Производственные испытания проводились на зернотоке частного предприятия «ТЕРА ВОМ» в уборочный сезон 2015 года.



Рис. 4.9. Общий вид исходного материала

Ворохоочиститель с экспериментальными рабочими органами выполнял обработку искусственно приготовленного вороха ярового ячменя сорта «Прерия» (рис. 4.9).

Методики проведения производственной проверки работы ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами следующий.

Из бурта отбиралась партия вороха и укладывалась перед скребковым питателем 1 ворохоочистителя (рис. 4.7). Машина включалась в работу и начинала выполнять технологический процесс сепарации вороха. Через 3 мин. работы, когда рабочий процесс стабилизировался синхронно устанавливались пробоотборники для отбора очищенного зерна и отходов, при этом время отбора проб составило 3 сек. После отбора пробы, пробоотборники синхронно убирались, машина еще работала в течении 1 мин., а затем выключалась. Пробоотборник с очищенным зерном и пробоотборник с отходами взвешивались на платформенных весах ВНЦ-50. Данные заносились в журнал первичной информации. После взвешивания пробоотборников с зерном и отходами из них отбирали в полиэтиленовые мешочки пробы для последующего разбора в лаборатории. Затем пробоотборники высыпались и машина снова подготавливалась для проведения очередной повторности экспериментов, при этом общий объем выборки составил 20 повторностей. Вся полученная информация анализировалась и в конечном итоге были определены значения статистических характеристик произво-

дительности ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами на обработке очесанного вороха ярового ячменя, а также показатели качества работы – коэффициент сепарации и коэффициент эффективности выделения примесей.

#### Выводы по четвертому разделу

1. На основании анализа литературных источников для проведения полнофакторного эксперимента был выбран некомпозиционный, рототабельный трехуровневый план Бокса-Бенкина, который позволяет экспериментальным путем обосновать параметры и режимы функционирования рабочего органа с минимальным числом опытов.

2. Для оценки эффективности процесса сепарации очесанного вороха пшеницы предлагается использовать два критерия – коэффициент сепарации и коэффициент эффективности выделения примесей, ввиду того, что коэффициент сепарации несет информацию о свободное зерне, которое не выделилось в проход, а ушло со сходом, а коэффициент эффективности характеризует рабочий орган с позиций выделения крупных примесей.

3. При планировании многофакторного эксперимента в качестве факторов, влияющих на технологический процесс сепарирующего рабочего органа приняты удельная подача очесанного вороха, частота колебаний и диаметр отверстий решета, потому что они наиболее полно характеризуют технологические, кинематические и конструктивные параметры.

4. Разработана лабораторная установка, которая дает возможность варьировать факторами и тем самым определить рациональные их значения.

## РАЗДЕЛ V

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО  
ОРГАНА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ОЧЕСАННОГО ВОРОХА ПШЕНИЦЫ  
И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

## 5.1. Модели регрессии процесса сепарации очесанного вороха пшеницы

Согласно методики проведения полнофакторного эксперимента был реализован некомпозиционный, рототабельный трехуровневый план Бокса-Бенкина, для трех факторов, который оценивался двумя функциями отклика.

Общий вид математической модели данного плана представлен уравнениями (4.4). В результате проведения экспериментов была получена первичная информация, о функциях отклика, которая использовалась для определения коэффициентов регрессии. По формулам приведенным в [115] были вычислены коэффициенты регрессии. Для первого уравнения регрессии коэффициенты равны:

$$\begin{array}{ll}
 b_0 = 0,614; & b_{13} = 0; \\
 b_1 = -0,158; & b_{23} = -0,00175; \\
 b_2 = -0,093; & b_{11} = 0,061; \\
 b_3 = 0,132; & b_{22} = -0,041; \\
 b_{1,2} = -0,00025; & b_{33} = -0,0665.
 \end{array}$$

После определения коэффициентов регрессии проводилась проверка их значимости, для этого вначале была определена по результатам опытов в центре плана дисперсия характеризующая ошибку опытов, а затем определялась дисперсия воспроизводимости, используя их значения были определены дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, методика расчета приведена в [112].

$$\begin{array}{ll}
 S^2 \{b_0\} = 0,000133; & S^2 \{b_{ii}\} = 0,0001; \\
 S^2 \{b_i\} = 0,00005; & S^2 \{b_{ii}\} = 0,00011.
 \end{array}$$

Дальнейшие вычисления были связаны с определением доверительного интервала. В результате расчетов были получены следующие значения доверительных интервалов

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm 0,000572; & \Delta b_{il} &= \pm 0,00043; \\ \Delta b_i &= \pm 0,000215; & \Delta b_{ii} &= \pm 0,00047. \end{aligned}$$

При сравнении численных значений коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов оказалось, что коэффициент  $b_{1,2} = -0,00025$  меньше доверительного интервала  $\Delta b_{il} = \pm 0,00043$ . Следовательно этот коэффициент оказался незначительным и в модель не включается, кроме того коэффициент  $b_{13} = 0$  тоже не входит в модель. Все остальные коэффициенты оказались больше их доверительных интервалов, из чего следует вывод, что эти коэффициенты регрессии значимы. Таким образом, первое уравнение регрессионной модели имеет вид

$$y_1 = 0,614 - 0,158x_1 - 0,093x_2 + 0,132x_3 - 0,00175x_2x_3 + 0,061x_1^2 - 0,041x_2^2 - 0,0665x_3^2. \quad (5.1)$$

Абсолютно аналогичным образом было получено второе уравнение регрессионной модели. Вычисление по методике [115] коэффициентов регрессии дало следующие результаты:

$$\begin{aligned} c_0 &= 0,6; & c_{1,3} &= 0,03; \\ c_1 &= -0,105; & c_{23} &= 0,01; \\ c_2 &= -0,104; & c_{11} &= -0,046; \\ c_3 &= -0,054; & c_{22} &= 0,049; \\ c_{1,2} &= 0,015; & c_{33} &= -0,009. \end{aligned}$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии выполнялась точно также как и в первом случае.

Дисперсии характеризующие ошибки в определении коэффициентов второго уравнения регрессии соответственно равны

$$\begin{aligned} S^2\{c_0\} &= 0,00002; & S^2\{c_{il}\} &= 0,0000156; \\ S^2\{c_i\} &= 0,0000078; & S^2\{c_{ii}\} &= 0,000617. \end{aligned}$$

Используя дисперсии, характеризующие ошибку в определении коэффи-

коэффициентов регрессии второго уравнения были вычислены доверительные интервалы

$$\begin{aligned}\Delta c_0 &= \pm 0,000086; & \Delta c_{ii} &= \pm 0,000067; \\ \Delta c_i &= \pm 0,000034; & \Delta c_{ii} &= \pm 0,000265.\end{aligned}$$

Численные значения коэффициентов регрессии оказались больше их доверительных интервалов, из этого следует вывод, что все коэффициенты регрессии значимы. Таким образом, второе уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned}y_2 = 0,6 - 0,105x_1 - 0,104x_2 - 0,054x_3 + 0,015x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,01x_2x_3 - \\ - 0,046x_1^2 + 0,049x_2^2 - 0,009x_3^2.\end{aligned}\quad (5.2)$$

Для оценки адекватности полученной математической модели был использован критерий Фишера. Для этого вначале определялось расчетное значение критерия Фишера. Расчетное значение критерия Фишера численно равно отношению дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости и она для первого уравнения численно равна  $S^2\{y\} = 0,0004$ . Дисперсия адекватности также была вычислена, ее численное значение составило  $S_{ao}^2 = 0,0000066$ , тогда используя полученные значения дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости, определим расчетное значение критерия Фишера для первого уравнения  $F_p = 0,0165$ . Сравнение табличного значения критерия Фишера и расчетного значения показало, что  $F_m > F_p$ , т.е. первое уравнение адекватное при 5% уровне значимости. Точно такая же работа по оценке адекватности была проведена для второго уравнения регрессии, т.е. была определена дисперсия воспроизводимости  $S^2\{y\} = 0,0000625$  и дисперсия адекватности  $S_{ao}^2 = 0,000466$ , затем было найдено расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 7,456$ . На основании таблиц приведенным в [115] было взято табличное значение критерия Фишера  $F_m = 19,2$ , а затем сравнивалось расчетное значение с табличным. В нашем случае  $F_m = 19,2$ ,  $F_p = 7,456$ , следовательно  $F_m > F_p$ , на основании данного неравенства можно сделать заключение о том, что второе уравнение регрессии адекватное.

Результаты расчета коэффициентов регрессии и статистически полученной

математической модели сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Параметры математической модели процесса сепарации очесанного вороха  
пшеницы

| № | Наименование параметров модели                  | Расчетные значения   |   |
|---|---|--|---|
|   |   | первое уравнение регрессии   | второе уравнение регрессии  |
| 1 | Коэффициент регрессии                           | $b_0 = 0,614$<br>$b_1 = -0,158$<br>$b_2 = -0,093$<br>$b_3 = 0,132$<br>$b_{12} = -$<br>$b_{13} = -$<br>$b_{23} = -0,00175$<br>$b_{11} = 0,061$<br>$b_{22} = -0,041$<br>$b_{33} = -0,0665$ | $c_0 = 0,6$<br>$c_1 = -0,105$<br>$c_2 = -0,104$<br>$c_3 = -0,054$<br>$c_{12} = 0,015$<br>$c_{13} = 0,03$<br>$c_{23} = 0,01$<br>$c_{11} = -0,046$<br>$c_{22} = 0,049$<br>$c_{33} = -0,009$ |
| 2 | Доверительные интервалы коэффициентов регрессии | $\Delta b_0 = \pm 0,000572$<br>$\Delta b_i = \pm 0,000215$<br>$\Delta b_{ii} = \pm 0,00043$<br>$\Delta b_{ij} = \pm 0,00047$   | $\Delta c_0 = \pm 0,00086$<br>$\Delta c_i = \pm 0,000034$<br>$\Delta c_{ii} = \pm 0,000067$<br>$\Delta c_{ij} = \pm 0,000265$   |
| 3 | Дисперсия воспроизводимости                     | $S^2\{y\} = 0,0004$  | $S^2\{y\} = 0,0000625$  |
| 4 | Дисперсия адекватности                          | $S_{ad}^2 = 0,000066$  | $S_{ad}^2 = 0,000466$   |
| 5 | Расчетное значение критерия Фишера              | $F_p = 0,0165$   | $F_p = 7,456$   |
| 6 | Табличное значение критерия Фишера              | $F_m = 19,3$   | $F_m = 19,3$  |

Таким образом, в результате реализации плана второго порядка была получена математическая модель (5.3) в виде полинома второй степени, который адекватно описывает процесс сепарации зернового вороха.

$$y_1 = 0,614 - 0,158x_1 - 0,093x_2 + 0,132x_3 - 0,00175x_2x_3 + 0,061x_1^2 - 0,041x_2^2 - 0,0665x_3^2 \quad (5.3)$$

$$y_2 = 0,6 - 0,105x_1 - 0,104x_2 - 0,054x_3 + 0,015x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,01x_2x_3 - 0,046x_1^2 + 0,049x_2^2 - 0,009x_3^2$$

Первое из уравнений (5.3) характеризует изменение коэффициента сепарации в зависимости от параметров и режимов работы экспериментального рабо-

чего органа, а второе уравнение описывает характер изменений коэффициента эффективности выделения примесей. Дальнейший анализ этих уравнений даст возможность провести моделирование технологического процесса и определить рациональные значения параметров и режимов работы экспериментального рабочего органа на очистке очесанного вороха зерновых.

## 5.2. Моделирование технологического процесса сепарации очесанного вороха пшеницы

### 5.2.1. Исследование функций отклика на наибольшее и наименьшее значение

Для анализа уравнений регрессии (5.3) необходимо построить поверхности отклика. Построение поверхности отклика начинается с определения координат точек, в которых функция отклика принимает экстремальное значение. Применительно к рассматриваемому процессу сепарации очесанного вороха речь может идти о нахождении наибольшего или наименьшего значения функций отклика и, тех условий, которые обеспечивают эти значения.

В первую очередь нас интересуют наибольшие значения функций отклика, т.е. наибольшие значения коэффициента сепарации и коэффициента эффективности выделения примесей. Таким образом, задача сводится к определению значений факторов (удельной подачи, частоты колебаний и диаметра отверстий), при которых функции отклика принимают наибольшие значения. Для решения данной задачи необходимо исследовать уравнения регрессии, которые являются функциями нескольких переменных на наибольшее и наименьшее значение. При исследовании функции нескольких переменных на наибольшее и наименьшее значение в замкнутом пространстве был использован следующий алгоритм [116]:

– находились частные производные первого порядка, приравнивались к нулю и решалась система  $k$  уравнений ( $k$  – количество переменных, при этом система необязательно должна быть линейной);

- после решения системы были получены критические точки  $M_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , где  $i = \overline{1, m}$ ,  $m$  – наивысшая степень уравнений системы;
- были определены значения функции в этих точках, при этом исследование на экстремум не проводилось;
- находилось наибольшее и наименьшее значения функции на каждой границе замкнутого пространства;
- из всех вычисленных значений выбиралось наибольшее и наименьшее.

Согласно приведенной методике исследуем первое уравнение регрессии:

$$y_1 = 0,614 - 0,158x_1 - 0,093x_2 + 0,132x_3 - 0,00175x_2x_3 + 0,061x_1^2 - 0,041x_2^2 - 0,0665x_3^2 \quad (5.4)$$

Возьмем частные производные от данной функции по исследуемым факторам  $x_1, x_2, x_3$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} = -0,158 + 2 \cdot 0,061x_1, \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_2} = -0,093 - 0,00175x_3 - 2 \cdot 0,041x_2, \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_3} = 0,132 - 0,00175x_2 - 2 \cdot 0,0665x_3. \end{cases} \quad (5.5)$$

Приравниваем уравнения (5.5) к нулю и получим алгебраическую систему уравнений. Решим систему (5.6) относительно  $x_1, x_2$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} -0,158 + 2 \cdot 0,061x_1 = 0, \\ -0,093 - 0,00175x_3 - 2 \cdot 0,041x_2 = 0, \\ 0,132 - 0,00175x_2 - 2 \cdot 0,0665x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.6)$$

Из первого уравнения системы (5.6) находим  $x_1$ .

$$0,122x_1 = 0,158 \Rightarrow x_1 = 1,295.$$

Далее определяем  $x_2$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} 0,082x_2 + 0,00175x_3 = -0,093 & | & 0,00175 \\ 0,00175x_2 + 0,133x_3 = 0,132 & | & -0,082 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,0001435x_2 + 0,0000030625x_3 = -0,00016275 \\ -0,0001435x_2 - 0,010906x_3 = -0,010824 \end{cases}$$

$$-0,0109029375x_3 = -0,01098675 ;$$

$$x_3 = 1,008;$$

$$0,082x_2 + 0,001763453 = -0,093$$

$$0,082x_2 = -0,094763453$$

$$x_2 = -1,156.$$

Таким образом, в результате решения системы алгебраических уравнений (5.6) получили значения координат точки  $M M(x_1; x_2; x_3) = M(1,295; -1,156; 1,008)$ . Однако, эта точка находится вне исследуемой зоны и мы ее отбрасываем. Теперь будем исследовать значения функции на границах замкнутого пространства.

1. Принимаем, что фактор  $x_1 = \text{const}$  и обозначим его через  $c_1$ . Подставим  $c_1$  в уравнение регрессии (5.4) вместо  $x_1$  и получим уравнение вида:

$$y_1 = 0,614 - 0,158c_1 - 0,093x_2 + 0,132x_3 - 0,00175x_2x_3 + 0,061c_1^2 - 0,041x_2^2 - 0,0665x_3^2. \quad (5.7)$$

Далее проводим исследование по аналогичной методике. Возьмем частные производные от функции отклика по переменным факторам  $x_2$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x_2} = -0,093 + 0,00175x_3 - 0,082x_2, \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_3} = 0,132 - 0,00175x_2 - 2 \cdot 0,0665x_3. \end{cases} \quad (5.8)$$

Приравняем каждое уравнение системы (5.8) к нулю и в результате получаем систему двух линейных уравнений.

$$\begin{cases} -0,082x_2 - 0,00175x_3 - 0,093 = 0, \\ -0,00175x_2 - 0,133x_3 + 0,132 = 0. \end{cases} \quad (5.9)$$

или

$$\begin{cases} -0,082x_2 - 0,0175x_3 = 0,093, \\ 0,00175x_2 + 0,133x_3 = 0,132. \end{cases} \quad (5.10)$$

Находим из системы (5.10) неизвестные  $x_2$  и  $x_3$ .

$$x_2 = -1,156;$$

$$x_3 = 1,0008.$$

Примем, что  $c_1$  может принимать значения:  $-1; -0,5; 0; 0,5; 1$ . Проведем расчеты значений функции отклика  $y_2$  в каждом из сечений как внутри этих

сечений так и в узловых точках, значения сведем в таблице П.27 (Приложение К) [116]. В случаях, когда значения  $x_2$  или  $x_3$  выходят за зону факторного пространства, значение функции отклика не рассчитываем.

2. Принимаем  $x_2 = c_2 = \text{const}$ .

Тогда первое уравнение регрессии модели (5.3) будет иметь вид

$$y_1 = 0,614 - 0,158x_1 - 0,093c_2 + 0,132x_3 - 0,00175c_2x_3 + 0,061x_1^2 - 0,041c_2^2 - 0,0665x_3^2. \quad (5.11)$$

Возьмем частные производные от  $y_1$  по факторам  $x_1$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} = -0,158 + 0,122x_1, \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_3} = 0,132 - 0,00175c_2 - 0,133x_3. \end{cases} \quad (5.12)$$

Приравняем каждое уравнение системы (5.12) к нулю.

$$\begin{cases} -0,158 + 0,122x_1 = 0, \\ 0,132 - 0,00175c_2 - 0,133x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

или

$$\begin{cases} 0,122x_1 = 0,158, \\ 0,00175c_2 + 0,133x_3 = 0,132. \end{cases} \quad (5.14)$$

Из уравнений (5.14) определяем  $x_1$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} x_1 = \frac{0,158}{0,122} = 1,295, \\ x_3 = \frac{0,132 - 0,0175c_2}{0,133}. \end{cases} \quad (5.15)$$

Во второе уравнение системы (5.15) входит постоянная  $c_2$ , которая может принимать значения:  $-1$ ;  $-0,5$ ;  $0$ ;  $0,5$ ;  $1$ . Эти значения взяты из построения модели и соответствуют точкам замкнутого пространства.

Подставляя в уравнение (5.11) значения  $c_2$  определим  $x_3$ . В результате расчетов получим:

$$\begin{aligned} (x_3)_{c_2=-1} &= 1,124; & (x_3)_{c_2=0} &= 0,992; \\ (x_3)_{c_2=0,5} &= 0,927; & (x_3)_{c_2=1} &= 0,861. \end{aligned}$$

$$(x_3)|_{c_2=-0,5} = 1,058;$$

Полученные результаты подставим в уравнение регрессии (5.4) и определим значения функции отклика  $y_1$ , результаты расчетов сведем в таблицу П.28 (Приложение К) [116].

3. Примем  $x_3 = c_3 = \text{const}$  и подставляем  $c_3$  в уравнение регрессии (5.4), получим:

$$y_1 = 0,614 - 0,158x_1 - 0,093x_2 + 0,132c_3 - 0,00175x_2c_3 + 0,061x_1^2 - 0,041x_2^2 - 0,0665c_3^2. \quad (5.16)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} = -0,158 + 0,122x_1 \\ \frac{\partial y_1}{\partial x_2} = -0,093 - 0,00175c_3 - 0,082x_2 \end{cases} \quad (5.17)$$

Приравняем каждое уравнение системы (5.17) к нулю.

$$\begin{cases} -0,158 + 0,122x_1 = 0, \\ -0,093 - 0,00175c_3 - 0,082x_2 = 0. \end{cases} \quad (5.18)$$

Из первого уравнения системы (5.18)  $x_1 = 1,295$ . Из второго уравнения системы (5.18) определяем  $x_2$ .

$$x_2 = \frac{-0,093 - 0,0175c_3}{0,082}. \quad (5.19)$$

Принимаем, что  $c_3$  изменяется в пределах от -1 до 1, т.е.  $c_3 = -1$ ,  $c_3 = -0,5$ ,  $c_3 = 0$ ,  $c_3 = 0,5$  и  $c_3 = 1$ . Подставим в уравнение (5.19) значения, которые может принимать значения  $c_3$ , и в результате получим, значения  $x_2$ , т.е.:

$$(x_2)|_{c_3=-1} = -1,113;$$

$$(x_2)|_{c_3=0,5} = -1,145;$$

$$(x_2)|_{c_3=-0,5} = -1,123;$$

$$(x_2)|_{c_3=1} = -1,155.$$

$$(x_2)|_{c_3=0} = -1,134;$$

В результате получаем значения  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , которые подставляем в уравнение регрессии (5.4). После расчетов получаем значения функции отклика  $y_1$  при  $x_3 = \text{const}$ , полученные результаты сводим в таблицу П.29 (Приложение К) [116].

