

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
имени И.И. Ползунова»

С. Ф. Сороченко

СИСТЕМА ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО
КОМБАЙНА ДЛЯ РАБОТЫ НА СКЛОНАХ

Монография

ISBN 978-5-7568-1451-4



АлтГТУ
Барнаул • 2023

УДК 631.354

Сороченко, С.Ф. Система очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах : монография / С.Ф. Сороченко. – Барнаул : АлтГТУ, 2023. – 148 с. – URL:http://elib.altstu.ru/uploads/open_mat/2023/Sorochenko_SistOchZernKombSk1_mono.pdf. - Текст : электронный

ISBN 978-5-7568-1451-4

В монографии рассмотрены вопросы разработки конструктивно-технологических решений системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для уборки зерновых культур на склонах. Приведены математические модели, описывающие поведение зернового вороха на верхнем решете, а также математическая модель сепарации, позволяющая выполнить сравнительную оценку разрабатываемых очисток. Монография будет полезна студентам агроинженерных специальностей, аспирантам, научным работникам и сотрудникам конструкторских бюро, занимающихся исследованием и проектированием зерноуборочных комбайнов.

Рецензенты:

Д.Н. Пирожков – д.т.н., декан инженерного факультета Алтайского государственного аграрного университета;

И.Я. Федоренко – д.т.н., профессор кафедры механизации производства и переработки и сельскохозяйственной продукции Алтайского государственного аграрного университета.

Монография

Минимальные системные требования

Yandex (20.12.1) или Google Chrome (87.0.4280.141) и т.п.

скорость подключения - не менее 5 Мб/с, Adobe Reader и т.п.

Дата подписания к использованию 19.05. 2023. Объем издания – 5, 5 Мб.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, <https://www.altstu.ru>.

ISBN 978-5-7568-1451-4

© Сороченко, С.Ф., 2023

© Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», 2023

[вперед \(оглавление\)](#)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА СКЛОНАХ	6
1.1 Возделывание зерновых культур на склоновых землях.....	6
1.2 Назначение, агротехнические требования и классификация систем очистки зерноуборочных комбайнов.....	11
1.3 Анализ конструктивных решений системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах.....	12
1.4 Факторы, влияющие на поведение зернового вороха в системе очистки	25
1.5 Анализ математических моделей поведения зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна.....	28
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА ВЕРХНЕМ РЕШЕТЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ КОМБАЙНА НА СКЛОНАХ.....	43
2.1 Основные допущения и ограничения	43
2.2 Движение компонентов зернового вороха по жалюзи решета.....	45
2.3 Движение зернового вороха по жалюзийному решету	53
2.4 Движение зернового вороха по жалюзийному решету при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении	60
2.5 Движение зернового вороха по пальцевому решету при изменении направления его колебаний в горизонтальной плоскости	63
Глава 3. СЕПАРАЦИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ КОМБАЙНА НА СКЛОНАХ	71
3.1 Распределение зернового вороха на грохоте системы очистки при поперечном наклоне молотилки	71
3.2 Методика определения коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха	74
3.3 Математическая модель сепарации зернового вороха	80
3.4 Реализация математической модели сепарации зернового вороха в программах для ЭВМ	83
3.5 Анализ работы системы очистки при поперечном наклоне молотилки с использованием модели сепарации зернового вороха	84
3.6 Экспериментальные исследования работы воздушно-решетной очистки базового комбайна. Проверка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований	88
Глава 4. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА ДЛЯ РАБОТЫ НА СКЛОНАХ	92
4.1 Основные требования к системе очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах	92

4.2 Предварительная сепарация зернового вороха в решётно-винтовом сепараторе	94
4.3 Стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете ...	100
4.4 Выравнивание толщины слоя зернового вороха дополнительными колебаниями решета в поперечном направлении	108
4.5 Выравнивание толщины слоя зернового вороха путём изменения направления колебаний решета в горизонтальной плоскости	112
4.6 Автоматическое регулирование направления и амплитуды колебаний решета в поперечном направлении	119
4.7 Оценка адекватности математической модели сепарации зернового вороха	121
Глава 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	122
5.1 Конкурентоспособность предлагаемых систем очистки	122
5.2 Сравнительные лабораторно-полевые испытания системы очистки с решётно-винтовым сепаратором	125
5.3 Сравнительные лабораторно-полевые испытания системы очистки с адаптером для склонов	127
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программа для ЭВМ «Математическая модель сепарации зернового вороха»	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Данные для оценки адекватности математической модели сепарации зернового вороха	148

ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация является крупнейшим производителем зерна. Основным способом уборки зерновых культур является комбайновый, в котором главная роль принадлежит зерноуборочному комбайну. При уборке зерновых культур на полях с уклоном более 5° производительность зерноуборочного комбайна снижается, причём лимитирующим рабочим органом, ограничивающим производительность комбайна, является система очистки, на которую приходится более 60 % от всех потерь зерна. В настоящее время для уборки зерновых культур на склонах применяются зерноуборочные комбайны равнинной конфигурации, но имеется как отечественный, так и зарубежный опыт по разработке и применению на склонах косогорных и крутосклонных модификаций зерноуборочных комбайнов. Однако вопросы функционирования системы очистки при уборке зерновых культур на склонах изучены недостаточно полно. Нет методики сравнительной оценки новых конструктивно-технологических схем системы очистки на стадии проектирования. В данной монографии предложены пути решения указанной проблемы.

В первой главе «Современное состояние проблемы уборки зерновых культур на склонах» выполнен анализ и систематизированы схемные решения систем очистки зерноуборочных комбайнов, применяемых в нашей стране и за рубежом, проанализированы известные математические модели, описывающие поведение и сепарацию зернового вороха на решетках системы очистки.

Во второй главе приведены математические модели движения зернового вороха и его компонентов по жалюзийному решету при работе зерноуборочного комбайна на склонах, в том числе математические модели, описывающие кинематику зернового вороха при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении и на пальцевом решете.

В третьей главе рассмотрены вопросы сепарации и распределения зернового вороха на верхнем решете системы очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах. Математическая модель сепарации зернового вороха на верхнем решете системы очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах включает переменный по длине решета дискретный коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха, позволяющий сравнивать известные и проектируемые очистки.

В четвертой главе приведены конструктивно-технологические решения системы очистки косогорного зерноуборочного комбайна и их параметры. Сравнительная оценка разработанных очисток выполнена с помощью модели сепарации и лабораторных испытаний.

В пятой главе показана конкурентоспособность разработанных очисток и приведены результаты лабораторно-полевых испытаний.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ УБОРКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА СКЛОНАХ

1.1 Возделывание зерновых культур на склоновых землях

В Российской Федерации общая площадь земель, занятая зерновыми культурами, составляет 47,958 млн. га, среди зерновых культур наибольшую площадь занимает пшеница – 29,535 млн. га [74].

Зерновые культуры в основном возделываются на равнине, но также возделываются на склоновых землях (рисунок 1.1), на которых подъем местности оценивается углом наклона α_m и коэффициентом уклона i_α (таблица 1.1) [73]

$$i_\alpha = 100 \cdot \sin \alpha_m, \% . \quad (1.1)$$

Таблица 1.1 – Соотношение между углом наклона и коэффициентом уклона

Угол наклона $\alpha_m, ^\circ$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Коэффициент уклона $i_\alpha, \%$	0	9	17	26	34	42	50	57	64



Рисунок 1.1 – Поле в Алтайском крае, занятое посевами пшеницы

Вопросам возделывания зерновых культур на склонах посвящены работы [1, 3, 22, 86, 142 и др.]. В коллективной работе учёных [3] под редакцией академиков РАСХН В.И. Кирюшина и А.Л. Иванова дана классификация склонов по крутизне: плоские поверхности – крутизна склона до 1 °; очень пологие – 1–2 °; пологие – 2–3 °; слабо покатые – 3–5 °; покатые – 5–8 °; сильно покатые – 8–10 °;

крутые – 10–15 °; очень крутые – 15–20 °; чрезвычайно крутые – 20–45 °. Отмечено, что «при уклонах 5–8 ° практикуются почвозащитные севообороты. Склоны круче 8 ° используются в основном как сенокосно-пастбищные угодья» [3, с. 31].

Оптимизацией структуры зернопаропропашных севооборотов на эрозионноопасных склонах (от 3,5 до 4 °) Ростовской области занимались учёные Э.А. Гаевая и И.В. Сафонова. В работе [22] отмечено, что «для выращивания озимой пшеницы должна быть использована вся пригодная пашня. ...Однако значительная часть земель южных регионов страны размещается на склонах крутизной 3,5–4 °, обладающих в большинстве случаев достаточным плодородием. ... Таких земель на Северном Кавказе свыше 5 млн. га, в том числе в Ростовской области – около 2 млн. га».