Результаты расчетов значений функций отклика  $y_1$  (табл. П.27...П.29), по-

казали, что наибольшее значение функции отклика  $y_1 = 0,95225$  принимает при  $x_1 = -1$ ,  $x_2 = -1$  и  $x_3 = 1$ , поэтому при построении поверхности функции отклика были приняты эти значения факторов.

Модель (5.3) включает в себя два уравнения регрессии. Первое уравнение регрессии уже исследовано, рассмотрим второе уравнение регрессии, т.е.

$$y_2 = 0,6 - 0,105x_1 - 0,104x_2 - 0,054x_3 + 0,015x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 0,01x_2x_3 - 0,046x_1^2 + 0,049x_2^2 - 0,009x_3^2. \quad (5.20)$$

Возьмем частные производные от функции отклика  $y_2$  по  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x_1} = -0,105 + 0,015x_2 + 0,03x_3 - 0,092x_1, \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_2} = -0,104 + 0,015x_1 + 0,01x_3 + 0,098x_2, \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_3} = -0,054 + 0,03x_1 + 0,01x_2 - 0,018x_3. \end{cases} \quad (5.21)$$

Приравниваем каждое уравнения системы (5.21) к нулю.

$$\begin{cases} -0,105 + 0,015x_2 + 0,03x_3 - 0,092x_1 = 0, \\ -0,104 + 0,015x_1 + 0,01x_3 + 0,098x_2 = 0, \\ -0,054 + 0,03x_1 + 0,01x_2 - 0,018x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.22)$$

Перенесем свободные члены в правые части уравнений и получим систему трех линейных уравнений с тремя неизвестными.

$$\begin{cases} -0,092x_1 + 0,015x_2 + 0,03x_3 = 0,105, \\ 0,015x_1 + 0,098x_2 + 0,01x_3 = 0,104, \\ 0,03x_1 + 0,01x_2 - 0,018x_3 = 0,054. \end{cases} \quad (5.23)$$

Решим полученную систему относительно неизвестных  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ .

В результате решения получаем, что  $x_1 = -2,98$ ,  $x_2 = 2,205$  и  $x_3 = -6,742$ .

Как видно из полученных результатов численные значения  $x_2$  и  $x_3$  находятся за зоной факторного пространства. Поэтому эту точку отбрасываем.

Теперь исследуем функцию отклика  $y_2$  на границах замкнутого пространства.

1. Примем  $x_1 = c_1 = \text{const}$ , тогда уравнение (5.20) принимает вид:

$$y_2 = 0,6 - 0,105c_1 - 0,104x_2 - 0,054x_3 + 0,015c_1x_2 + 0,03c_1x_3 + 0,01x_2x_3 - 0,046c_1^2 + 0,049x_2^2 - 0,009x_3^2. \quad (5.24)$$

Возьмем частные производные от функции отклика  $y_2$  и приравняем их к нулю, а затем решим полученную систему линейных уравнений относительно  $x_2$  и  $x_3$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x_2} = -0,104 + 0,015c_1 + 0,01x_3 + 0,098x_2, \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_3} = -0,054 + 0,03c_1 + 0,01x_2 - 0,018x_3. \end{cases} \quad (5.25)$$

Приравниваем к нулю каждое уравнение системы (5.25)

$$\begin{cases} -0,104 + 0,015c_1 + 0,01x_3 + 0,098x_2 = 0, \\ -0,054 + 0,03c_1 + 0,01x_2 - 0,018x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.26)$$

или

$$\begin{cases} 0,098x_2 + 0,01x_3 = 0,104 - 0,015c_1, \\ 0,01x_2 - 0,018x_3 = 0,054 - 0,03c_1. \end{cases} \quad (5.27)$$

В результате решения системы линейных уравнений относительно неизвестных  $x_2$  и  $x_3$  получим следующие выражения:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{241,2 - 57c_1}{186,4}, \\ x_3 = 1,497c_1 - 2,2811. \end{cases} \quad (5.28)$$

Как видно из выражений (5.28) найденные в результате решения системы линейных уравнений (5.27)  $x_2$  и  $x_3$  зависят от значения  $c_1$ . Согласно заложенных в модели предположений,  $c_1$  может иметь значения:  $-1$ ;  $-0,5$ ;  $0$ ;  $0,5$ ;  $1$ .

Проведем расчеты значений функции отклика  $y_2$  в каждом из сечений как внутри этих сечений так и в узловых точках, значения сведем в таблицу П.30 (Приложение К) [116].

2. Принимаем, что  $x_2 = c_2 = \text{const}$  и подставляем  $c_2$  в уравнение (5.20) вместо  $x_2$ .

$$y_2 = 0,6 - 0,105x_1 - 0,104c_2 - 0,053x_3 + 0,015c_2x_1 + 0,03x_1x_3 + 0,01c_2x_3 - 0,046x_1^2 +$$

$$+0,049c_2^2 - 0,009x_3^2. \quad (5.29)$$

Берем частные производные от функции отклика  $y_2$  по факторам  $x_1$  и  $x_3$ , т.е.

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x_1} = -0,105 + 0,015c_2 + 0,03x_3 - 0,092x_1, \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_3} = -0,054 + 0,03x_1 + 0,01c_2 - 0,018x_3. \end{cases} \quad (5.30)$$

Приравниваем к нулю каждое уравнение системы (5.30), и получаем:

$$\begin{cases} -0,105 + 0,015c_2 + 0,03x_3 - 0,092x_1 = 0, \\ -0,054 + 0,03x_1 + 0,01c_2 - 0,018x_3 = 0. \end{cases} \quad (5.31)$$

Переносим свободные члены в правую часть и получаем систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными.

$$\begin{cases} -0,092x_1 + 0,03x_3 = 0,105 - 0,015c_2, \\ 0,03x_1 - 0,018x_3 = 0,054 - 0,01c_2. \end{cases} \quad (5.32)$$

В результате решения системы уравнений (5.32) относительно неизвестных  $x_1$  и  $x_3$  получаем, что:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{117 - 19c_2}{85,2}, \\ x_3 = \frac{3,3c_2 - 12,8}{18}. \end{cases} \quad (5.33)$$

Принимаем, что  $c_2$  может иметь значения:  $-1; -0,5; 0; 0,5; 1$ .

Проведем расчеты значений функции отклика  $y_2$  в каждом из сечений как внутри этих сечений так и в узловых точках, значения сведем в таблицу П.31 (Приложение К) [116].

2. Примем, что  $x_3 = c_3 = \text{const}$  Подставляем  $c_3$  в уравнение (5.20) вместо  $x_3$ .

$$y_2 = 0,6 - 0,105x_1 - 0,104x_2 - 0,054c_3 + 0,015x_1x_2 + 0,03c_3x_1 + 0,01c_3x_2 - 0,046x_1^2 + \\ + 0,049x_2^2 - 0,009c_3^2. \quad (5.34)$$

Затем возьмем частные производные от функции отклика по переменным  $x_1$  и  $x_2$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial y_2}{\partial x_1} = 0,105 + 0,015x_2 + 0,03c_3 - 0,092x_1, \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_2} = -0,104 + 0,015x_1 + 0,01c_3 + 0,098x_2. \end{cases} \quad (5.35)$$

Приравниваем к нулю каждое уравнение системы (5.35)

$$\begin{cases} 0,105 + 0,015x_2 + 0,03c_3 - 0,092x_1 = 0, \\ -0,104 + 0,015x_1 + 0,01c_3 + 0,098x_2 = 0. \end{cases} \quad (5.36)$$

или

$$\begin{cases} -0,092x_1 + 0,015x_2 = 0,105 - 0,03c_3, \\ 0,015x_1 + 0,092x_2 = 0,104 - 0,01c_3. \end{cases} \quad (5.37)$$

В результате решения системы линейных уравнений относительно неизвестных  $x_1$  и  $x_2$  получим следующие выражения:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{-14,17 + 4,529c_3}{15}, \\ x_2 = \frac{1114,3 - 137c_3}{924,1}. \end{cases} \quad (5.38)$$

Принимаем, что  $c_3$  может иметь значения:  $-1; -0,5; 0; 0,5; 1$ . Проведем расчеты значений функции отклика  $y_2$  в каждом из сечений как внутри этих сечений так и в узловых точках, значения сведем в таблицу П.32 (Приложение К) [116].

Данные приведенные в таблицах П.30...П.32, свидетельствуют о том, что наибольшее значение функции отклика  $y_2 = 0,912$  наблюдается при условии, что факторы имеют следующие значения:  $x_1 = -1$ ,  $x_2 = -1$  и  $x_3 = -1$ .

### 5.2.2. Анализ поверхностей отклика качественных показателей работы экспериментального рабочего органа

Дальнейший анализ полученных уравнений регрессии основывался на построении поверхностей отклика. Методика построения поверхностей отклика заключалась в следующем. На первом этапе были проведены исследования функций отклика на наибольшее и наименьшее значение, в результате чего были определены значения факторов, при которых функции отклика (уравне-

ния 5.3) принимают наибольшее значение (п.п. 5.2.1). Затем фиксировался один из факторов, на том значении, при котором функция отклика имеет наибольшее значение, а двум другим факторам придавались различные значения от -1 до +1.

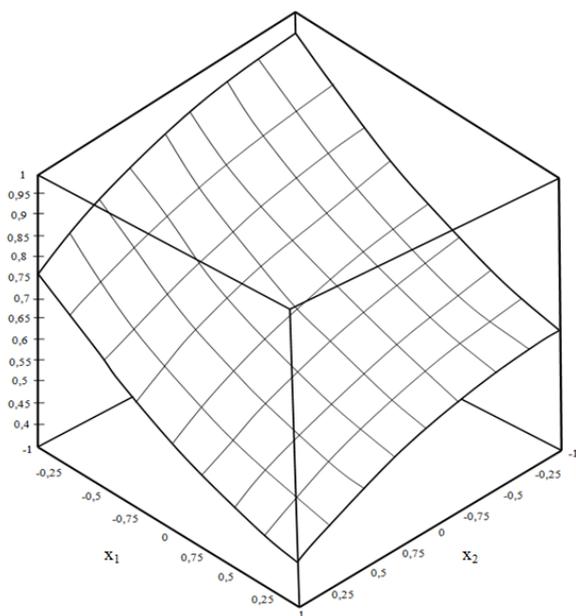


Рис. 5.1. Поверхность отклика  $x_1x_2$  коэффициента сепарации, фактор  $x_3$  зафиксирован при  $x_3 = 1$

коэффициента сепарации будет при удельной подаче  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний решета  $45 \text{ с}^{-1}$  и диаметре отверстий решет  $35 \text{ мм}$ . Впоследствии при увеличении

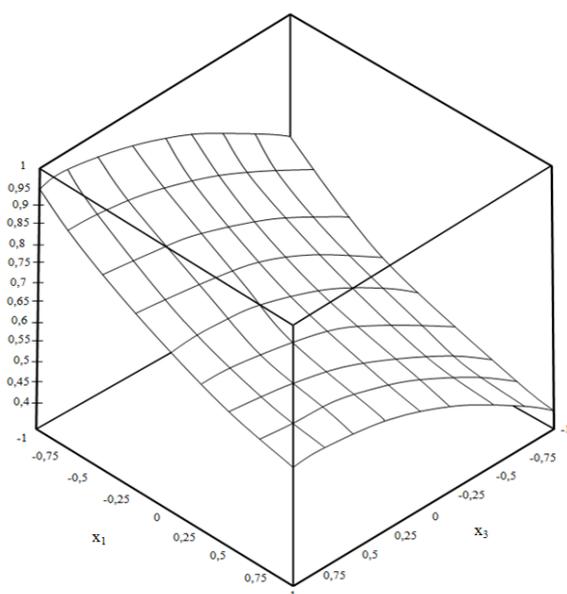


Рис. 5.2. Поверхность отклика  $x_1x_3$  коэффициента сепарации, фактор  $x_2$  зафиксирован при  $x_2 = -1$

Построение поверхностей отклика проводилось с помощью программ Maple.

В результате построения было получено шесть поверхностей отклика. Рассмотрим поочередно каждую из них.

Поверхность отклика  $x_1x_2$  коэффициента сепарации приведена на рисунке 5.1.

Наибольшее значение коэффициента сепарации  $0,95$ , достигается при  $x_1 = -1$ ,  $x_2 = -1$  и  $x_3 = 1$ , при переходе к натуральным значениям факторов это означает, что наибольшее значение коэффициента

сепарации будет при удельной подаче  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний решета  $45 \text{ с}^{-1}$  и диаметре отверстий решет  $35 \text{ мм}$ . Впоследствии при увеличении удельной подачи и частоты колебаний коэффициент сепарации уменьшается и его значение при  $x_1 = 1$  и  $x_2 = 1$  достигает  $0,45$ , т.е. при удельной подаче  $3,3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний  $55 \text{ с}^{-1}$  и диаметре решет  $15 \text{ мм}$ , имеем наименьшее значение коэффициента сепарации. Поверхность отклика  $x_1x_2$  графически интерпретирует результаты аналитического исследования функции отклика.

На рис. 5.2 приведена поверхность отклика  $x_1x_3$  коэффициента сепарации. На

рисунке четко видно, что наибольшего значения коэффициента сепарации дос-

тигается, при условии, что  $x_1 = -1$  и  $x_3 = 1$ , а  $x_2$  было зафиксировано на уровне  $x_2 = -1$ .

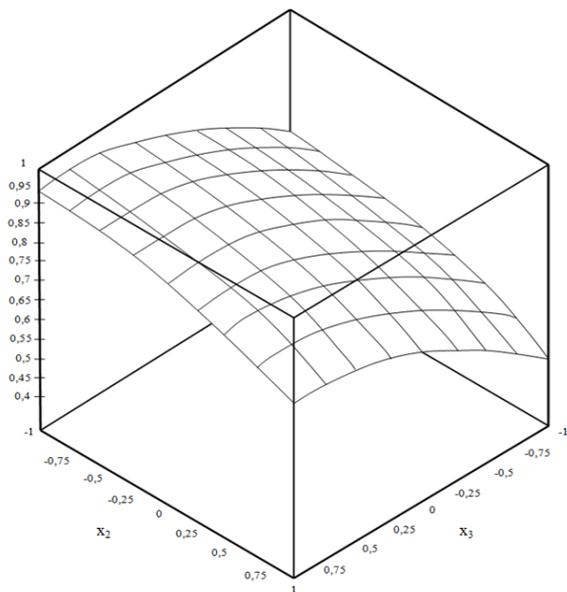


Рис. 5.3. Поверхность отклика  $x_2x_3$  коэффициента сепарации, фактор  $x_1$  зафиксирован при  $x_1 = -1$

С увеличением удельной подачи и уменьшением диаметра отверстий решет при условии, что  $x_2$  зафиксировано при  $x_2 = -1$  значение коэффициента сепарации уменьшается и при  $x_1 = 1$  и  $x_3 = -1$  достигает наименьшего значения 0,36, т. е. при удельной подаче  $3,3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний  $45 \text{ с}^{-1}$  и диаметре отверстий решет 15 мм.

Рассмотрим поверхность отклика  $x_2x_3$  коэффициента сепарации. Как показывает рисунок 5.3 наибольшее значение коэффициента сепарации будет при условии, что  $x_2 = -1$  и  $x_3 = 1$ , а  $x_1 = -1$  зафиксировано.

При увеличении частоты колебаний и уменьшении диаметра отверстий решета коэффициент сепарации уменьшается, и при частоте колебаний  $55 \text{ с}^{-1}$  и диаметре отверстий решет 15 мм он равен 0,5. Поверхность отклика  $x_2x_3$  наглядно показывает, как изменяется коэффициент сепарации с изменением факторов  $x_2$  и  $x_3$ , т.е. частоты колебаний решета и диаметра отверстий решет. Три поверхности отклика  $x_1x_3$ ,  $x_1x_2$  и  $x_2x_3$  графически характеризуют процесс изменения коэффициента сепарации.

Во всех трех случаях наибольшее значение коэффициента сепарации наблюдается при удельной подаче очесанного вороха на решето равной  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний решета  $45 \text{ с}^{-1}$  и диаметре отверстий решета 35 мм, при таких параметрах и режимах работы экспериментальных рабочих органов коэффициент сепарации равен 0,95.

Для графической интерпретации второго уравнения регрессии математической модели (5.3), характеризующей изменение коэффициента эффектив-

ности выделения примесей были построены три поверхности отклика  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$  и  $x_2x_3$ .

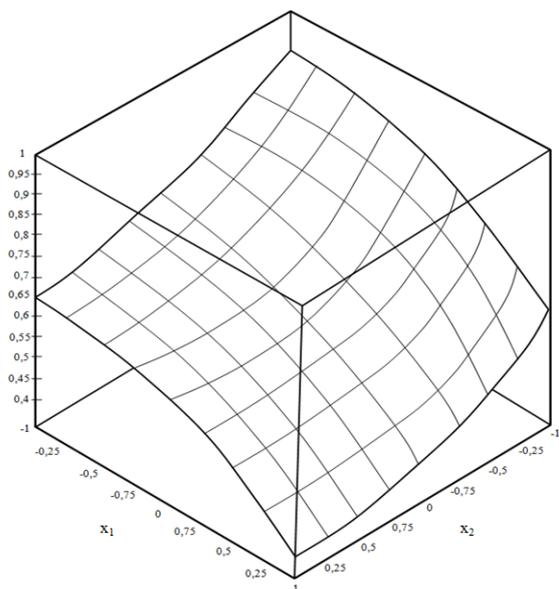


Рис. 5.4. Поверхность отклика  $x_1x_2$  коэффициента эффективности выделения, фактор  $x_3$  зафиксирован при  $x_3 = -1$

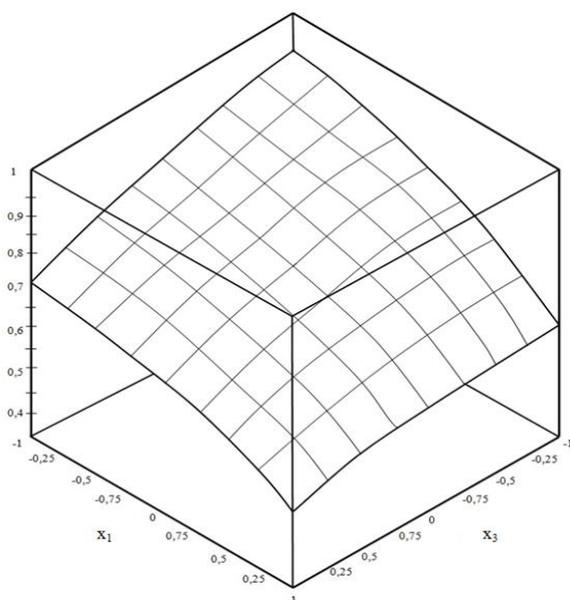


Рис. 5.5. Поверхность отклика  $x_1x_3$  коэффициента эффективности выделения, фактор  $x_2$  зафиксирован при  $x_2 = -1$

Рассмотрим поверхность отклика  $x_1x_2$ . Наибольшее значение 0,912 коэффициента эффективности выделения примесей наблюдается при  $x_1 = -1$  и  $x_2 = -1$ . При увеличении удельной подачи и частоты колебаний решета коэффициент эффективности выделения примесей уменьшается и достигается при удельной подаче очесанного вороха на решето 3,3 кг/с·м<sup>2</sup> и частоте колебаний 55 с<sup>-1</sup> своего наименьшего значения 0,414.

Поверхность отклика  $x_1x_3$  (рис. 5.5) имеет наибольшее значение коэффициента эффективности выделения примесей 0,912 при  $x_1 = -1$  и  $x_3 = -1$ . Наибольшее значение коэффициента эффективности выделения примесей будет при удельной подаче очесанного вороха на решето равной 2,1 кг/с·м<sup>2</sup>, диаметре отверстий 15 мм и частоте колебаний решета равной 45 с<sup>-1</sup>. При увеличении удельной подачи и диаметра отверстий решет, коэффициент эффективности выделения примесей уменьшается. Наименьшее его значение

0,53 наблюдается при удельной подаче очесанного вороха на решето 3,3 кг/с·м<sup>2</sup> и при диаметре отверстий решета равном 0,35 мм, при условии, что частота колебаний решета равняется 55 с<sup>-1</sup>.

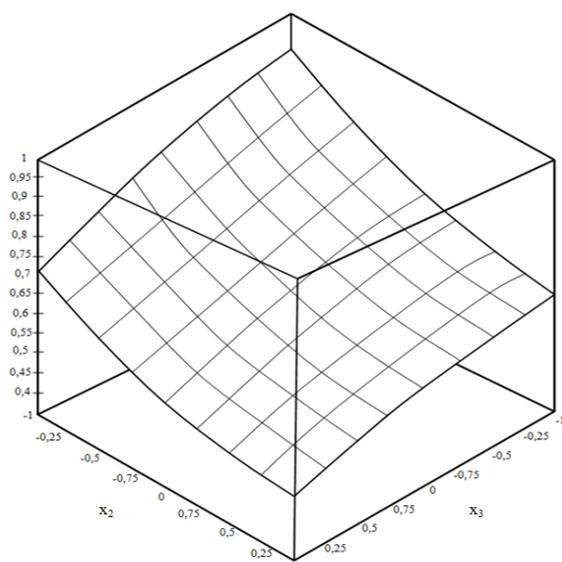


Рис. 5.6. Поверхность отклика  $x_2x_3$  коэффициента выделения примесей, фактор  $x_1$  зафиксирован при  $x_1 = -1$

Наибольшее значение коэффициента эффективности выделения примесей (рис. 5.6) имеет место в случае  $x_2 = -1$  и  $x_3 = -1$ , а  $x_1$  зафиксировано на уровне  $-1$ .

Таким образом, поверхности отклика рис. 5.1...5.6 наглядно показывают, что наибольшее значение коэффициента эффективности выделения примесей будет при удельной подаче на решетку  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ , частоте колебаний решетки  $45 \text{ с}^{-1}$  диаметре отверстий решетки  $15 \text{ мм}$ .

### 5.2.3. Зависимость качественных показателей функционирования рабочего органа от удельной подачи очесанного вороха

Качество работы экспериментальных решет характеризуется двумя показателями – коэффициентом сепарации и коэффициентом эффективности выделения примесей.

Анализ изменения этих показателей выполнялся путем моделирования. Для моделирования были использованы уравнения регрессии (5.3). Методика моделирования была следующей. В уравнении 5.3 подставлялись фиксированные значения факторов  $x_2$  и  $x_3$ , при которых функции отклика имеют наибольшее значение. Для первого уравнения регрессии  $x_2 = -1$  и  $x_3 = 1$ , а для второго уравнения  $x_2 = -1$  и  $x_3 = -1$ . В результате были получены две функции, которые зависят только от одного фактора  $x_1$  т.е. от удельной подачи очесанного вороха эти функции имеют вид:

$$y_1 = 0,733 - 0,158x_1 + 0,061x_1^2 \quad (5.39)$$

$$y_2 = 0,808 - 0,15x_1 - 0,046x_1^2$$

Далее в каждое из уравнений подставлялись значения удельной подачи в пределах  $-1$  до  $1$ . А затем по полученным результатам были построены графики, которые характеризуют изменение качественных показателей работы решет

от удельной подачи. Для удобства работы с графиком кодированные значения фактора  $x_1$  были переведены в натуральные. В последствии по этим графикам был проведен анализ.

Рассмотрим изменение коэффициентов сепарации (рис. 5.7) [117].

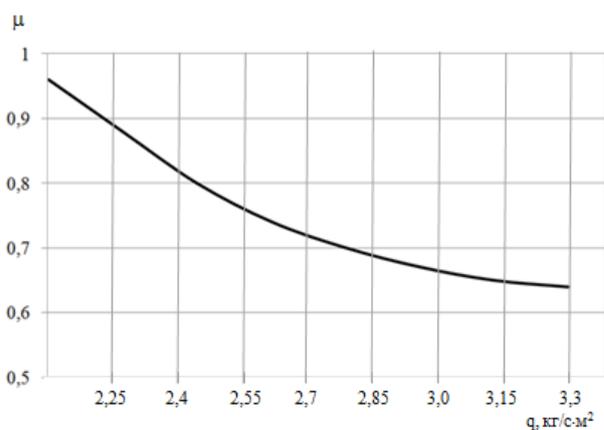


Рис. 5.7. График зависимости коэффициента сепарации от удельной подачи очесанного вороха

Характер протекания графика зависимости коэффициента сепарации от удельной подачи очесанного вороха свидетельствует о том, что это процесс монотонно убывающий. С увеличением значений удельной подачи коэффициент сепарации убывает. Так при подаче  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$  коэффициент сепарации имеет наибольшее значение и равен  $0,95$ , а при удельной подаче  $3,3 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$  наименьшее значение –  $0,636$ . Таким образом, при увеличении удельной подачи на  $66,7\%$  коэффициент сепарации снижается на  $33\%$ , т.е. как видно удельная подача очесанного вороха на рабочие органы существенным образом влияет на коэффициент сепарации. И если подходить с позиций качества работы экспериментального рабочего органа, которое характеризуется наибольшим значением коэффициента сепарации, то наиболее приемлемым режимом работы решет будет

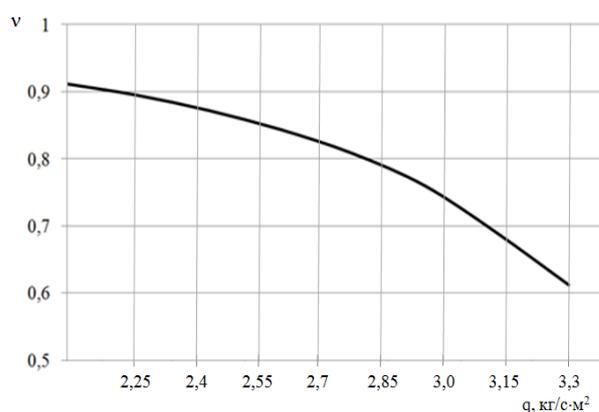


Рис. 5.8. График зависимости коэффициента эффективности выделения примесей от удельной подачи

удельная подача очесанного вороха равная  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ .

Второй качественный показатель функционирования экспериментального рабочего органа – это коэффициент эффективности выделения примесей, график изменения которого от удельной подачи приведен на рис. 5.8 [117].

Как видно из рисунка 5.8 коэффициент эффективности выделения примесей монотонно убывает с увеличением удельной подачи. Наибольшее свое зна-

чение 0,912 он имеет при удельной подаче 2,1 кг/с·м<sup>2</sup>, а наименьшее 0,612 при удельной подаче 3,3 кг/с·м<sup>2</sup>. Из приведенных данных следует заключение, что наиболее приемлемым значением удельной подачи является удельная подача равная 2,1 кг/с·м<sup>2</sup>.

Таким образом, проведенный анализ дает возможность сделать вывод о том, что для эффективной работы экспериментального рабочего органа наиболее рациональным режимом является удельная подача очесанного вороха на уровне 2,1 кг/с·м<sup>2</sup>.

#### 5.2.4. Влияние частоты колебаний рабочего органа на эффективность его работы

Анализ влияния частоты колебаний рабочего органа на эффективность его работы проводился по методике аналогичной изложенной в п.п. 5.2.3. В уравнения 5.3 подставлялись значения факторов  $x_1$  и  $x_3$ , при которых функции отклика имеют наибольшее значение. Для первого уравнения это  $x_1 = -1$  и  $x_3 = 1$ , а для второго уравнения  $x_1 = -1$  и  $x_3 = -1$ . В результате получается уравнения вида:

$$\begin{cases} y_1 = 0,899 - 0,095x_2 - 0,041x_2^2 \\ y_2 = 0,734 - 0,129x_2 + 0,049x_2^2 \end{cases} \quad (5.40)$$

В этих уравнениях аргументом является  $x_2$ , т.е. частота колебаний решет. Затем подставим в первое уравнение (5.40) значение  $x_2$  в пределах -1 до 1. Используя полученные результаты вычислений построим график зависимости ко-

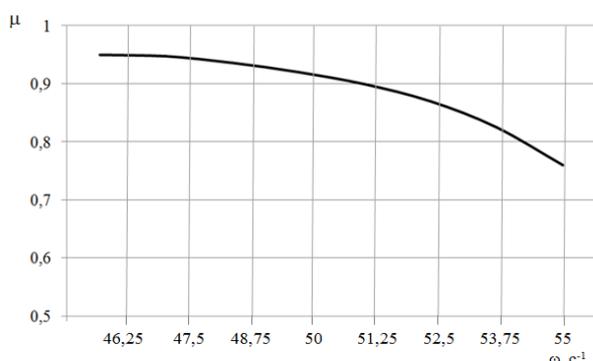


Рис. 5.9. График зависимости коэффициента сепарации от частоты колебаний рабочего органа

эффициента сепарации от частоты колебаний (рис. 5.9), для удобства переведем кодированные значения фактора  $x_2$  в натуральные.

Как видно из приведенного графика коэффициент сепарации уменьшается с увеличением частоты колебаний. Наибольшее значение коэффициента

сепарации 0,95 наблюдается при частоте колебаний рабочего органа равной

$45 \text{ с}^{-1}$ , а наименьшее значение коэффициента сепарации 0,76 будет при частоте  $55 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому наиболее целесообразно работать при частоте колебаний равной  $45 \text{ с}^{-1}$ , при этом будет обеспечиваться наибольшее значение коэффициента сепарации.

Рассмотрим, каким образом частота колебаний влияет на коэффициент эффективности выделения примесей.

Для чего во второе уравнение модели (5.40) подставим значения  $x_2$  от -1 до 1. По результатам расчетов построим график зависимости коэффициента эффективности выделения примесей от частоты колебаний решет (рис. 5.10).

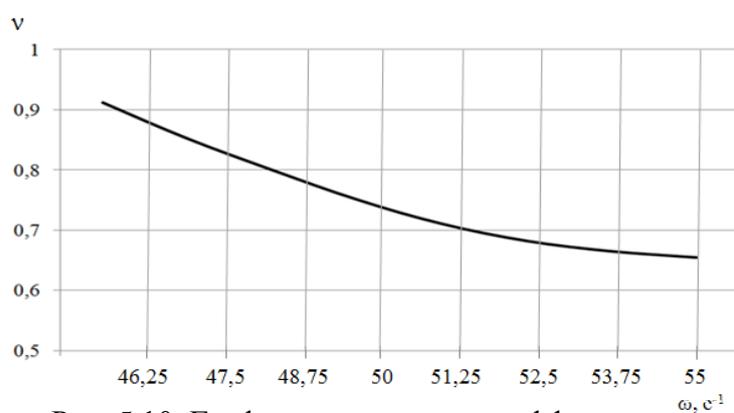


Рис. 5.10. График зависимости коэффициента эффективности выделения примесей от частоты колебаний решет

График показывает, что функция  $y_2 = f(\omega)$  монотонно убывает при увеличении значений аргумента.

Наибольшее значение 0,912 эта функция имеет при частоте колебаний решет  $45 \text{ с}^{-1}$ , а наименьшее — 0,654 при частоте  $55 \text{ с}^{-1}$ , т.е. при увеличении частоты колебаний на 18%, значение коэффициента эффективности выделения примесей уменьшается на 28,3%.

Следовательно, можно сделать такой вывод, наиболее рациональным кинематическим режимом функционирования рабочего органа является их частота колебаний равная  $45 \text{ с}^{-1}$ .

#### 5.2.5. Обоснование выбора рационального значения диаметра отверстий решет, обеспечивающего качественное функционирование сепарирующих рабочих органов

Для обоснования рациональных значений диаметра решета было проведено моделирование, для чего были использованы уравнения регрессии (5.3). Методика моделирования была аналогичной приведенной в п.п. 5.2.3. и 5.2.4.

В первое уравнение модели (5.3), которое характеризует изменение коэф-

коэффициента сепарации, подставлялись значения  $x_1 = -1$  и  $x_2 = -1$ . В результате получилась функция:

$$y_1 = 0,885 + 0,134x_3 - 0,0665x_3^2. \quad (5.41)$$

Как видно из выражения (5.41) аргументом, данной функции является диаметр отверстий решета. Затем в 5.41 подставлялись значения  $x_3$ , в пределах от  $x_3 = -1$  до  $x_3 = 1$ , и был получен числовой ряд значений функции  $y_1$ , который был использован для построения графика изменения коэффициента сепарации, в зависимости от изменений диаметров отверстий решет (рис. 5.11) кривая 1.

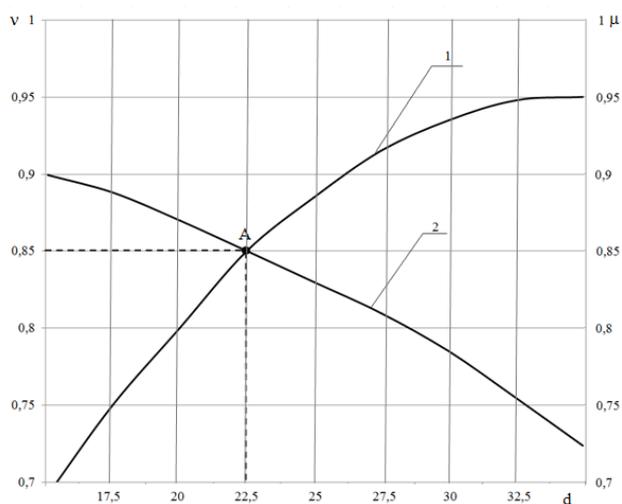


Рис. 5.11. График зависимости качественных показателей работы решет от диаметра их отверстий

1 – график зависимости коэффициента сепарации от диаметра отверстий решет; 2 – график зависимости коэффициента эффективности выделения примесей от диаметра отверстий решет

Характер протекания кривой 1 (рис. 5.11) свидетельствует о монотонном возрастании коэффициента сепарации с увеличением диаметра отверстий решета. Так при диаметре отверстий решет коэффициент сепарации равен 0,69, при диаметре 25 мм – 0,885 и наибольшего своего значения он достигает при диаметре отверстий решет 35 мм.

Аналогичную операцию проведем со вторым уравнением регрессии

модели (5.3). Подставим значения  $x_1 = -1$  и  $x_2 = -1$  и получим функцию:

$$y_2 = 0,827 - 0,094x_3 - 0,009x_3^2. \quad (5.42)$$

Как видно из графика (рис. 5.11) кривая 2 с увеличением диаметра отверстий решета монотонно убывает. Ее наибольшее значение 0,91 наблюдается при диаметре отверстий 15 мм, а наименьшее значение 0,72 при диаметре 35 мм.

Таким образом, из графиков, приведенных на рис. 5.11 видно, что увеличение диаметра отверстий решет способствует с одной стороны увеличению коэффициента сепарации, а с другой стороны уменьшению коэффициента эф-

фективности выделения примесей.

Кривая 1 и кривая 2 пересекаются в точке А, эта точка является такой, что удовлетворяет одной и другой кривой. Точка А имеет координаты на оси абсцисс 22,5, а на оси ординат 0,85. Таким образом, при диаметре отверстий решет равном 22,5 мм коэффициент сепарации равен 0,85 и коэффициент эффективности выделения примесей равен также 0,85.

В результате проведенного моделирования установлено, что наиболее приемлемым диаметром отверстий решета является диаметр 22,5 мм. С целью упрощения изготовления решет можно принять диаметр равный 23 мм.

### 5.3. Результаты производственной проверки ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами

Согласно программе проведения производственной проверки было выполнено двадцать повторностей и получены числовые характеристики качественных и количественных показателей работы ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами. Были определены статистические характеристики производительности, коэффициента сепарации и коэффициента эффективности

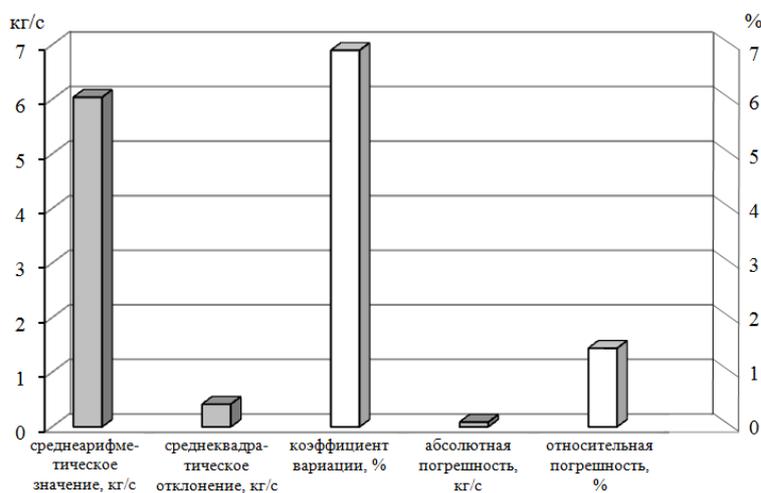


Рис. 5.12. Диаграмма статистических характеристик производительности ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами

сти выделения примесей. Статистические характеристики производительности ворохоочистителя на обработке очесанного вороха ячменя приведены на диаграмме (рис. 5.12).

Как видно из диаграммы среднее значение производительности составляет 6,04 кг/с, что соответствует 21,74 т/ч, оптимальная производительность равнялась 5,12 кг/с (18,46 т/ч), а максимальная 6,71 кг/с (24,19 т/ч). Среднеквадратическое отклонение составило 0,416, а коэффициент вариации 6,9%.

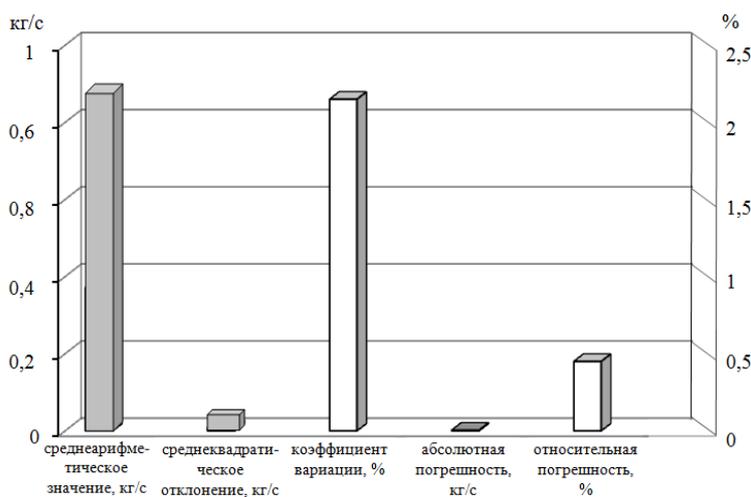


Рис. 5.13. Диаграмма статистических характеристик коэффициента сепарации

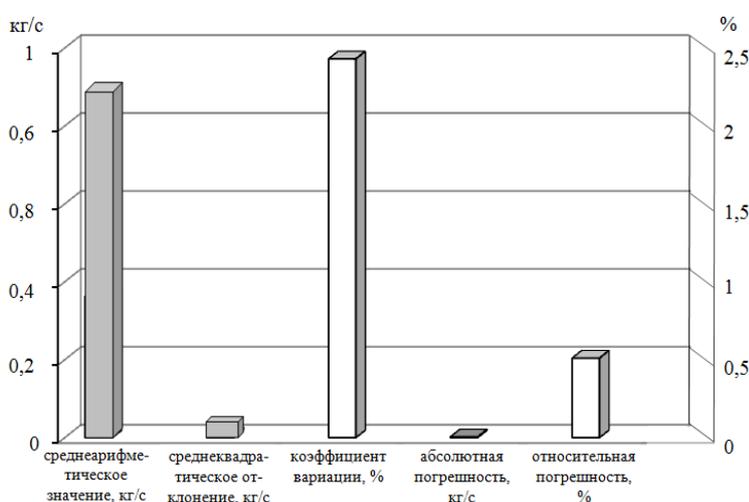


Рис. 5.14. Диаграмма статистических характеристик коэффициента эффективности выделения примесей

Приведенные диаграммы наглядно показывают, что ворохоочиститель с экспериментальными рабочими органами достаточно качественно выполняет технологический процесс сепарации очесанного вороха. Так среднее значение коэффициента сепарации составило 0,93, а коэффициента эффективности выделения примесей 0,906. Это достаточно высокие показатели качества работы ворохоочистителя.