В Восточной Сибири, как отмечают учёные Г.Н. Поляков и П.А. Болоев, «углы наклона полей в среднем составляют 7–8 °, а в некоторых агроландшафтных районах до 15 °» [86]. В Красноярском крае на склонах от 3 до 5 ° расположено 14,5 % пашни, от 5 до 7 ° – 10 %. В Алтайском крае, как отмечают Н.В. Яшутин и В.И. Бивалькевич [142], технологию земледелия осложняет наличие склонов разной экспозиции и крутизны. В крае около 1 млн. га пашни имеют уклоны более 3 °. Из 60 районов края в 43-х имеется пашня с уклоном 5 ° и более, общая площадь которой равна 186 тыс. га. Районы Алтайского края, в которых имеются значительные площади склоновой пашни, представлены на рисунке 1.2.

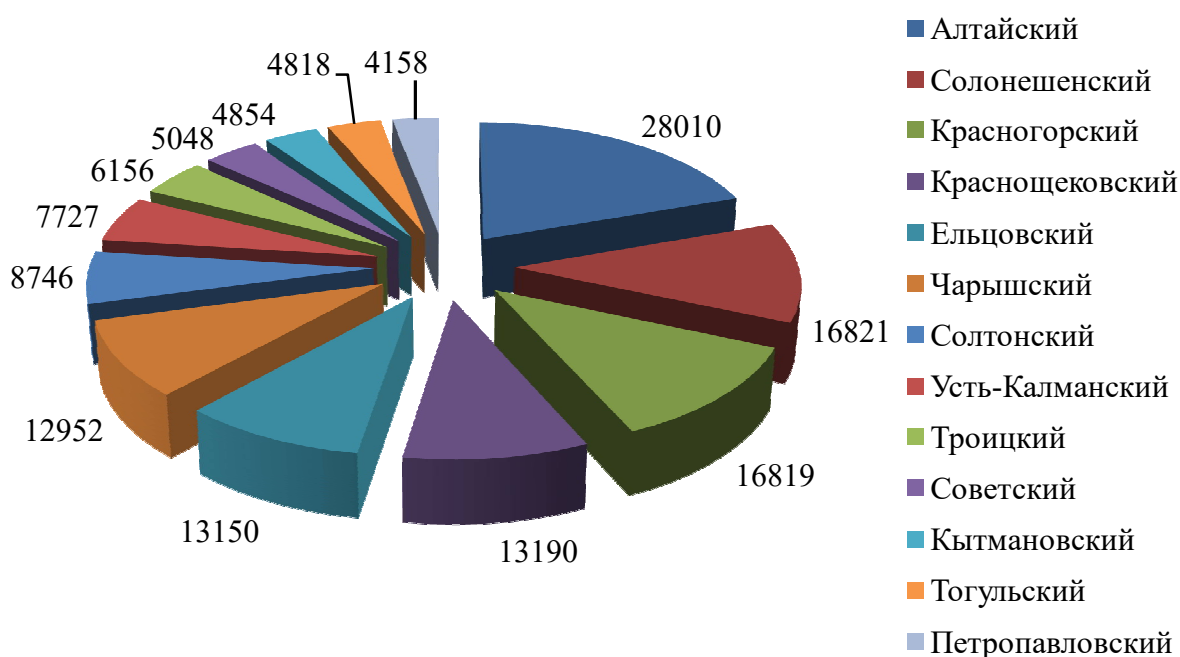


Рисунок 1.2 – Районы Алтайского края, имеющие площадь более 400 га с уклоном более 5 ° (по данным Н.В. Яшутина и В.И. Бивалькевича [142])

Возделыванию зерновых культур на склоновых землях в странах ближнего и дальнего зарубежья посвящены работы [143, 154].

Основным способом уборки зерновых культур является комбайновый [24, 63, 78], подразделяющийся на однофазный способ (прямое комбайнирование) и двухфазный способ (раздельное комбайнирование), с использованием зерноуборочного комбайна.

По ГОСТ 28301-2015 «Комбайны зерноуборочные. Методы испытаний» основной характеристикой комбайна является номинальная производительность. Определены предельные значения качественных показателей работы молотилки зерноуборочного комбайна при приведённой подаче хлебной массы и отношении массы зерна к массе соломы 1:1,5: потери зерна за молотилкой 1,5 %; дробление зерна – 2,0 %; засоренность бункерного зерна – 2,0 %. Основным оценочным показателем качества работы зерноуборочного комбайна являются потери зерна [43].