Рис. 5.15. Зерновой ворох получаемый после обработки очесанного вороха ворохоочистителем с экспериментальными решетками

Расчет абсолютной и относительной погрешности определения среднеарифметического значения показал, что абсолютная погрешность равна 0,087 кг/с, а относительная 1,44%, т.е. среднеарифметическое значение определено с достаточной точностью.

Критериями качества работы ворохоочистителя являются коэффициент сепарации и коэффициент эффективности выделения примесей. Статистические характеристики этих показателей были определены и они приведены на диаграммах (рис. 5.13 и рис. 5.14).

В целом следует отметить, что в полевых условиях ворохоочиститель с экспериментальными рабочими органами показал положительные результаты

по производительности и по качественным характеристикам. После обработки получается зерновой ворох достаточно высокого качества (рис. 5.15).

Для получения полной картины производственной проверки ворохоочистителя с экспериментальными рабочими органами сведем все полученные результаты в единую таблицу (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Результаты производственной проверки ворохоочистителя  
с экспериментальными рабочими органами

| Показатели работы ворохоочистителя           | Статистические характеристики       |                                       |                         |                              |                              |
|--|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
|  | среднеарифметическое значение, кг/с | среднеквадратическое отклонение, кг/с | коэффициент вариации, % | абсолютная погрешность, кг/с | относительная погрешность, % |
| Производительность                           | 6,04                                | 0,416                                 | 6,9                     | 0,087                        | 1,44                         |
| Коэффициент сепарации                        | 0,93                                | 0,02                                  | 2,15                    | 0,0042                       | 0,45                         |
| Коэффициент эффективности выделения примесей | 0,906                               | 0,022                                 | 2,43                    | 0,0046                       | 0,51                         |

#### 5.4. Технико-экономическая оценка

Расчет технико-экономической эффективности выполнялся согласно Национального стандарта Украины «Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування» ДСТУ 4397-2005 [118]. При расчете сравнивался модернизированный ворохоочиститель с экспериментальными сепарирующими рабочими органами и серийно выпускаемый ворохоочиститель, т.е. предлагаемый новый вариант и базовый.

Производительность модернизированного ворохоочистителя была определена экспериментальным путем в результате производственной проверки, а производительность серийно выпускаемого ворохоочистителя при сепарации очесанного вороха зерновых колосовых была найдена расчетным путем, согласно формулы, предложенной проф. Кожуховским И. Е. [101]

$$q_F = q_{F1}(2,1 - 0,035b - 0,06w + 0,001bw), \quad (5.43)$$

где  $b$  – засоренность исходного материала в %;

$w$  – влажность;

$q_{F1}$  – удельная производительность решета в кг (час·дм<sup>2</sup>) при  $b=10\%$  и  $w=15\%$ ;

$q_F$  – удельная производительность решета в кг (час·дм<sup>2</sup>).

После подстановки исходных данных фракционного состава очесанного вороха и перевода удельной производительности в кг (с·дм<sup>2</sup>), в производительность машины, выражаемую в т/час, было получено, что расчетная производительность серийного ворохоочистителя при сепарации очесанного вороха зерновых составляет 15,5 т/час. Таким образом, сравнивался экспериментальный ворохоочиститель с производительностью 21,7 т/час и серийный ворохоочиститель с расчетной производительностью 15,5 т/час. Расчет технико-экономических показателей приведен в Приложении М, а полученные результаты в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Экономические показатели новой и базовой машины

| № | Наименования технико-экономических показателей     | Размерность | Значения технико-экономических показателей |                |
|---|--|-------------|--|----------------|
|   |  |             | новой машины                               | базовой машины |
| 1 | 2  | 3           | 4  | 5              |
| 1 | Прямые эксплуатационные затраты, в том числе:      | грн./т      | 10,53                                      | 14,55          |
|   | – затраты на оплату труда обслуживающего персонала | грн./т      | 1,24                                       | 1,73           |
|   | – затраты средств на электроэнергию                | грн./т      | 0,54                                       | 0,75           |
|   | – затраты на капитальный и текущий ремонт          | грн./т      | 2,63                                       | 3,68           |
|   | – затраты на амортизацию                           | грн./т      | 2,19                                       | 3,07           |
|   | – затраты на монтаж, хранение и страхование        | грн./т      | 3,93                                       | 5,27           |

Продовження табл. 5.3

| 1 | 2  | 3      | 4     | 5       |
|---|--|--------|-------|---------|
| 2 | Совокупные затраты на единицу выработки                  | грн./т | 13,16 | 18,18   |
| 3 | Годовой экономический эффект                             | грн.   | –     | 56645   |
| 4 | Годовая прибыль от эксплуатации модернизированной машины | грн.   | –     | 44797,5 |
| 5 | Срок окупаемости   | лет    | –     | 0,54    |

#### Выводы по пятому разделу

Получена регрессионная модель, устанавливающая зависимость качественных показателей функционирования рабочего органа от параметров и режимов его работы, анализ который позволил выявить рациональные их значения:

- диаметр отверстий решет 23 мм;
- удельная подача очесанного вороха  $2,1 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$ ;
- частота колебаний рабочего органа  $45\text{с}^{-1}$ .

В результате производственной проверки ворохоочистителя, оснащенного экспериментальными рабочими органами установлено, что среднее значение производительности составляет  $6,04 \text{ кг/с}$ , что соответствует  $21,7 \text{ т/ч}$ , при этом математическое ожидание коэффициента сепарации равно  $0,93$ , а коэффициент эффективности выделения примесей  $0,906$ , что позволяет получить экономический эффект от внедрения данного рабочего органа в размере  $56645 \text{ грн.}$  в год, при этом срок окупаемости дополнительных капиталовложений составил  $0,54$ .

## ВЫВОДЫ

1. В результате исследований фракционного состава установлено что: очесанный ворох зерновых колосовых представляет собой четырехкомпонентную смесь, состоящую из свободного зерна, соломы, половы и оборванных колосков, причем математическое ожидание содержания свободного зерна в очесанном ворохе пшеницы составляет 53,77%, соломы 33,2%, половы 8,86%, оборванных колосков 4,13%, а среднее значение длины, ширины и толщины зерновки 6,7 мм, 2,33 и 2,78 мм, в тоже время средняя длина соломины равна 254 мм, а оборванного колоса 88,9 мм. Полученные результаты дают возможность определить вероятность просеивания свободного зерна через слои очесанного вороха.

2. Определен динамический коэффициент трения, скольжения, который численно равен при трении соломы по очесанному вороху 0,33, очесанного вороха по очесанному вороху – 0,39, соломы по металлу 0,26 и очесанного вороха по металлу, который был использован при моделировании движения соломины по решетку.

3. Построена математическая модель просеивания зерна через слой очесанного вороха, которая устанавливает зависимость между вероятностью прохождения зерна сквозь слой вороха и расстоянием между соломинами с учетом взаимного расположения соломин и отношением размеров зерновки к расстоянию между соломинами, позволяющая установить, что:

– в случае, когда расстояние между соломинами больше длины зерновки и диаметра соломины, вероятность просеивания зерновки составляет 0,875 при условии, что расстояние между соломинами равно 10 мм;

– если расстояние между соломинами меньше суммы диаметра соломины и длины зерновки и одновременно больше суммы диаметра соломины и ширины зерновки, то вероятность прохождения зерновки через соломины находится в пределах 0,85...0,877 при расстоянии между соломинами 6,0...8,05 мм;

– при условии, что расстояние между соломинами меньше суммы диаметра

соломины и ширины зерновки вероятность просеивания как при горизонтальном расположении зерновки, так и при вертикальном равна нулю.

4. Разработана методика покомпонентной процедуры анализа функционирования сепарирующего рабочего органа, которая дала возможность теоретически обосновать рациональные значения параметров и режимов его работы, а именно:

- угол наклона сепарирующего рабочего органа  $\alpha = 7^\circ$ ;
- угол направленности колебаний  $\beta = 20^\circ$ ;
- амплитуда колебаний  $r = 0,01$  м;
- частота колебаний  $\omega = 45$  с<sup>-1</sup>.

5. В результате экспериментальных исследований получена регрессионная модель, устанавливающая зависимость качественных показателей функционирования рабочего органа от параметров и режимов его работы, анализ которой позволил выявить рациональные их значения:

- диаметр отверстий решет 23 мм;
- удельная подача очесанного вороха 2,1 кг/с·м<sup>2</sup>;
- частота колебаний решет 45 с<sup>-1</sup>.

6. В результате производственной проверки ворохоочистителя, оснащенного экспериментальными рабочими органами установлено, что среднее значение производительности составляет 21,7 т/ч, при этом математическое ожидание коэффициента сепарации равно 0,93, а коэффициента эффективности выделения примесей 0,906. Это позволяет получить экономический эффект в размере 56645 грн.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. London J. C. Encuclopedia of Agriculture / J. C. London || Pubished dy Longman, Brown, Green Longmans and Roberts, 1858.
2. Ledesta A. F. The combine of today was Born on Roman farm | A. F. Ledesta // Power Farming. – 1955. – Voll 15. – P. 146-148.
3. Погорелый Л. Колосоуборки – «стрипперы-очесыватели» – фата-моргана или новая эра в зерноуборке? / Л. Погорелый, С. Коваль // Сб. док. междунар. науч.-технич. конф. «Перспективные технологии уборки зерновых культур, риса и семян трав» // ТГАТА, Мелитополь, 2003. – Вып. 16. – С. 31-57.
4. Арцыбашев Д. Д. Современные вопросы с-х. механики. Колосоуборки (стрипперы, хедеры) / Д. Д. Арцыбашев. – С-Пб, 1908. – 32 с.
5. Арцыбашев Д. Д. Комбайны, их современные конструкции и значение / Д. Д. Арцыбашев. – М. – Л.: Сельхозгиз. 1930 – 133 с.
6. The Grain Harvesters Graeme Quack and Wesley Buchele // American Society of Agricultural Engineers. – Michigan, USA, 1978. – 269 p.
7. Пискунов Д. И. «О стриппере» / Д. И. Пискунов // Южно-Русская с.-х. газета, 1911. – №43.
8. Известия Бюро по с.-х. механике. – 1913. – Вып. 8. – 877 с.
9. Zazsson A. M. Reparskoerdaren // Teknik I jord och skod. – 1989. – №1. – S. 12-13.
10. Шабанов П. А. Механико-технологические основы обмолота зерновых культур на корню: дис... докт. техн. наук / П. А. Шабанов. – Мелитополь – 1988. – 336 с.
11. Разработать рабочие органы очесывающего типа машины для уборки риса, обеспечивающие пропускную способность 3 кг/с на одном метре ширины захвата: отчет по НИР / МИМСХ; Руководитель П. А. Шабанов. – Тема 0153-Х – Мелитополь, 1981. – 23 с.
12. Разработать рабочие органы очесывающего типа машины для уборки риса: отчет по НИР / МИМСХ; Руководитель П. А. Шабанов. – Тема 0-185Х. –

Мелитополь, 1982. – 29 с.

13. Разработать и внедрить перспективную технологию уборки зерновых культур в хозяйствах Приазовского района, обеспечивающую повышение производительности в 1,5...2,0 раза, снижение потерь зерна в 2...3 раза; отчет о НИР/МИМСХ; Рук. П. А. Шабанов. – Тема 0270-Х; №ГР01860043979. – Мелитополь, 1988. – 44 с.

14. Исследование и разработка экспериментальной рисоуборочной машины, основанной на принципе очесывания метелок риса на корню: отчет по НИР / МИМСХ; Руководитель П. А. Шабанов. – Тема 153Х. – Мелитополь, 1980. – 36 с.

15. Данченко Н. Н. Обоснование параметров щеточного устройства для очесывания метелок риса на корню: автореф. дис... канд. техн. наук / Н. Н. Данченко. – Челябинск, 1983. – 15 с.

16. Разработать и внедрить перспективную технологию уборки зерновых культур в хозяйствах Приазовского района, обеспечивающую повышение производительности в 1,5...2,0 раза, снижение потерь зерна в 2...3 раза: отчет о НИР / МИМСХ; Рук. Н. Н. Данченко. – Тема 0270-Х; №ГР01860043979. – Мелитополь, 1987. – 82 с.

17. Гончаров Б. И. Исследование рабочего процесса очесывающего устройства для обмолота риса на корню с целью уменьшения потерь зерна: дис... канд. техн. наук / Б. И. Гончаров. – М., 1982. – 217 с.

18. Повиляй В. М. Исследование процесса уборки селекционных посевов риса методом очесывания метелок на корню и обоснование параметров очесывающего устройства: дис... канд. техн. наук / В. М. Повиляй. – Краснодар, 1980. – 165 с.

19. Разработать и внедрить перспективную технологию уборки зерновых культур в хозяйствах Приазовского района, обеспечивающую повышение производительности в 1,5...2,0 раза, снижение потерь зерна в 2...3 раза: отчет о НИР / МИМСХ; Рук. В. Н. Цыбульников – Мелитополь, 1986. – 67 с.

20. Голубев И. К. Обоснование основных параметров и режимов работы

двухбарабанного устройства для очеса риса на корню: дис... канд. техн. наук / И. К. Голубев. – М., 1989. – 201 с.

21. Исследование процесса обмолота на корню: отчет по НИР / ВИСХОМ. – М., 1951. – 37 с.

22. Исследование процесса обмолота зерновых культур на корню: отчет по НИР / ВИСХОМ. – М., 1953. – 32 с.

23. Обґрунтування параметрів роботи жнивarki обчісуyючого типу ЖОН-4 / С. Коваль і др. // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. / УкрНД і ПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке. – С. 54-59.

24. Whole crop Harvesting is this wan // Power Farming. – 1979. – vol 57. – P. 11-14.

25. Horio H. Kawamura N. A basice experiment of atrippind tupe Standind drain harvester. – Japan, 1972. – vol. 34. – P. 44-45.

26. Гольцяпин В. Я. Уборка зерновых культур и риса методом очеса / В. Я. Гольцяпин // Механиз. и электриф. АПК: научно-технические достижения и тенденции развития. – М., 1991. – Вып. 1. – С. 4-10.

27. Аблогин Н. Н. Обоснование технологической схемы и параметров устройства для сепарации очесанного вороха риса: дис... канд. техн. наук / Н. Н. Аблогин. – Мелитополь, 1997. – 215 с.

28. Леженкин А. Н. Перспективная технология уборки зерновых для фермерских и крестьянских хозяйств Юга Украины / А. Н. Леженкин // Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК: международ. науч. конф. – Ярославль, 2003. – Ч. III. – С. 28-29.

29. Кушнарeв А. С. Энергосберегающая технология уборки зерновых для фермерских и крестьянских хозяйств / А. С. Кушнарeв, А. Н. Леженкин // Перспективные технологии уборки зерновых культур, риса и семян трав: сб. докл. междунар. научн.-технич. конф. – Мелитополь, 2003. – С. 17-21.

30. Леженкин А. Уборка зерновых методом очесывания / А. Леженкин // Сельский механизатор. – 2004. – №11. – С. 27.

31. Леженкин А. Н. Энергетическая оценка стационарной технологии уборки зерновой части урожая / А. Н. Леженкин // Механизация и электриф. сел. х-ва. – 2007. – №2. – С. 5-7.

32. Леженкин А. Н. Формирование стационарной технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств Украины / А. Н. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2006. – [Вип. 40]. – С. 195-204.

33. Леженкин А. Н. Методология формирования энерго- и ресурсосберегающей технологии уборки зерновых культур в условиях фермерских хозяйств (на примере Украины): дис. ... докт. техн. наук / А. Н. Леженкин. – М., 2008. – 503 с.

34. Леженкин И. А. Электрификация и пути снижения энергозатрат уборочного процесса / И. А. Леженкин // Матеріали VI Міжнародної конференції пам'яті І. І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» (10-14 червня 2015). – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – С. 101-102.

35. Исследование технологии уборки риса методом очеса его на корню: отчет по НИР / МИМСХ; Рук. П. А. Шабанов. – тема 32В. – Мелітополь, 1975. – 98 с.

36. Шкиндер В. Н. Обоснование параметров и разработка молотильно-сепарирующего устройства перспективных рисоуборочных комбайнов: дис... канд. техн. наук / В. Н. Шкиндер. – Мелітополь, 1991. – 226 с.

37. Леженкін О. М. Аналіз виробничої перевірки збиральної машини для фермерських господарств / О. М. Леженкін, С. М. Григоренко // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2007. – Вип. 7, т. 2. – С. 194-202.

38. Цыбульников В. Н. Результаты исследований уборочной машины / В. Н. Цыбульников, А. Н. Леженкин, В. В. Масленников // Совершенствование рабочих органов машин и повышение эффективности их технологических процессов в растениеводстве / ЛСХИ. – Л., 1991. – С. 34-37.

39. Разработать очесывающее приспособление на базе энергосредства КПС-5Г для обмолота зерновых культур на корню: отчет о НИР / МИМСХ;

рук. В. Н. Цыбульников [Исп. А. Н. Леженкин и др.] – Тема 030-Х. – №ГР01860043979. – Мелитополь, 1989. – 26 с.

40. Леженкин А. Н. Результаты полевых испытаний полевой уборочной машины для фермерских и крестьянских хозяйств / А. Н. Леженкин, С. М. Григоренко // Техніка АПК. – 2007. – №3. – С. 30-32.

41. Данченко Н. Н. Особенности физико-механических свойств очесанного вороха риса и технологические требования на его доработку / Н. Н. Данченко, В. Н. Шкиндрер // Совершенствование технологических процессов и рабочих органов с.-х. машин. Сборник научных трудов УСХА. – К., 1989. – С. 63-68.

42. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука, 1979. – 942 с.

43. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений / ВИСХОМ. – М.: Колос, 1970. – 422 с.

44. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений / М. Ф. Бурмистрова, Т. К. Комолькова, Н. В. Клемм [и др.]. – М.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1956. – 343 с.

45. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / О. М. Царенко, Д. Г. Войтюк, В. М. Швайко [та ін.]; за ред. С. С. Яцука. – К.: Мета, 2003. – 448 с.

46. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д. Г. Войтюк, В. О. Дубровін, Т. Д. Іщенко та ін.; За ред. Д. Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2004. – 544 с.

47. Блочно-модульная технологическая линия очистки продовольственного зерна / А. М. Кутюков [и др.] // Земледелие. – 2003. – №3. – С. 28-29.

48. Алагуров В. В. Современное конструкторско-технологические решения в зерноочистительном оборудовании / В. В. Алагуров [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2002. – №2. – С. 6-9.

49. Голованов А. Н. Новые машины для послеуборочной обработки зерна / А. Н. Голованов // Земледелие. – 2003. – №4. – С. 24-25.

50. Льготчиков В. Самая надежная и простая / В. Льготчиков // Сельский

механизатор. – 2003. – №9. – С. 10.

51. Муродов Ф. Н. Высокоэффективный ворохоочиститель / Ф. Н. Муродов, Д. Н. Холматова // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. – 2002. – №8. – С. 27-28.

52. Интенсификация процесса сепарации зерна в многоцелевой воздушно-решетной зерноочистительной машине ОЗС-50/25/10 / Н. Ф. Турищев [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2002. – №10. – С. 13-15.

53. Гехтман А. А. Машина МПО для предварительной очистки зерна / А. А. Гехтман, В. А. Актюхин // Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – №5. – С. 24.

54. Мачихина Л. И. Очистка риса-зерна / Л. И. Мачихина. – М.: Колос, 1981. – 125 с.

55. Романенко В. К. Исследование процесса очистки вороха риса-зерна на установке скальператорного типа / В. К. Романенко // Научные труды ВНИИЗ. – Вып. 80. – М., 1975. – С. 119-127.

56. Schwara H. Ein leistungsfähiger siebsichter zur Gerreidereinigung / H. Schwara, W. Kutter. – Bgrartechnik, 1980, Bd. 30, H. 11, S. 495...497.

57. Недев Н. Техничко-економическа целесобразност от следкомбайновата обработка на зърното в условиято ДСО очриени храни / Н. Недев, С. Оцив // Селскотопанска техника, №8. – София, 1974. – С. 26...32.

58. Пат. кор. мод. 92045. Україна. МПК В 07 В 1/22 (2006.01) Сепаратор обчисаного вороху зернових / І. О. Леженкін (Україна) №u201402219; под. 05.03.2014; надр. 25.07.2014, Бюл. №14.

59. Леженкін І. Доробка обчисаного вороху зернових на фураж / І. Леженкін // Техничко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України; зб. наукових праць Українського наукового-дослідного інституту випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва ім. Леоніда Погорілого. – Дослідницьке, 2012. – Вип. 16 (30). – Книга 1 «Сільськогосподарська техніка XXI: конструювання, випробування, прогнозування». – С. 437-440.

60. А.с. 1766310 СССР, МКИ А.01D41/08. Комбайн для уборки зерновых культур на корню / Н. Н. Данченко, В. Н. Шкиндер, Н. Н. Аблогин, Н. Ф. Стоев, А. Ф. Бинчев, П. А. Шабанов, В. Н. Цыбульников, Н. К. Самофалов, А. В. Авдеев, Г. В. Ануфриев, А. И. Русанов. – заявл. 06.02.89; опубл. 07.10.92; Бюл. №37.

61. Шкиндер В. Н. Обоснование параметров молотильно-сепарирующего устройства рисоуборочного комбайна очесывающего типа / В. Н. Шкиндер // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции по современным проблемам земледельческой механизации. 20-22 июня 1989 г. – Мелитополь, 1989. – С. 56-57.

62. Горячкин В. П. Собрание сочинений / В. П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – С. 183-185.

63. Ульрих Н. Н. Новое в области очистки и сортирования семян / Н. Н. Ульрих. – М.: Сельхозиздат, 1937. – 69 с.

64. Летошнев М. Н. Сельскохозяйственные машины / М. Н. Летошнев. – М.-Л.: Сельхозиздат, 1955. – 735 с.

65. Кропп Л. И. Обработка и хранение семенного зерна / Л. И. Кропп. – М.: Колос, 1974. – 176 с.

66. Кубышев В. А. Основные направления развития индустриальной технологии уборки и обработки зерновых культур в Сибири / В. А. Кубышев // Научн.-техн. бюл. СибНИИМЕСХ. – Новосибирск, 1977. – Вып. 4-5. – С. 3-17.

67. Киреев М. В. Результаты исследований высокопроизводительного скальператора для очистки зерна / М. В. Киреев, Е. В. Михайлов // Проблемы механизации сельскохозяйственного производства: всесоюз. науч.-техн. конф., 19-21 ноября 1985 г.: ВИМ, – М., 1985. – С. 86.

68. Павловский Г. Т. Техника и технология послеуборочной обработки зерна: дис. ... д-ра техн. наук в виде научного доклада / Г. Т. Павловский. – Саратов, 1968. – 83 с.

69. Волик Р. Н. Технологическая надежность зерноочистительных машин и агрегатов (на примере южных районов РСФСР): автореф. д-ра техн. наук / Р. Н. Волик. – Л., 1983. – 40 с.

70. Турбин Б. Г. Сельскохозяйственные машины / Б. Г. Турбин, А. Б. Лурье, С. М. Григорьев, Э. М. Иванович, С. В. Мельников. – Л.: Машиностроение, 1967. – 563 с.

71. Михайлов Є. В. Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України / Є. В. Михайлов. – Мелітополь: Вид-во «Люкс», 2012. – 260 с.

72. Кожуховский И. Е. Механизация очистки и сушки зерна / И. Е. Кожуховский, Г. Т. Павловский. – М.: Колос, 1968. – 348 с.

73. Тищенко Л. Н. Колебания зерновых потоков на виброрешетах / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Х.: «Міськдрук», 2012. – 267 с.

74. Травина Г. Е. Разработка и исследование рабочего процесса очистки зернового вороха наружной поверхностью цилиндрического решета: дис. ... канд. техн. наук / Г. Е. Травина. – Л., 1972. – 148 с.

75. Ерошенко Л. И. Изыскание и исследование высокопроизводительных цилиндрических решет для очистки зерна на зерноочистительно-сушильных пунктах (в условиях Северо-западной зоны РСФСР): дис. ... канд. техн. наук / Л. И. Ерошенко. – Л., 1974. – 185 с.

76. Михайлов Е. В. Методы и средства интенсификации процесса предварительной очистки зерна повышенной влажности: дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Михайлов. – Л., 1984. – 233 с.

77. Леженкин А. Н. Повышение эффективности работы ворохоочистителя за счет интенсификации его технологического процесса: дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Леженкин. – Л., 1989. – 164 с.

78. Галенко М. Д. и др. Обоснование индустриально-поточной комбайновой и безкомбайновой технологии уборки зерновых культур / М. Д. Галенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – №8. – С. 4-6.

79. Смирнов Н. А. Влияние производственно-технологических условий на эффективность технологии уборки по схеме «Невейка» / Н. А. Смирнов // Интенсификация процессов уборки зерновых культур / ВИМ. – 1987. – Т. 113. – С. 118-127.

80. Кравчук В. Результати польових випробувань експериментального очисника обчисаного вороху зернових / В. Кравчук, І. Леженкін, І. Іваненко // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України; зб. наукових праць Українського науково-дослідного інституту випробування техніки і технологій для сільсько-господарського виробництва ім. Леоніда Погорілого. – Дослідницьке, 2013. – Вип. 17 (31). – Книга 1 «Сільськогосподарська техніка ХХІ: конструювання, випробування, прогнозування». – С. 313-320.

81. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Изд. физико-математической литературы, 1962. – 564 с.

82. Гатаулин А. М. Система прикладных статистико-математических методов доработки экспериментальных данных в сельском хозяйстве / А. М. Гатаулин. – М.: Изд. МСХА, 1992. – Ч. 1. – 160 с.

83. Боровков А. А. Математическая статистика / А. А. Боровков. – М.: Наука, 1984. – 472 с.

84. Пат. кор. мод. 9816. Україна. МПК А 01 D 41/08 (2006.01) Причіпна збиральна машина / І. О. Леженкін (Україна), С. М. Григоренко (Україна) №u201408537; под. 28.07.2014; надр. 27.04.2015, Бюл. №8.

85. Леженкин И. А. Статистический анализ содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы / И. А. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2013. – Вип. 13, т. 2. – С. 183-189.

86. Леженкин И. А. Анализ содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы / И. А. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 12, т. 5. – С. 149-154.

87. Леженкин И. А. Статистическая модель содержания половы в очесанном ворохе озимой пшеницы / И. А. Леженкин // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. – Харків, 2013. – Вип. 132. Технічні системи і технології тваринництва. – С. 355-360.

88. Леженкин И. А. Математическая модель содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы / И. А. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь,

2013. – Вип. 13, т. 3. – С. 57-62.

89. Кюрчев С. В. Статистические модели механико-технологических свойств очесанного вороха озимой пшеницы / С. В. Кюрчев, И. А. Леженкин // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин; загальнодерж. міжвідомч. науково-техніч. зб. – Кіровоград, 2013. – Вип. 43. – Ч. 1 – С. 297-302.

90. Кюрчев С. В. Статистичний аналіз біометричних характеристик компонентів обчисаного вороху зернових / С. В. Кюрчев, І. О. Леженкін // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2014. – Вип. 14, т. 2. – С. 31-36.

91. Лурье А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 376 с.

92. Леженкин И. А. Статистическая модель плотности очесанного вороха озимой пшеницы / И. А. Леженкин // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин: загальнодерж. міжвідомч. науково-техніч. зб. – Кіровоград, 2012. – Вип. 42. – Ч. II. – С. 202-207.

93. Павловский М. А. Теоретическая механика: учебное пособие для студентов техн. вузов / М. А. Павловский, Т. В. Путьята. – К.: Вища школа, 1985. – 328 с.

94. Пат. кор. мод. 93931. Україна. МПК В 07 В 1/22 (2006.01) Очисник обчисаного вороху / І. О. Леженкін (Україна) №u201403942; под. 14.02.2014; надр. 27.10.2014, Бюл. №20.

95. Кендол М. Геометрические вероятности: Пер. с англ. / М. Кендол, П. Моран. – М.: Мир, 1972. – 273 с.

96. Buffon G. Essai d'arithmetique morale. Supplement «l'histoire Naturelle», v. 4, 1977.

97. Леженкин И. А. Математическая модель сепарации зерна через слой очесанного вороха / И. А. Леженкин // Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК: матер. міжнар. наук.-практ. конф., м. Мелітополь; 7-14 квітня 2015 року. – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – Т. 4. Технічні науки (Ч. 2). – С. 47-49.

98. Леженкин И. А. Усовершенствование уравнений движения компонен-

тов очесанного вороха зерновых на поверхности плоского решета / И. А. Леженкин // Наука. Многопрофильный научно-производственный журнал Констанайского инженерно-экономического университета им. М. Дулатова, Костанай, Республика Казахстан, Т. 1. – С. 181-185.

99. Тончев В. Д. Комбинаторные конфигурации: блок-схемы, коды, графы / В. Д. Тончев. – К.: Высшая школа, 1988. – 155 с.

100. Липский В. Комбинаторика для программистов / В. Липский. – М.: Мир, 1988. – 213 с.

101. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины. Конструкции, расчет и проектирование / И. Е. Кожуховский. – 2 изд. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.

102. Гладков И. Г. Зерноочистительные машины / И. Г. Гладков. – М.: Машгиз, 1961. – 368 с.

103. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1967. – 830 с.

104. Сачков В. Н. Комбинаторные методы дискретной математики / В. Н. Сачков. – М.: Наука, 1977. – 319 с.

105. Холл М. Комбинаторика / М. Холл. – М.: Мир, 1970. – 375 с.

106. Никольский С. М. Курс математического анализа. Т. 1 / С. М. Никольский. – М.: Наука, 1975. – 679 с.

107. Кудрявцев Л. Д. Математический анализ. Т. 1. – М.: Высшая школа, 1980. – 788 с.

108. Пособие по математике для поступающих в вузы: Учеб. пособие / А. Д. Кутасов, Т. С. Пигалкина, В. И. Чехлов, Т. Х. Яковлева. Под ред. Г. Н. Яковлевой. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1988. – 720 с.

109. Рубцов Н. А. Теоретическое обоснование угла наклона сепарирующего рабочего органа для обработки очесанного вороха зерновых / Н. А. Рубцов, И. А. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2015. – Вип. 15, т. 4. – С. 196-205.

110. Кожуховский И. Е. Исследование работы плоских решет при больших

загрузках / И. Е. Кожуховский // Труды ВИМ, т. 27. – 1960. – С. 132-171.

111. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

112. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 60 с.

113. Барабашук В. И. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко; под ред. Б. П. Креденцер. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.

114. Vox G. E. P. Home New. The Level for the Study ob Quantitative Variables / G. E. P. Vox, D. W. Behnken // Technometrics. – 1960. – V. 2. – №4. – P. 127-132.

115. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 165 с.

116. Рубцов Н. А. Исследование на наибольшее и наименьшее значение функций отклика качественных показателей работы экспериментальных решет при очистке очесанного вороха зерновых / Н. А. Рубцов, И. А. Леженкин // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2015. – Вип. 15, т. 4. – С. 71-85.

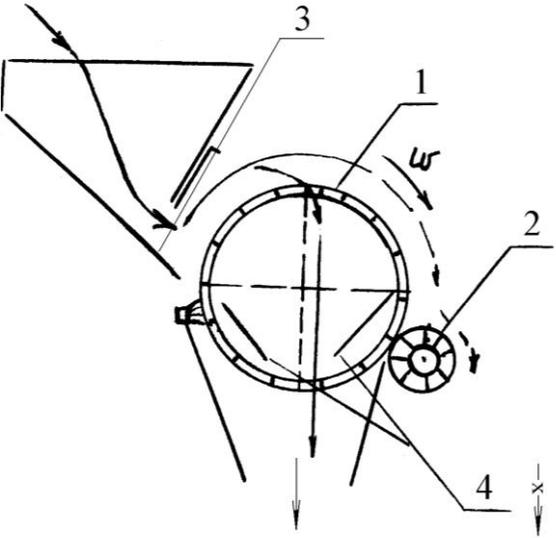
117. Леженкин И. А. Зависимость качественных показателей работы экспериментальных решет от удельной подачи очесанного вороха / И. А. Леженкин // Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільської техніки» (5-6 листопада 2015). – Кіровоград: КНТУ, 2015. – С. 75-77.

118. Національний стандарт України «Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування» ДСТУ 4397-2005.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

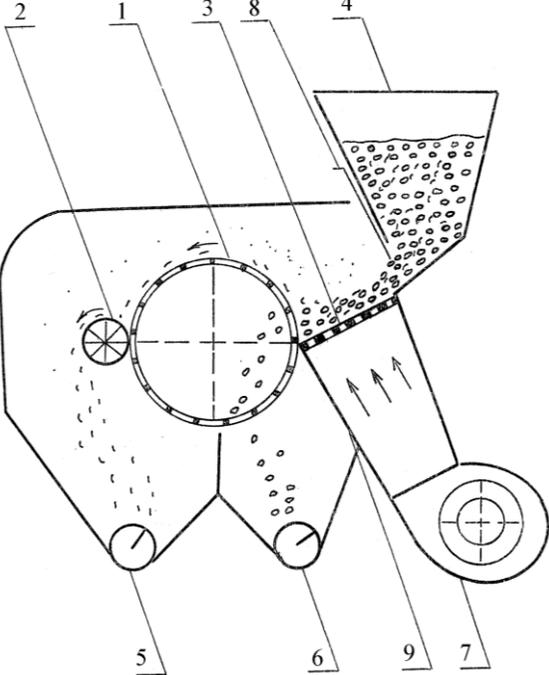
## Анализ исследований скальператорных рабочих органов

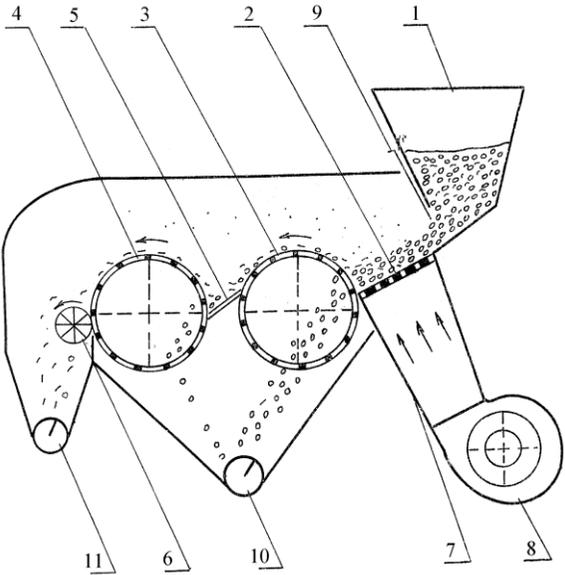
| № | Автор         | Технологическая схема экспериментальных установок   | Технологический процесс  | Методы исследований   | Полученные результаты  | Литературный источник |
|---|---------------|---|--|---|--|-----------------------|
| 1 | 2             | 3   | 4  | 5   | 6  | 7                     |
| 1 | Травина Г. Е. |  <p>1 – цилиндрическое решето; 2 – очистительная щетка; 3 – бункер; 4 – направлятели зерна установленные внутри решета</p> | Слой зерна из бункера питателя поступает на поверхность вращающегося решета. Основная часть зерен и мелких примесей идет проходом через отверстия решета, а крупные примеси идут сходом, их снимает очистительная щетка и направляет в приемник отходов. | В основу теоретических исследований положены методы теоретической механики. | В результате исследований установлена критическая скорость вращения решета, определены условия выделения крупных примесей, рассмотрено относительное движение зерна по поверхности решета, обосновано положение очистительной щетки. | [74]                  |

Продолжение табл. П.1

| 1 | 2              | 3  | 4   | 5   | 6  | 7           |
|---|----------------|--|---|---|--|-------------|
| 2 | Ерошенко Л. И. | <p>— — зерновой материал; —X— — грубые и крупные примеси; 1 – первое цилиндрическое решето; 2 – очистительная щетка; 3 – бункер; 4 – направители зерна; 5 – второе цилиндрическое решето</p> | <p>Зерновой ворох из бункера 3 поступает на первое цилиндрическое решето 1. Зерно проходит сквозь отверстия решета, а крупные примеси и часть зерна, которое не прошло через отверстия первого решета идут на второе решето 5, где зерно идет проходом, а крупные примеси сходят.</p> | <p>Экспериментальные исследования технологического процесса ворохоочистителя.</p> | <p>Последовательная работа цилиндрических решет дает возможность увеличить подачу зернового вороха и тем, самым увеличить производительность и уменьшить потери.</p> | <p>[75]</p> |

| 1 | 2              | 3   | 4   | 5  | 6   | 7           |
|---|----------------|---|---|--|---|-------------|
| 3 | Михайлов Е. В. | <p>1 – цилиндрическое решето; 2 – очистительная щетка; 3 – аэропитатель; 4 – лоток-интенсификатор; 5 – бункер; 6 – вентилятор</p> | <p>Зерновой ворох из бункера 5 поступает на возду хораспределительную решетку, аэропитателя 3, который под действием струи воздуха перемещается к лотку интенсификатору 4 и цилиндрическому решету 1. По мере перемещения по аэропитателю выделяются легкие примеси. На лотке-интенсификаторе резко интенсифицируются процессы сегрегации, воздушной сепарации и выделения частиц через отверстия цилиндрического решета 1. Крупные соломистые частицы идут сходом, а зерно проходит.</p> | <p>Методы планирования многофакторных экспериментов.</p> | <p>Получена математическая модель, в виде трех уравнений регрессии. На основании данной модели автор обосновал рациональные значения факторов, влияющих на технологический процесс предварительной очистки зернового вороха. При работе такого ворохоочистителя удельная производительность может достигать 5,0...6,0 т/ч·дм.</p> | <p>[76]</p> |

| 1 | 2              | 3  | 4  | 5  | 6  | 7    |
|---|----------------|--|--|--|--|------|
| 4 | Леженкин А. Н. |  <p>1 – цилиндрическое решето; 2 – ротационная щетка; 3 – аэролоток; 4 – бункер; 5, 6 – шнеки; 7 – вентилятор; 8 – регулируемая заслонка; 9 – воздухоподводящий канал</p> | <p>Из бункера 4 зерновой ворох через отверстие, которое регулируется заслонкой 8 поступает на воздухораспределительную решетку аэролотка 3. При движении по лотку легкие примеси выдуваются воздушным потоком, а грубые соломистые примеси перемещаются в верхний слой зернового потока. На цилиндрическом решете зерно выделяется в проход, а крупные примеси в сход.</p> | <p>Построение математических моделей технологического процесса методом идентификации. Оценка эффективности функционирования, виде вероятности сохранения допуска на выполнение технологической операции. Методы статистической динамики.</p> | <p>Получены математические модели функционирования ворохоочистителя с одним решетом в виде линейных уравнений регрессии и на основании их анализа обоснованы режимы работы однобарабанного ворохоочистителя.</p> | [77] |

| 1 | 2              | 3   | 4   | 5  | 6  | 7    |
|---|----------------|---|---|--|--|------|
| 5 | Леженкин А. Н. |  <p>1 – цилиндрическое решето; 2 – аэролоток;<br/>3, 4 – цилиндрические решета; 5 – плоская пассивная щетка; 6 – цилиндрическая ротационная щетка; 7 – воздухоподводящий канал; 8 – вентилятор; 9 – регулируемая заслонка; 10, 11 – шнековые транспортеры</p> | <p>Зерновой ворох из бункера 1 поступает на аэролоток 2, воздушным потоком выделяются легкие примеси. На первом решете большая часть зерна идет проходом, а крупные примеси и часть зерна, которая не прошла через отверстия первого решета идут сходом. Плоская щетка снимает сходовую фракцию, и она направляется на второе решето, где зерно проходит через отверстия решета, а крупные примеси идут сходом. Очищенное зерно выводится шнеком 10, а грубые соломистые примеси шнеком 11.</p> | <p>При исследовании использовались методы статистической динамики.</p> | <p>Получены статистические характеристики работы ворохоочистителя с двумя решетами. Установлено, что с двумя цилиндрическими решетами ворохоочиститель имеет меньше, чем с одним, однако все равно общий уровень потерь превышает допустимый. Наибольший эффект достигнут при работе ворохоочистителя с потереснижающими устройствами.</p> | [77] |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица П.2