За эталонный показатель, позволяющий сравнивать зерноуборочные комбайны различных производителей, в том числе зарубежных фирм, принята пропускная способность комбайна [39, 73]. По номинальной пропускной способности зерноуборочные комбайны делятся на классы: I – до 1,5 кг/с; II – от 1,5 до 5,0 кг/с; III – $6,0 \pm 1,0$ кг/с; IV – $8,0 \pm 1,0$ кг/с; V – $10,0 \pm 1,0$ кг/с; VI – $12,0 \pm 1,0$ кг/с; VII – $14,0 \pm 1,0$ кг/с; VIII – $16,0 \pm 1,0$ кг/с. Для сравнения зерноуборочных комбайнов различных фирм, в том числе и зарубежных, в работе [127] описана непрерывная классификация, по которой класс комбайна идентифицируется заявленной заводом-изготовителем его пропускной способностью при уровне потерь за молотилкой 1,5 % с классовым интервалом $\pm 0,5$ кг/с.

Необходимость наличия в стране зерноуборочных комбайнов различной пропускной способности (различных классов) вызвана разнообразием природно-климатических зон. Так, И.А. Долгов и В.И. Иванцов [31] отмечают, что загрузить зерноуборочный комбайн с высокой пропускной способностью при низкой урожайности и неровностях микрорельефа поля невозможно, поэтому целесообразно иметь отечественные универсальные комбайны различных модификаций для разных зон страны. Создание моделей-эталонов, оптимизацию параметров комбайнов для конкретных зон выполнил Ю.А. Царев [136]. Э.В. Жалнин для сравнения моделей комбайнов в качестве эталонных принял две модели, которые характеризовали состояние комбайнового парка в 2009 году: «Нива-эффект» (класс 5–6 кг/с) и «Вектор-410» (7,7 кг/с) [39].

Г.Е. Чепурин, исследуя динамику урожайности зерновых культур в Сибирском федеральном округе, установил, что средняя урожайность находится в интервале от 12,3 до 17,1 ц/га, но в каждом регионе имеются районы с более высокой урожайностью, поэтому нет общих рекомендаций для регионов по типу комбайнов [137]. Учёным определена урожайность зерновых культур для рациональной загрузки комбайна. Например, для зерноуборочного комбайна, имеющего пропускную способность 6,0 кг/с (третьего класса) при рабочей скорости 7,5–8,0 км/ч и ширине жатки 6 м, урожайность зерновых культур должна находиться в интервале от 22 до 33 ц/га.

Для оценки зерноуборочных комбайнов по четырём основным параметрам – мощности двигателя, площади подбарабання, площади соломотряса и площади решёт очистки – учёные Э.В. Жалнин [39] и В.Я. Гольтяпин [23] предложили применить параметрический индекс комбайна i_k , полученный исходя из принципов гармоничности конструкции комбайна,

$$i_k = 0,25 \cdot (N_e / 33 + F_{II} / 0,26 + F_C / 1,5 + F_P / 0,8), \quad (1.2)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, л.с.; F_{II}, F_C, F_P – площадь подбарабання, соломотряса и решёт очистки соответственно, м².

Между пропускной способностью комбайна с классической схемой молотилки и параметрическим индексом установлена корреляционная связь [23, 39], которую применяют для сравнения зерноуборочных комбайнов

$$q_T = 1,83 \cdot i_k - 0,83. \quad (1.3)$$

Одна из составляющих принципа гармоничности конструкции комбайна, как отмечает Э.В. Жалнин, означает «пропорциональное сочетание параметров всех элементов машины, исходя из заданных по производительности и качеству работы» [38, с. 17]. Очевидно, что нарушение функционирования одной из основных систем зерноуборочного комбайна приведёт к снижению производительности всей машины и к нарушению принципа гармоничности конструкции комбайна. Необходимость определения рабочего органа, нарушающего основной принцип гармоничности конструкции, оптимизация его параметров также отмечены С.В. Троневым и О.А. Федоровой [129].

При выполнении агротехнической оценки определяют суммарные потери зерна молотилкой, которые содержат: потери зерна в соломе; потери зерна в полове; потери зерна распылом; потери зерна из-за недостаточного уплотнения молотилки [87].

Так как потери зерна в соломе оценивают работу молотильно-сепарирующего устройства и сепаратора грубого вороха (соломотряса), потери зерна распылом – прежде всего работу молотильно-сепарирующего устройства, а потери зерна из-за недостаточного уплотнения молотилки – качество выполнения работ при сборке молотилки, то потери зерна в полове оценивают работу системы очистки. Заметим, что при определении потерь зерна в полове зерно может находиться в свободном состоянии и в недомолоченных колосках.