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы

|   |        |      |       |      |       |        |       |      |
|---|--------|------|-------|------|-------|--------|-------|------|
| Граница классов, %                                      | 39     | 45   | 51    | 57   | 63    | 69     | 75    | 81   |
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1      | 15   | 17    | 9    | 5     | 2      | 1     |      |
| Частота, $P_i$  | 0,02   | 0,3  | 0,34  | 0,18 | 0,1   | 0,04   | 0,02  | 0,02 |
| $P_i / \lambda$   | 0,0033 | 0,05 | 0,056 | 0,03 | 0,016 | 0,0066 | 0,003 |      |

Таблица П.3

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения содержания свободного зерна в очесанном ворохе озимой пшеницы

|                    |       |      |       |       |       |       |        |        |
|--------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Граница классов, % | 39    | 45   | 51    | 57    | 63    | 69    | 75     | 81     |
| $f(\eta_s)$        | 0,009 | 0,03 | 0,047 | 0,046 | 0,026 | 0,008 | 0,0014 | 0,0001 |

Таблица П.4

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы

|   |       |      |      |      |      |      |      |      |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Граница классов, %                                      | 1,2   | 2,14 | 3,08 | 4,02 | 4,96 | 5,9  | 6,84 | 7,8  |
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 4     | 9    | 14   | 9    | 7    | 6    | 1    |      |
| Частота, $P_i$  | 0,08  | 0,18 | 0,28 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,02 | 0,02 |
| $P_i / \lambda$   | 0,085 | 0,19 | 0,3  | 0,19 | 0,15 | 0,13 | 0,02 |      |

Таблица П.5

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения содержания оборванных колосков в очесанном ворохе озимой пшеницы

|                    |       |      |      |      |      |      |      |       |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Граница классов, % | 1,2   | 2,14 | 3,08 | 4,02 | 4,96 | 5,9  | 6,84 | 7,8   |
| $f_i(\eta_k)$      | 0,036 | 0,11 | 0,22 | 0,28 | 0,24 | 0,14 | 0,05 | 0,009 |

Продолжение к приложению Б

Таблица П.6

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы

| Граница классов, %   | 5,0   | 6,3  | 7,6  | 8,9  | 10,2  | 11,5  | 12,8 | 14,1 |
|--|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| Количество измерений<br>в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1     | 6    | 11   | 12   | 10    | 8     | 2    |      |
| Частота, $P_i$   | 0,06  | 0,2  | 0,34 | 0,2  | 0,10  | 0,06  | 0,04 |      |
| $P_i / \lambda$  | 0,046 | 0,15 | 0,26 | 0,15 | 0,077 | 0,046 | 0,03 |      |

Таблица П.7

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы

| Граница классов | 5,0   | 6,3  | 7,6  | 8,9  | 10,2 | 11,5 | 12,8 | 14,1  |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $f_i(\eta_n)$   | 0,034 | 0,09 | 0,16 | 0,19 | 0,16 | 0,09 | 0,03 | 0,007 |

Таблица П.8

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы

| Граница классов, %   | 12    | 18    | 24   | 30   | 36    | 42    | 48    | 54 |
|--|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|----|
| Количество измерений<br>в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1     | 4     | 9    | 12   | 13    | 10    | 1     |    |
| Частота, $P_i$   | 0,02  | 0,08  | 0,18 | 0,24 | 0,26  | 0,20  | 0,02  |    |
| $P_i / \lambda$  | 0,003 | 0,013 | 0,03 | 0,04 | 0,043 | 0,033 | 0,003 |    |

Таблица П.9

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
содержания соломы в очесанном ворохе озимой пшеницы

| Граница классов, % | 12     | 18     | 24    | 30    | 36    | 42    | 48    | 54     |
|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $f(\eta_s)$        | 0,0016 | 0,0086 | 0,026 | 0,046 | 0,047 | 0,028 | 0,009 | 0,0018 |

Продолжение к приложению Б

Таблица П.10

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
длины зерновки озимой пшеницы

| Граница классов   | 5,2  | 5,6  | 6,0  | 6,4  | 6,8  | 7,2  | 7,6  | 8,0 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1    | 2    | 12   | 14   | 12   | 7    | 2    |     |
| Частота, $P_i$  | 0,02 | 0,04 | 0,24 | 0,28 | 0,24 | 0,14 | 0,04 |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,05 | 0,1  | 0,6  | 0,7  | 0,6  | 0,35 | 0,1  |     |

Таблица П.11

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
длины зерновки озимой пшеницы

| Граница классов, мм | 5,2  | 5,6 | 6,0 | 6,4 | 6,8 | 7,2 | 7,6 | 8,0  |
|---------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $f(l_s)$            | 0,03 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | 0,2 | 0,03 |

Таблица П.12

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
толщины зерновки озимой пшеницы

| Граница классов   | 1,6  | 1,8 | 2,0  | 2,2 | 2,4 | 2,6  | 2,8  | 3,0 |
|---|------|-----|------|-----|-----|------|------|-----|
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1    | 5   | 11   | 15  | 10  | 7    | 1    |     |
| Частота, $\sum P_i = 1$                                 | 0,02 | 0,1 | 0,22 | 0,3 | 0,2 | 0,14 | 0,02 |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,1  | 0,5 | 1,1  | 1,5 | 1   | 0,7  | 0,1  |     |

Таблица П.13

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
толщины зерновки озимой пшеницы

| Граница классов, мм | 1,6  | 1,8  | 2,0   | 2,2   | 2,4  | 2,6 | 2,8  | 3,0  |
|---------------------|------|------|-------|-------|------|-----|------|------|
| $f(h_s)$            | 0,05 | 0,24 | 0,724 | 1,294 | 1,38 | 0,9 | 0,35 | 0,09 |

Продолжение к приложению Б

Таблица П.14

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
ширины зерновки

|   |      |      |      |      |      |     |      |     |
|---|------|------|------|------|------|-----|------|-----|
| Граница классов   | 2,0  | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,8  | 3,0 | 3,2  | 3,4 |
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1    | 3    | 6    | 8    | 16   | 15  | 1    |     |
| Частота, $P_i$  | 0,02 | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,32 | 0,3 | 0,02 |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,1  | 0,3  | 0,6  | 0,8  | 1,6  | 1,5 | 0,1  |     |

Таблица П.15

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
ширины зерновки

|                     |       |      |       |      |      |      |       |      |
|---------------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| Граница классов, мм | 2,0   | 2,2  | 2,4   | 2,6  | 2,8  | 3,0  | 3,2   | 3,4  |
| $f(a_s)$            | 0,034 | 0,18 | 0,579 | 1,14 | 1,39 | 1,03 | 0,476 | 0,13 |

Таблица П.16

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
диаметра соломины

|   |      |      |     |      |      |      |      |     |
|---|------|------|-----|------|------|------|------|-----|
| Граница классов   | 1,9  | 2,2  | 2,5 | 2,8  | 3,1  | 3,4  | 3,7  | 4,0 |
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 2    | 9    | 15  | 11   | 9    | 3    | 1    |     |
| Частота, $P_i$  | 0,04 | 0,18 | 0,3 | 0,22 | 0,18 | 0,06 | 0,02 |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,13 | 0,6  | 1,0 | 0,73 | 0,6  | 0,2  | 0,06 |     |

Таблица П.17

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения  
диаметра соломины

|                     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Граница классов, мм | 1,9  | 2,2  | 2,5  | 2,8  | 3,1  | 3,4  | 3,7  | 4,0  |
| $f(d_c)$            | 0,11 | 0,36 | 0,72 | 0,91 | 0,72 | 0,36 | 0,11 | 0,01 |

Продолжение к приложению Б

Таблица П.18

Результаты расчетов экспериментальной кривой плотности распределения  
длины соломины

| Граница классов   | 30    | 90    | 150   | 210   | 270  | 330  | 390   | 450 |
|---|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-----|
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1     | 4     | 10    | 13    | 12   | 9    | 1     |     |
| Частота, $P_i$  | 0,02  | 0,08  | 0,2   | 0,26  | 0,24 | 0,18 | 0,02  |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,003 | 0,013 | 0,033 | 0,043 | 0,04 | 0,03 | 0,003 |     |

Таблица П.19

Результаты расчетов теоретической кривой плотности распределения

длины соломины

| Граница классов, мм | 30     | 90     | 150   | 210   | 270   | 330   | 390   | 450    |
|---------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $f(l_c)$            | 0,0015 | 0,0073 | 0,022 | 0,041 | 0,039 | 0,031 | 0,013 | 0,0033 |

Таблица П.20

Результаты расчетов экспериментальной кривой распределения

длины колосков

| Граница классов   | 3    | 5   | 7    | 9    | 11   | 13   | 15   | 17 |
|---|------|-----|------|------|------|------|------|----|
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1    | 10  | 15   | 12   | 7    | 4    | 1    |    |
| Частота, $P_i$  | 0,02 | 0,2 | 0,3  | 0,24 | 0,14 | 0,08 | 0,02 |    |
| $P_i / \lambda$   | 0,01 | 0,1 | 0,15 | 0,12 | 0,07 | 0,04 | 0,01 |    |

Таблица П.21

Результаты расчетов теоретической кривой распределения

длины колосков

| Граница классов, мм | 3     | 5    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15    | 17    |
|---------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| $f(l_k)$            | 0,017 | 0,06 | 0,11 | 0,14 | 0,11 | 0,05 | 0,014 | 0,002 |

Продолжение к приложению Б

Таблица П.22

Результаты расчетов экспериментальной кривой распределения плотности  
очесанного вороха

|   |       |       |       |       |       |       |       |     |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Граница классов   | 80    | 94    | 108   | 122   | 136   | 150   | 164   | 178 |
| Количество измерений в классе, $n$<br>( $\sum n = 50$ ) | 1     | 6     | 11    | 12    | 10    | 8     | 2     |     |
| Частота, $P_i$  | 0,02  | 0,12  | 0,22  | 0,24  | 0,2   | 0,16  | 0,04  |     |
| $P_i / \lambda$   | 0,001 | 0,009 | 0,016 | 0,017 | 0,014 | 0,011 | 0,003 |     |

Таблица П.23

Результаты расчетов теоретической кривой распределения плотности  
очесанного вороха

|                     |        |        |       |      |      |       |        |        |
|---------------------|--------|--------|-------|------|------|-------|--------|--------|
| Граница классов, мм | 80     | 94     | 108   | 122  | 136  | 150   | 164    | 178    |
| $f(\rho_s)$         | 0,0011 | 0,0046 | 0,011 | 0,02 | 0,02 | 0,011 | 0,0046 | 0,0011 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Уравнения движения соломины вниз при различных комбинациях параметров

$$\begin{aligned} \rho_{ен1} = & -n \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - n \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+d) + n \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.1})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен2} = & -l \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+h) + l \cdot f \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.2})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен3} = & -n \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - n \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+k) + n \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.3})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен4} = & -m \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+h) + m \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.4})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен5} = & -m \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+d) + m \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.5})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен6} = & -l \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+k) + l \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.6})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен7} = & -l \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+k) + l \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.7})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен8} = & -m \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+d) + m \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.8})$$

$$\begin{aligned} \rho_{ен9} = & -m \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+k) + m \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 1.9})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}10} = & -n \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - n \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+k) + n \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.10})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}11} = & -m \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - m \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+h) + m \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.11})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}12} = & -m \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+k) + m \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.12})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}13} = & -m \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+k) + m \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.13})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}14} = & -m \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - m \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+d) + m \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.14})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}15} = & -l \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+k) + l \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.15})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}16} = & -l \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+d) + l \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.16})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}17} = & -n \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - n \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+d) + n \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.17})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}18} = & -l \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+h) + l \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.18})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}19} = & -l \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & - l \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+d) + l \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{II}\Phi \text{ 1.19})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}20} = & -l \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & -l \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+d) + l \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.20)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}21} = & -m \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & -m \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+h) + m \cdot f \cdot \sin(b+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.21)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}22} = & -n \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & -n \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+k) + n \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.22)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}23} = & -n \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c - \\ & -n \cdot f \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+h) + n \cdot f \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.23)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}24} = & -l \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & -l \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+h) + l \cdot f \cdot \sin(b+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.24)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}25} = & -n \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & -n \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+d) + n \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.25)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}26} = & -n \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a - \\ & -n \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+h) + n \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.26)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{en}27} = & -n \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) + \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b - \\ & -n \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+h) + n \cdot f \cdot \sin(b+h). \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 1.27)$$

Уравнения движения соломины вверх при различных комбинациях параметров

$$\begin{aligned} \rho_{661} = & -n \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+d) - n \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.1})$$

$$\begin{aligned} \rho_{662} = & -l \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+h) - l \cdot f \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.2})$$

$$\begin{aligned} \rho_{663} = & -n \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+k) - n \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.3})$$

$$\begin{aligned} \rho_{664} = & -m \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+h) - m \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.4})$$

$$\begin{aligned} \rho_{665} = & -m \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+d) - m \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.5})$$

$$\begin{aligned} \rho_{666} = & -l \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+k) - l \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.6})$$

$$\begin{aligned} \rho_{667} = & -l \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+k) - l \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.7})$$

$$\begin{aligned} \rho_{668} = & -m \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+d) - m \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.8})$$

$$\begin{aligned} \rho_{669} = & -m \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+k) - m \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.9})$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 10} = & -n \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+k) - n \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.10)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 11} = & -m \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+h) - m \cdot f \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.11)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 12} = & -m \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+k) - m \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.12)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 13} = & -m \cdot \cos(c+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(c+k) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(c+k) - m \cdot f \cdot \sin(c+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.13)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 14} = & -m \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(a+d) - m \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.14)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 15} = & -l \cdot \cos(a+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(a+k) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+k) - l \cdot f \cdot \sin(a+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.15)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 16} = & -l \cdot \cos(c+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(c+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(c+d) - l \cdot f \cdot \sin(c+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.16)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 17} = & -n \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+d) - n \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.17)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 18} = & -l \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+h) - l \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.18)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\epsilon\epsilon 19} = & -l \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+d) - l \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ } 2.19)$$

$$\begin{aligned} \rho_{6620} = & -l \cdot \cos(a+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(a+d) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(a+d) - l \cdot f \cdot \sin(a+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.20})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6621} = & -m \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + m \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + m \cdot \cos(b+h) - m \cdot f \cdot \sin(b+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.21})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6622} = & -n \cdot \cos(b+k) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(b+k) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+k) - n \cdot f \cdot \sin(b+k); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.22})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6623} = & -n \cdot \cos(c+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin c - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos c + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(c+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(c+h) - n \cdot f \cdot \sin(c+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.23})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6624} = & -l \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + l \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + l \cdot \cos(b+h) - l \cdot f \cdot \sin(b+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.24})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6625} = & -n \cdot \cos(b+d) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(b+d) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+d) - n \cdot f \cdot \sin(b+d); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.25})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6626} = & -n \cdot \cos(a+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin a - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos a + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(a+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(a+h) - n \cdot f \cdot \sin(a+h); \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.26})$$

$$\begin{aligned} \rho_{6627} = & -n \cdot \cos(b+h) \cdot \cos(\omega t) - \frac{g \cdot t^2}{2} \cdot \sin b - g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \cos b + \\ & + n \cdot f \cdot \sin(b+h) \cdot \cos(\omega t) + n \cdot \cos(b+h) - n \cdot f \cdot \sin(b+h). \end{aligned} \quad (\text{ПФ 2.27})$$

Расчетные уравнения для определения перемещения соломины вниз

$$\rho_{\text{вн1}} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c + d) + f \cdot \sin(c + d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.1})$$

$$\rho_{\text{вн2}} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c + h) + f \cdot \sin(c + h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.2})$$

$$\rho_{\text{вн3}} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a + k) + f \cdot \sin(a + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 3.3})$$

$$\rho_{\text{вн4}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + h) + f \cdot \sin(a + h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 3.4})$$

$$\rho_{\text{вн5}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b + d) + f \cdot \sin(b + d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 3.5})$$

$$\rho_{\text{вн6}} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b + k) + f \cdot \sin(b + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 3.6})$$

$$\rho_{\text{вн7}} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c + k) + f \cdot \sin(c + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.7})$$

$$\rho_{\text{вн8}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + d) + f \cdot \sin(c + d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.8})$$

$$\rho_{\text{вн9}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + k) + f \cdot \sin(a + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 3.9})$$

$$\rho_{\text{вн10}} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c + k) + f \cdot \sin(c + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.10})$$

$$\rho_{\text{вн11}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + h) + f \cdot \sin(c + h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.11})$$

$$\rho_{\text{вн12}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b + k) + f \cdot \sin(b + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 3.12})$$

$$\rho_{\text{вн13}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + k) + f \cdot \sin(c + k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 3.13})$$

$$\rho_{\text{вн14}} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + d) + f \cdot \sin(a + d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 3.14})$$

$$\rho_{\theta h 15} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+k) + f \cdot \sin(a+k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 3.15)$$

$$\rho_{\theta h 16} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c+d) + f \cdot \sin(c+d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ } 3.16)$$

$$\rho_{\theta h 17} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a+d) + f \cdot \sin(a+d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 3.17)$$

$$\rho_{\theta h 18} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+h) + f \cdot \sin(a+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 3.18)$$

$$\rho_{\theta h 19} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b+d) + f \cdot \sin(b+d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 3.19)$$

$$\rho_{\theta h 20} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+d) + f \cdot \sin(a+d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 3.20)$$

$$\rho_{\theta h 21} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b+h) + f \cdot \sin(b+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 3.21)$$

$$\rho_{\theta h 22} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+k) + f \cdot \sin(b+k)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 3.22)$$

$$\rho_{\theta h 23} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c+h) + f \cdot \sin(c+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c - f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ } 3.23)$$

$$\rho_{\theta h 24} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b+h) + f \cdot \sin(b+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 3.24)$$

$$\rho_{\theta h 25} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+d) + f \cdot \sin(b+d)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 3.25)$$

$$\rho_{\theta h 26} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a+h) + f \cdot \sin(a+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a - f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 3.26)$$

$$\rho_{\theta h 27} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+h) + f \cdot \sin(b+h)] + \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b - f \cdot \cos b). \quad (\text{ПФ } 3.27)$$

Расчетные уравнения для определения перемещения соломины вверх

$$\rho_{661} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c + d) - f \cdot \sin(c + d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.1})$$

$$\rho_{662} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c + h) - f \cdot \sin(c + h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.2})$$

$$\rho_{663} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a + k) - f \cdot \sin(a + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 4.3})$$

$$\rho_{664} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + h) - f \cdot \sin(a + h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 4.4})$$

$$\rho_{665} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b + d) - f \cdot \sin(b + d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 4.5})$$

$$\rho_{666} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b + k) - f \cdot \sin(b + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 4.6})$$

$$\rho_{667} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c + k) - f \cdot \sin(c + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.7})$$

$$\rho_{668} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + d) - f \cdot \sin(c + d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.8})$$

$$\rho_{669} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + k) - f \cdot \sin(a + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 4.9})$$

$$\rho_{6610} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c + k) - f \cdot \sin(c + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.10})$$

$$\rho_{6611} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + h) - f \cdot \sin(c + h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.11})$$

$$\rho_{6612} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b + k) - f \cdot \sin(b + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ 4.12})$$

$$\rho_{6613} = 2 \cdot m \cdot [\cos(c + k) - f \cdot \sin(c + k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ 4.13})$$

$$\rho_{6614} = 2 \cdot m \cdot [\cos(a + d) - f \cdot \sin(a + d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ 4.14})$$

$$\rho_{6615} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+k) - f \cdot \sin(a+k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 4.15)$$

$$\rho_{6616} = 2 \cdot l \cdot [\cos(c+d) - f \cdot \sin(c+d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ } 4.16)$$

$$\rho_{6617} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a+d) - f \cdot \sin(a+d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 4.17)$$

$$\rho_{6618} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+h) - f \cdot \sin(a+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 4.18)$$

$$\rho_{6619} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b+d) - f \cdot \sin(b+d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 4.19)$$

$$\rho_{6620} = 2 \cdot l \cdot [\cos(a+d) - f \cdot \sin(a+d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 4.20)$$

$$\rho_{6621} = 2 \cdot m \cdot [\cos(b+h) - f \cdot \sin(b+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 4.21)$$

$$\rho_{6622} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+k) - f \cdot \sin(b+k)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 4.22)$$

$$\rho_{6623} = 2 \cdot n \cdot [\cos(c+h) - f \cdot \sin(c+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin c + f \cdot \cos c); \quad (\text{ПФ } 4.23)$$

$$\rho_{6624} = 2 \cdot l \cdot [\cos(b+h) - f \cdot \sin(b+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 4.24)$$

$$\rho_{6625} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+d) - f \cdot \sin(b+d)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b); \quad (\text{ПФ } 4.25)$$

$$\rho_{6626} = 2 \cdot n \cdot [\cos(a+h) - f \cdot \sin(a+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin a + f \cdot \cos a); \quad (\text{ПФ } 4.26)$$

$$\rho_{6627} = 2 \cdot n \cdot [\cos(b+h) - f \cdot \sin(b+h)] - \frac{g \cdot t_1^2}{2} \cdot (\sin b + f \cdot \cos b). \quad (\text{ПФ } 4.27)$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица П.24

## Комбинации значений параметров

| №  | Перемещение<br>соломины |               | Угол<br>наклона<br>решета | Угол<br>направленности<br>колебаний | Амплитуда<br>колебаний |
|----|-------------------------|---------------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|    | вниз                    | вверх         |                           |                                     |                        |
| 1  | $\rho_{вн1}$            | $\rho_{вв1}$  | с                         | d                                   | n                      |
| 2  | $\rho_{вн2}$            | $\rho_{вв2}$  | с                         | h                                   | l                      |
| 3  | $\rho_{вн3}$            | $\rho_{вв3}$  | a                         | k                                   | n                      |
| 4  | $\rho_{вн4}$            | $\rho_{вв4}$  | a                         | h                                   | m                      |
| 5  | $\rho_{вн5}$            | $\rho_{вв5}$  | b                         | d                                   | m                      |
| 6  | $\rho_{вн6}$            | $\rho_{вв6}$  | b                         | k                                   | l                      |
| 7  | $\rho_{вн7}$            | $\rho_{вв7}$  | с                         | k                                   | l                      |
| 8  | $\rho_{вн8}$            | $\rho_{вв8}$  | с                         | d                                   | m                      |
| 9  | $\rho_{вн9}$            | $\rho_{вв9}$  | a                         | k                                   | m                      |
| 10 | $\rho_{вн10}$           | $\rho_{вв10}$ | с                         | k                                   | n                      |
| 11 | $\rho_{вн11}$           | $\rho_{вв11}$ | с                         | h                                   | m                      |
| 12 | $\rho_{вн12}$           | $\rho_{вв12}$ | b                         | k                                   | m                      |
| 13 | $\rho_{вн13}$           | $\rho_{вв13}$ | с                         | k                                   | m                      |
| 14 | $\rho_{вн14}$           | $\rho_{вв14}$ | a                         | d                                   | m                      |
| 15 | $\rho_{вн15}$           | $\rho_{вв15}$ | a                         | k                                   | l                      |
| 16 | $\rho_{вн16}$           | $\rho_{вв16}$ | с                         | d                                   | l                      |
| 17 | $\rho_{вн17}$           | $\rho_{вв17}$ | a                         | d                                   | n                      |
| 18 | $\rho_{вн18}$           | $\rho_{вв18}$ | a                         | h                                   | l                      |
| 19 | $\rho_{вн19}$           | $\rho_{вв19}$ | b                         | d                                   | l                      |
| 20 | $\rho_{вн20}$           | $\rho_{вв20}$ | a                         | d                                   | l                      |
| 21 | $\rho_{вн21}$           | $\rho_{вв21}$ | b                         | h                                   | m                      |
| 22 | $\rho_{вн22}$           | $\rho_{вв22}$ | b                         | k                                   | n                      |
| 23 | $\rho_{вн23}$           | $\rho_{вв23}$ | с                         | h                                   | n                      |
| 24 | $\rho_{вн24}$           | $\rho_{вв24}$ | b                         | h                                   | l                      |
| 25 | $\rho_{вн25}$           | $\rho_{вв25}$ | b                         | d                                   | n                      |
| 26 | $\rho_{вн26}$           | $\rho_{вв26}$ | a                         | h                                   | n                      |
| 27 | $\rho_{вн27}$           | $\rho_{вв27}$ | b                         | h                                   | n                      |

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

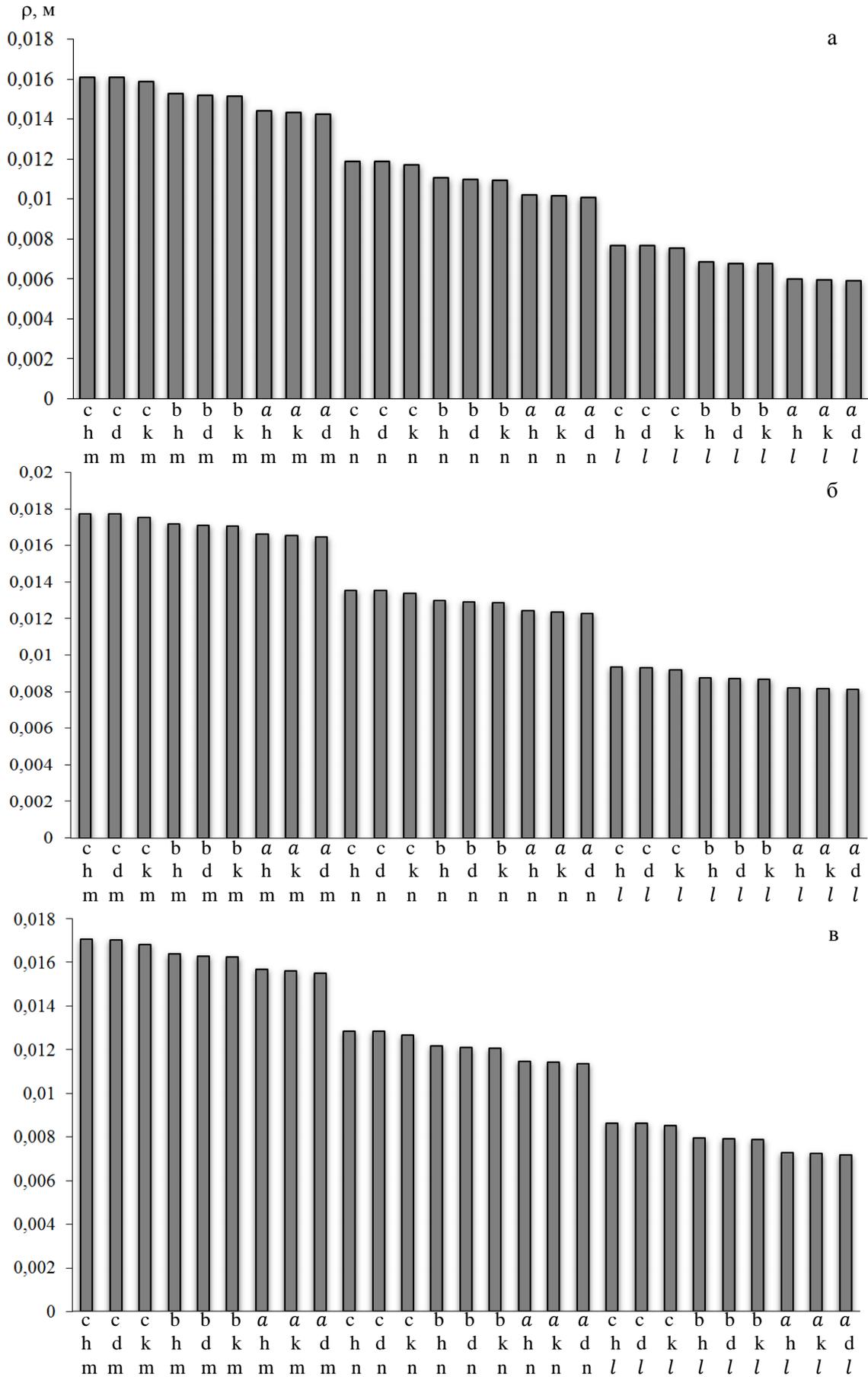


Рис. 1П. Диаграммы перемещения соломины вниз при различных частотах вращения эксцентрикового вала: а – частота  $\omega_1 = 45c^{-1}$ ; б – частота  $\omega_2 = 50c^{-1}$ ; в – частота  $\omega_3 = 55c^{-1}$

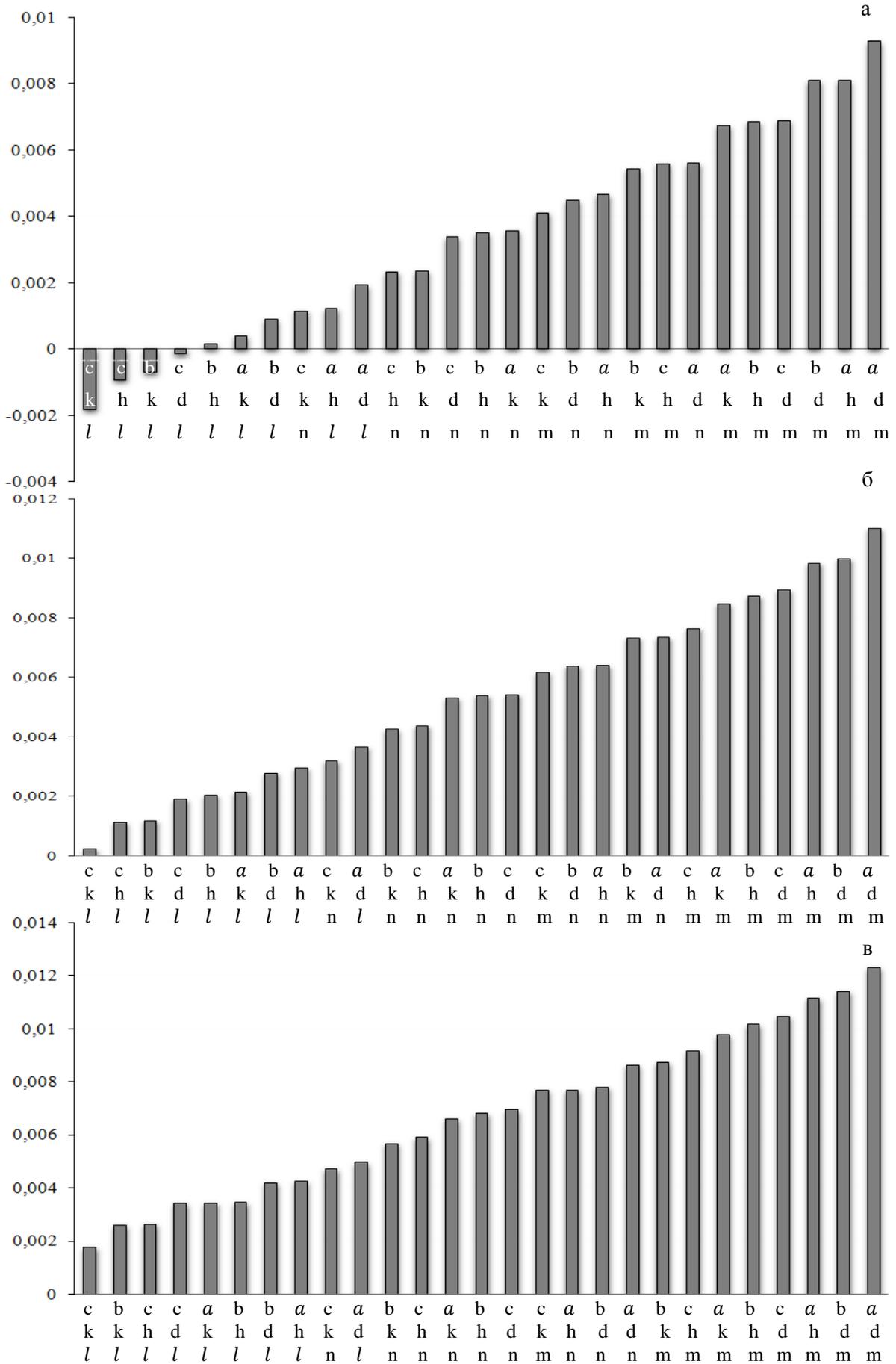


Рис. 2П. Диаграммы перемещения соломины вверх при различных частотах вращения эксцентрикового вала: а – частота  $\omega_1 = 45c^{-1}$ ; б – частота  $\omega_2 = 50c^{-1}$ ; в – частота  $\omega_3 = 55c^{-1}$

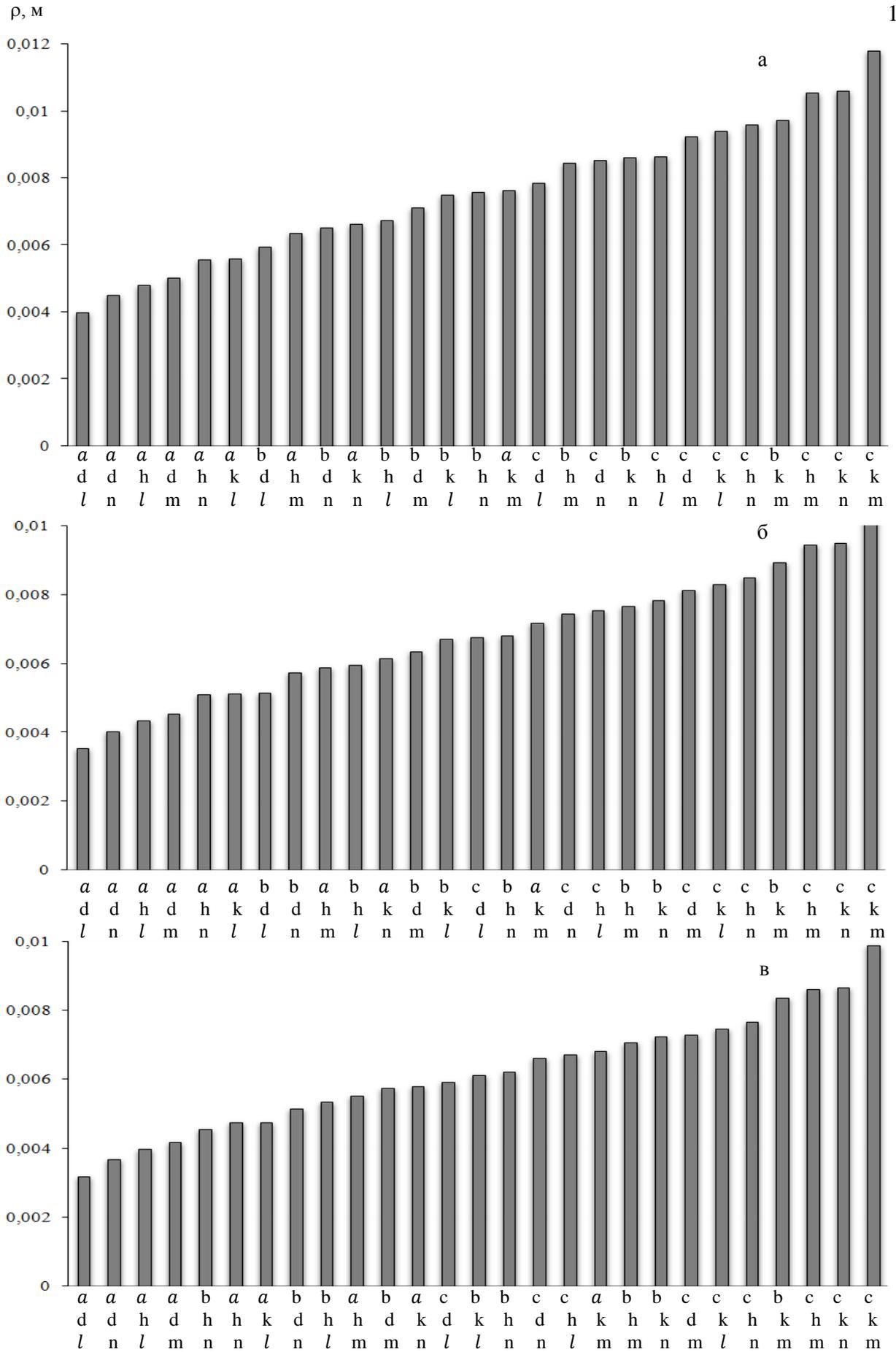


Рис. 3П. Диаграммы полного перемещения соломины при различных частотах вращения эксцентрикового вала: а – частота  $\omega_1 = 45c^{-1}$ ; б – частота  $\omega_2 = 50c^{-1}$ ; в – частота  $\omega_3 = 55c^{-1}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Патенты Украины на полезную модель







## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.25

Перечень приборов и оборудования, применявшихся  
при проведении исследований

| №  | Содержание работы                               | Наименование прибора  | Марка, тип      | Примечание             |
|----|---|-----------------------|-----------------|------------------------|
| 1  | Выделение проб и навесок зерна                  | Делитель              | –               |                        |
| 2  | Взвешивание вороха                              | Весы                  | ВНЦ-50          | Платформенные          |
| 3  | Взвешивание проб                                | Весы                  | ВЛТК-500        |                        |
| 4  | Измерение времени опыта                         | Секундомер            | С-1-га          |                        |
| 5  | Измерение частоты вращения эксцентрикового вала | Тахометр              | СК-751          | Часовой                |
| 6  | Фотографирование                                | Фотоаппарат           | Canon           | Цифровой               |
| 7  | Измерение углов                                 | Транспортир           |                 |                        |
| 8  | Очистка зерна                                   | Аспирационная колонка | –               | Лабораторная установка |
| 9  | Определение влажности компонентов               | Сушильный шкаф        | СНОД            | ГКВТ                   |
| 10 | Расчеты математические                          | Микрокалькулятор      | Citizen SR-270X |                        |



## ПРИЛОЖЕНИЕ К

Таблица П.27

Расчетные значения функции отклика  $y_1$  для  $x_1 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |        |       | Значение функции отклика, $y_1$ |
|----------|------------|--------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$  | $x_3$ |                                 |
| $M_1$    | -1         | -1,156 | 1,008 | –                               |
| $M_2$    | -1         | -1     | -1    | 0,68475                         |
| $M_3$    | -1         | -1     | 1     | 0,95225                         |
| $M_4$    | -1         | 1      | 1     | 0,76275                         |
| $M_5$    | -1         | 1      | -1    | 0,50225                         |
| $M_6$    | -0,5       | -1,156 | 1,008 | –                               |
| $M_7$    | -0,5       | -1     | -1    | 0,56                            |
| $M_8$    | -0,5       | -1     | 1     | 0,8275                          |
| $M_9$    | -0,5       | 1      | 1     | 0,638                           |
| $M_{10}$ | -0,5       | 1      | -1    | 0,3775                          |
| $M_{11}$ | 0          | -1,156 | 1,008 | –                               |
| $M_{12}$ | 0          | -1     | -1    | 0,46575                         |
| $M_{13}$ | 0          | -1     | 1     | 0,73325                         |
| $M_{14}$ | 0          | 1      | 1     | 0,54375                         |
| $M_{15}$ | 0          | 1      | -1    | 0,28325                         |
| $M_{16}$ | 0,5        | -1,156 | 1,008 | –                               |
| $M_{17}$ | 0,5        | -1     | -1    | 0,402                           |
| $M_{18}$ | 0,5        | -1     | 1     | 0,6695                          |
| $M_{19}$ | 0,5        | 1      | 1     | 0,48                            |
| $M_{20}$ | 0,5        | 1      | -1    | 0,2195                          |
| $M_{21}$ | 1          | -1,156 | 1,008 | –                               |
| $M_{22}$ | 1          | -1     | -1    | 0,36875                         |
| $M_{23}$ | 1          | -1     | 1     | 0,63625                         |
| $M_{24}$ | 1          | 1      | 1     | 0,44675                         |
| $M_{25}$ | 1          | 1      | -1    | 0,18625                         |

Продолжение к приложению К

Таблица П.28

Расчетные значения функции отклика  $y_1$  для  $x_2 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |       |       | Значение функции отклика, $y_1$ |
|----------|------------|-------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$ | $x_3$ |                                 |
| $M_{26}$ | 1,295      | -1    | 1,224 | –                               |
| $M_{27}$ | 1,295      | -0,5  | 1,058 | –                               |
| $M_{28}$ | -1         | -0,5  | -1    | 0,669875                        |
| $M_{29}$ | -1         | -0,5  | 1     | 0,935625                        |
| $M_{30}$ | 1          | -0,5  | -1    | 0,353875                        |
| $M_{31}$ | 1          | -0,5  | 1     | 0,619625                        |
| $M_{32}$ | 1,295      | 0     | 0,992 | –                               |
| $M_{33}$ | -1         | 0     | -1    | 0,6345                          |
| $M_{34}$ | -1         | 0     | 1     | 0,8985                          |
| $M_{35}$ | 1          | 0     | -1    | 0,3185                          |
| $M_{36}$ | 1          | 0     | 1     | 0,5825                          |
| $M_{37}$ | 1,295      | 0,5   | 0,927 | –                               |
| $M_{38}$ | -1         | 0,5   | -1    | 0,578625                        |
| $M_{39}$ | -1         | 0,5   | 1     | 0,840875                        |
| $M_{40}$ | 1          | 0,5   | -1    | 0,262625                        |
| $M_{41}$ | 1          | 0,5   | 1     | 0,524875                        |
| $M_{42}$ | 1,295      | 1     | 0,861 | –                               |

Продолжение к приложению К

Таблица П.29

Расчетные значения функции отклика  $y_1$  для  $x_3 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |        |       | Значение функции отклика, $y_1$ |
|----------|------------|--------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$  | $x_3$ |                                 |
| $M_{43}$ | 1,295      | -1,113 | -1    | –                               |
| $M_{44}$ | 1,295      | -1,123 | -0,5  | –                               |
| $M_{45}$ | -1         | -1     | -0,5  | 0,8015                          |
| $M_{46}$ | 1          | -1     | -0,5  | 0,4855                          |
| $M_{47}$ | -1         | 1      | -0,5  | 0,61725                         |
| $M_{48}$ | 1          | 1      | -0,5  | 0,30125                         |
| $M_{49}$ | 1,295      | -1,134 | 0     | –                               |
| $M_{50}$ | -1         | -1     | 0     | 0,885                           |
| $M_{51}$ | 1          | -1     | 0     | 0,569                           |
| $M_{52}$ | -1         | 1      | 0     | 0,699                           |
| $M_{53}$ | 1          | 1      | 0     | 0,383                           |
| $M_{54}$ | 1,295      | -1,145 | 0,5   | –                               |
| $M_{55}$ | -1         | -1     | 0,5   | 0,93525                         |
| $M_{56}$ | 1          | -1     | 0,5   | 0,61925                         |
| $M_{57}$ | -1         | 1      | 0,5   | 0,7475                          |
| $M_{58}$ | 1          | 1      | 0,5   | 0,4315                          |
| $M_{59}$ | 1,295      | -1,155 | 1     | –                               |

Продолжение к приложению К

Таблица П.30

Расчетные значения функции отклика  $y_2$  при  $x_1 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |       |       | Значение функции отклика, $y_2$ |
|----------|------------|-------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$ | $x_3$ |                                 |
| $N_1$    | -1         | 1,60  | -3,78 | –                               |
| $N_2$    | -1         | -1    | -1    | 0,912                           |
| $N_3$    | -1         | -1    | 1     | 0,724                           |
| $N_4$    | -1         | 1     | 1     | 0,506                           |
| $N_5$    | -1         | 1     | -1    | 0,654                           |
| $N_6$    | -0,5       | 1,45  | -3,03 | –                               |
| $N_7$    | -0,5       | -1    | -1    | 0,8715                          |
| $N_8$    | -0,5       | -1    | 1     | 0,7135                          |
| $N_9$    | -0,5       | 1     | 1     | 0,5105                          |
| $N_{10}$ | -0,5       | 1     | -1    | 0,6285                          |
| $N_{11}$ | 0          | 1,29  | -2,28 | –                               |
| $N_{12}$ | 0          | -1    | -1    | 0,808                           |
| $N_{13}$ | 0          | -1    | 1     | 0,68                            |
| $N_{14}$ | 0          | 1     | 1     | 0,492                           |
| $N_{15}$ | 0          | 1     | -1    | 0,58                            |
| $N_{16}$ | 0,5        | 1,26  | -1,53 | –                               |
| $N_{17}$ | 0,5        | -1    | -1    | 0,7215                          |
| $N_{18}$ | 0,5        | -1    | 1     | 0,6235                          |
| $N_{19}$ | 0,5        | 1     | 1     | 0,4505                          |
| $N_{20}$ | 0,5        | 1     | -1    | 0,5085                          |
| $N_{21}$ | 1          | 0,99  | -0,78 | 0,414437                        |
| $N_{22}$ | 1          | -1    | -1    | 0,612                           |
| $N_{23}$ | 1          | -1    | 1     | 0,544                           |
| $N_{24}$ | 1          | 1     | 1     | 0,386                           |
| $N_{25}$ | 1          | 1     | -1    | 0,414                           |

Продолжение к приложению К

Таблица П.31

Расчетные значения функции отклика  $y_2$  для  $x_2 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |       |       | Значение функции отклика, $y_2$ |
|----------|------------|-------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$ | $x_3$ |                                 |
| $N_{26}$ | 1,60       | -1    | -0,89 | –                               |
| $N_{27}$ | 1,48       | -0,5  | -0,80 | –                               |
| $N_{28}$ | -1         | -0,5  | -1    | 0,81075                         |
| $N_{29}$ | -1         | -0,5  | 1     | 0,63275                         |
| $N_{30}$ | 1          | -0,5  | -1    | 0,52575                         |
| $N_{31}$ | 1          | -0,5  | 1     | 0,46775                         |
| $N_{32}$ | 1,37       | 0     | -0,71 | –                               |
| $N_{33}$ | -1         | 0     | -1    | 0,734                           |
| $N_{34}$ | -1         | 0     | 1     | 0,566                           |
| $N_{35}$ | 1          | 0     | -1    | 0,464                           |
| $N_{36}$ | 1          | 0     | 1     | 0,416                           |
| $N_{37}$ | 1,26       | 0,5   | -0,62 | –                               |
| $N_{38}$ | -1         | 0,5   | -1    | 0,68175                         |
| $N_{39}$ | -1         | 0,5   | 1     | 0,52375                         |
| $N_{40}$ | 1          | 0,5   | -1    | 0,42675                         |
| $N_{41}$ | 1          | 0,5   | 1     | 0,38875                         |
| $N_{42}$ | 1,15       | 1     | -0,53 | –                               |

Продолжение к приложению К

Таблица П.32

Расчетные значения функции отклика  $y_2$  при  $x_3 = \text{const}$ 

| Точка    | Координаты |       |       | Значение функции отклика, $y_2$ |
|----------|------------|-------|-------|---------------------------------|
|          | $x_1$      | $x_2$ | $x_3$ |                                 |
| $N_{43}$ | -1,25      | 1,35  | -1    | –                               |
| $N_{44}$ | -1,096     | 1,28  | -0,5  | –                               |
| $N_{45}$ | -1         | -1    | -0,5  | 0,87175                         |
| $N_{46}$ | 1          | -1    | -0,5  | 0,60175                         |
| $N_{47}$ | -1         | 1     | -0,5  | 0,62375                         |
| $N_{48}$ | 1          | 1     | -0,5  | 0,41375                         |
| $N_{49}$ | -0,94      | 1,21  | 0     | –                               |
| $N_{50}$ | -1         | -1    | 0     | 0,827                           |
| $N_{51}$ | 1          | -1    | 0     | 0,587                           |
| $N_{52}$ | -1         | 1     | 0     | 0,589                           |
| $N_{53}$ | 1          | 1     | 0     | 0,409                           |
| $N_{54}$ | -0,79      | 1,13  | 0,5   | –                               |
| $N_{55}$ | -1         | -1    | 0,5   | 0,77775                         |
| $N_{56}$ | 1          | -1    | 0,5   | 0,56775                         |
| $N_{57}$ | -1         | 1     | 0,5   | 0,54975                         |
| $N_{58}$ | 1          | 1     | 0,5   | 0,39975                         |
| $N_{59}$ | -0,64      | 1,06  | 1     | –                               |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Акты внедрения и производственной проверки

Затверджую  
 начальник управління  
 агропромислового розвитку  
 Мелітопольської районної  
 державної адміністрації  
 Данченко М. В.  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.



Затверджую  
 Ректор Таврійського  
 державного агротехноло-  
 гічного університету  
 д.т.н., проф.  
 Кюрчев В. М.  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.



### Акт

проведення виробничих досліджень

Ми, що нижче підписалися, директор приватного підприємства ТЕРА ВОМ С. І. Зінченко, декан факультету МТФ, к.т.н., доц. Кюрчев С. В., завідувач кафедру «Сільськогосподарські машини» ТДАТУ, к.т.н., доц. Караєв О. Г., керівник наукової лабораторії «Технології і технічні засоби для рослинництва» НДІ МЗПУ ТДАТУ, д.т.н., доц., професор кафедри МВЗ ТДАТУ Михайлов Є. В. та асистент кафедри «Технічна механіка» Леженкін І. О. склали дійсний акт про проведення польових досліджень очисника вороху ОВС-25 оснащеного експериментальними робочими органами, який обробляв обчісаний ворох ярого ячменю сорту «Прерія» у приватному підприємстві ТЕРА ВОМ, Мелітопольського району, Запорізької області.

Основні показники роботи машини з експериментальними робочими органами:

|   |                   |
|---|-------------------|
| Продуктивність                            | 18,46...24,19 т/ч |
| Коефіцієнт сепарації                      | 0,901...0,973     |
| Коефіцієнт ефективності виділення домішок | 0,892...0,924     |

Директор приватного  
 підприємства ТЕРА ВОМ



С. І. Зінченко

Декан факультету МТФ,  
 к.т.н., доц.

С. В. Кюрчев

Зав. каф. «Сільськогосподарські машини»

О. Г. Караєв

Керівник наукової лабораторії  
 «Технології і технічні  
 засоби для рослинництва»  
 НДІ МЗПУ ТДАТУ, д.т.н., доц.,  
 професор кафедри МВЗ ТДАТУ

Є. В. Михайлов

Асистент кафедри  
 «Технічна механіка» ТДАТУ

І. О. Леженкін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого  
доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НААН України



 В.І. Кравчук

### АКТ ПРО ПЕРЕДАЧУ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

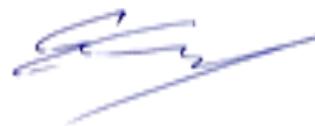
Ми, що нижче підписалися, завідувач відділом науково-експериментальних досліджень та створення технічних засобів УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого Іваненко І. М., завідувач лабораторією наукових досліджень конструкцій та провайдингу перспективних машин УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого к.т.н., доц. Сербій Є. К. та асистент кафедри «Технічна механіка» Леженкін І. О., склали цей акт про передачу інституту матеріалів досліджень по кандидатській дисертації Леженкіна І. О. на тему «Розробка та обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою для доробки обчисаного вороху зернових на фураж», які можливо використати при виконанні науково-дослідних та конструкторських робіт.

Завідувач відділом науково-експериментальних досліджень та створення технічних засобів УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого



І. М. Іваненко

Завідувач лабораторією наукових досліджень конструкцій та провайдингу перспективних машин УкрНДІПВТ ім. Леоніда Погорілого к.т.н., доц.



Є. К. Сербій

Асистент кафедри «Технічна механіка» ТДАТУ

І.О. Леженкін

## ПРИЛОЖЕНИЕ М

### Расчет технико-экономической эффективности

1. Зональный годовой объем выработки новой машины ( $B_3$ ):

$$B_3 = W_{\text{экн}} \cdot T_3 = 21,7 \cdot 520 = 11284 \text{ т.}$$

где  $W_{\text{экн}}$  – производительность модернизированной машины за 1 час эксплуатационного времени,  $W_{\text{экн}} = 21,7$  т/ч;

$T_3$  – зональная годовая загрузка машина,  $T_3 = 520$  ч.

2. Затраты на оплату труда обслуживающего персонала, для модернизированной машины и для базовой:

$$З_n = \frac{\sum L_i \cdot t_i \cdot r_i \cdot \kappa_D \cdot n_i}{W_{\text{экн}} \cdot T'_3} = \frac{1 \cdot 520 \cdot 12 \cdot 1,65 \cdot 1,36}{21,7 \cdot 520} = 1,24 \text{ грн./т.};$$

$$З_б = \frac{\sum L_i \cdot t_i \cdot r_i \cdot \kappa_D \cdot n_i}{W_{\text{экб}} \cdot T_3} = \frac{1 \cdot 520 \cdot 12 \cdot 1,65 \cdot 1,36}{15,5 \cdot 520} = 1,73 \text{ грн./т.},$$

где  $n_i$  – коэффициент начислений на заработную плату (пенсионный фонд, социальное страхование, фонд занятости,  $n_i = 1,36$ ;

$t_i$  – продолжительность занятости  $i$ -того производственного персонала,  $t_i = 520$  час. за сезон;

$r_i$  – почасовая тарифная ставка оплаты труда,  $r_i = 10 \dots 12$  грн./чел.час.;

$\kappa_D$  – коэффициент, который учитывает доплаты к часовой ставке за продукцию, классность, стаж,  $\kappa_D = 1,45 - 1,65$ ;

$L_i$  – количество обслуживающего персонала;

$W_{\text{экб}}$  – производительность базовой машины,  $W_{\text{экб}} = 15,5$  т/ч.

3. Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/т:

$$q_n = \frac{N}{W_{\text{экн}}} = \frac{7,3}{21,7} = 0,336 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т.};$$

$$q_б = \frac{N}{W_{\text{экб}}} = \frac{7,3}{15,5} = 0,47 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{т.},$$

где  $N$  – суммарная мощность электродвигателей, установленных на машине.

4. Затраты средств на электроэнергию ( $\Gamma$ ), грн./т:

$$\Gamma_n = q_n \cdot C_n = 0,336 \cdot 1,6 = 0,54 \text{ грн./т};$$

$$\Gamma_{\sigma} = q_{\sigma} \cdot C_n = 0,47 \cdot 1,6 = 0,75 \text{ грн./т},$$

где  $C_n$  – цена 1 кВт/ч,  $C_n = 1,6$  грн./кВт·ч.

5. Балансовая стоимость машины ( $B$ ), грн.:

$$B = C_m \cdot K_{\sigma} = 165000 \cdot 1,2 = 198000 \text{ грн.};$$

где  $C_m$  – цена приобретения машины без учета налога на добавленную стоимость,  $C_m = 165000$  грн.;

$K_{\sigma}$  – коэффициент пересчета цены приобретения в балансовую стоимость машины,  $K_{\sigma} = 1,2$ .

6. Затраты на капитальный и текущий ремонт, а также техническое обслуживание  $P$  в гривнах на единицу выработки:

$$P_n = \frac{B \cdot r_T \cdot r_K}{W_{\text{эк}_n} \cdot T_3} = \frac{198000 \cdot 0,15}{21,7 \cdot 520} = 2,63 \text{ грн./т};$$

$$P_{\sigma} = \frac{B \cdot r_T \cdot r_K}{W_{\text{эк}_{\sigma}} \cdot T_3} = \frac{198000 \cdot 0,15}{15,5 \cdot 520} = 3,68 \text{ грн./т},$$

где  $r_T$  и  $r_K$  – коэффициенты, которые учитывают отчисления на текущий и капитальный ремонт, а также техническое обслуживание, в целом эти отчисления составляют 12...15%.

7. Затраты на амортизацию машины:

$$A_n = \frac{B \cdot a}{W_{\text{эк}_n} \cdot T_3} = \frac{198000 \cdot 0,125}{21,7 \cdot 520} = 2,19 \text{ грн./т};$$

$$A_{\sigma} = \frac{B \cdot a}{W_{\text{эк}_{\sigma}} \cdot T_3} = \frac{198000 \cdot 0,125}{15,5 \cdot 520} = 3,07 \text{ грн./т},$$

где  $A_n$  – затраты на амортизацию модернизированной машины;

$A_{\sigma}$  – затраты на амортизацию базовой машины;

$a$  – коэффициент отчислений на амортизацию,  $a = \frac{1}{n} = 0,125$ .

8. Затраты на страхование и хранение машины:

$$S_{xcm} = B \cdot K_x \cdot K_c = 198000 \cdot 0,07 = 13860 \text{ грн.},$$

где  $S_{xcm}$  – затраты на страхование и хранение машины;

$K_x$  и  $K_c$  – коэффициенты, учитывающие отчисления на страхование и хранение машины, 5...7%.

9. Затраты на монтаж, страхование и хранение машины:

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot Z_{ni} \cdot r_i \cdot n_i + \Pi_{он} + S_{xcm}}{W_{эkn} \cdot T_3} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 12 \cdot 1,36 + 1505 + 13860 + 28300}{21,7 \cdot 520} = 3,93 \text{ грн./м};$$

$$M_б = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot Z_{ni} \cdot r_i \cdot n_i + \Pi_{он} + S_{xcm}}{W_{эkb} \cdot T_3} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 1,36 + 13860 + 28300}{21,7 \cdot 520} = 5,27 \text{ грн./м},$$

где  $L_i$  – количество обслуживающего персонала занятого при монтаже машины,  $L_i = 2$  чел.;

$Z_{ni}$  – затраты труда  $i$ -той категории работников на досборку и монтаж оборудования, чел.-час.;  $Z_{ni} = 20$  чел/час. – при монтаже модернизированной машины и  $Z_{ni} = 10$  чел/час. – при монтаже базовой машины;

$r_i$  – почасовая тарифная ставка оплаты труда на  $i$ -том виде работ грн./чел.·час.,  $r_i = 10...12$  грн./чел.·час;

$n_i$  – коэффициент начислений на заработную плату (пенсионный фонд, социальное страхование, фонд занятости),  $n_i = 1,36$ ;

$\Pi_{он}$  – стоимость материалов, которые используются при досборке и монтаже машины.

При монтаже модернизированной машины используются решета новой конструкции, на их изготовление требуется материала на сумму 1505 грн., а также для работы машины на очесанном ворохе предусматривается замена загрузочного скребкового транспортера.

Для этой цели рекомендуется использовать загрузочный транспортер с ЗМ-60, его цена составляет 28300 грн.

10. Прямые эксплуатационные затраты на единицу выработки:

$$I_n = Z_n + \Gamma_n + P_n + A_n + M_n = 1,24 + 0,54 + 2,63 + 2,19 + 3,93 = 10,53 \text{ грн./т};$$

$$I_o = Z_o + \Gamma_o + P_o + A_o + M_o = 1,73 + 0,75 + 3,68 + 3,07 + 5,27 = 14,5 \text{ грн./т},$$

где  $I_n$  – прямые эксплуатационные затраты на единицу выработки для модернизированной машины, грн./т;

$I_o$  – прямые эксплуатационные затраты на единицу выработки для базовой машины, грн./т.

11. Удельные инвестиционные вложения, на единицу выработки:

$$K_n = \frac{B}{W_{экс} \cdot T_3} = \frac{198000}{21,7 \cdot 520} = 17,55 \text{ грн./т};$$

$$K_o = \frac{B}{W_{экс} \cdot T_3} = \frac{198000}{15,5 \cdot 520} = 24,57 \text{ грн./т},$$

где  $K_n$  – удельные инвестиционные вложения при модернизированном варианте машины, грн./т;

$K_o$  – удельные инвестиционные вложения при серийном варианте машин, грн./т.

12. Коэффициент эффективности капитальных вложений:

$$E_n = \frac{C_o}{100} = \frac{15}{100} = 0,15,$$

где  $C_o$  – ставка льготного кредита банка,  $C_o = 13...15\%$ .

13. Совокупные затраты на единицу выработки:

$$\Pi_n = I_n + K_n \cdot E_n = 10,53 + 17,55 \cdot 0,15 = 13,16 \text{ грн./т};$$

$$\Pi_o = I_o + K_o \cdot E_n = 14,5 + 24,57 \cdot 0,15 = 18,18 \text{ грн./т},$$

где  $\Pi_n$  и  $\Pi_o$  – совокупные затраты на единицу выработки для нового и базового варианта машины.

14. Годовой экономический эффект:

$$E_2 = (\Pi_o - \Pi_n) \cdot B_3 = (18,18 - 13,16) \cdot 11284 = 56645 \text{ грн.},$$

где  $E_2$  – годовой экономический эффект.

15. Годовая прибыль от эксплуатации модернизированной машины:

$$\Pi_2 = (I_o - I_n) \cdot B_3 = (14,5 - 10,53) \cdot 11284 = 44797,5 \text{ грн.},$$

где  $\Pi_2$  – годовая прибыль от эксплуатации модернизированной машины.

16. Срок окупаемости дополнительных расходов на модернизацию машины:

$$O = \frac{P_d}{E_2} = \frac{30457}{56645} = 0,54 \text{ года},$$

где  $P_d$  – дополнительные расходы на модернизацию машины.