При работе зерноуборочного комбайна на плоской горизонтальной поверхности потери зерна за соломотрясом и системой очистки примерно одинаковые, с некоторым превышением потерь свободным зерном за соломотрясом. По данным Н.Д. Занько, при номинальном режиме зерноуборочного комбайна третьего класса потери зерна за соломотрясом составили 0,55 %, а за системой очистки – 0,28 % [44]. Похожие данные получены при лабораторно-полевых испытаниях зерноуборочного комбайна третьего класса, проведённых на Ал-

тайской машиноиспытательной станции: при приведённой подаче хлебной массы 5,38 кг/с свободное зерно в соломе (потери зерна за соломотрясом) составили 0,76 %, в полове – 0,30 % [87]. Т.е. система очистки при работе зерноуборочного комбайна на горизонтальных полях не является лимитирующим рабочим органом.

По области применения зерноуборочные комбайны подразделяются на равнинные, работающие без нарушения технологического процесса с уклоном до 8 ° в поперечном и продольном направлениях, косогорные, работающие без нарушения технологического процесса на склонах до 10 ° (20 %), и крутосклонные, предназначенные для работы на склонах до 26 ° (46 %) [68]. По склоновой доступности равнинные комбайны могут работать на склонах до 10 °. В работе [155] отмечается возможность работы комбайна в условиях склонов: по сухой поверхности – на склонах до 14 °, по влажной поверхности – на склонах до 9 °. Также возможность использования равнинных комбайнов на склонах до 10 ° отмечается в работах [68, 102]. Для обеспечения безопасной работы на уклонах от 8 до 20 ° «могут применяться обычные энергетические средства с дополнительными мерами по повышению устойчивости к опрокидыванию» [105, с. 165].

Увеличение потерь зерна при работе комбайнов на склонах отмечено в работе [149]: на склонах 5 ° потери зерна удваиваются, а при 10 ° возрастают в 5 раз по сравнению с их работой на равнине. Поэтому уборка зерновых культур на склонах свыше 5 ° требует специальных устройств для оборудования зерноуборочных комбайнов [157]. Величина снижения производительности на 53 % равнинного комбайна при работе на участках с уклоном 15 % приведена в работе [156].

А.Т. Соловьев исследовал влияние факторов на величину потерь зерна и выявил, что наибольшее влияние на величину потерь зерна оказывает загрузка рабочих органов хлебной массой – 44–85 %, затем крутизна склона – 11–40 % (испытания проводились на комбайнах СК-4). Причём крутизна склона оказывает большее влияние на величину потерь зерна за комбайном при движении с поперечным креном (40 %), меньшее – при движении на подъеме (11 %). Учёный установил, что потери зерна растут на 1,0–1,5 % при увеличении крутизны склона на 1° [106].

Неравномерность подачи хлебной массы по ширине молотилки влияет на потери зерна за соломотрясом и системой очистки. В.К. Максимчук установил, что при подаче равномерного потока хлебной массы через средние клавиши соломотряса просеивается 55 % зерна, а через крайние – 45 %. Значение коэффициента неравномерности зерна и соломы для комбайна СК-4 находится в интервале от 10 до 20 %. Подавая поток хлебной массы с неравномерностью от 0 до 65 %, потери зерна за соломотрясом увеличиваются в 3,5 раза [64].

Л. Шпокас, исследуя работу зерноуборочного комбайна на склонах, установил, что на полях с уклоном более 8 ° в колосовой шнек попадает более 40 % зерна, что отрицательно сказывается на производительности комбайна и травмированности зерна [140].

Е. Биэниек исследовал работу системы очистки в гористой местности и выявил, что потери зерна за зерноуборочными комбайнами достигают 13 %. Им отмечено (ссылка на работу [Roszkowski A., 1989: *Kombajnyzbozowedopracy-nazboczach. Maszynyi Ciagniki Rolniczenr 11, Warszawa*]), что «при наклоне до 6 ° средний прирост потерь составлял около 0,2 % на 1 % роста наклона местности. При наклоне местности более 6 ° этот рост может быть в два раза больше» [17].

1.2 Назначение, агротехнические требования и классификация систем очистки зерноуборочных комбайнов

Система очистки – рабочий орган зерноуборочного комбайна, предназначенный для выделения зерна из зернового вороха, очистки от примесей и подачи очищенного зерна в бункер, а недомолоченных колосков – на домолачивающее устройство.

Признаки, которые могут быть положены в основу классификации систем очистки зерноуборочных комбайнов, следующие:

- способы разделения зернового вороха;
- способы подготовки зернового вороха к разделению;
- область применения зерноуборочного комбайна.

По способам разделения зернового вороха можно выделить следующие группы очисток:

- воздушно-решетные очистки (ВРО), в которых разделение зернового вороха происходит за счет одновременного воздействия колеблющегося решета и воздушного потока;
- центробежные системы очистки – за счет действия центробежных сил;
- пневмоинерционные системы очистки – за счет различия в аэродинамических свойствах его компонентов;
- комбинированные, сочетающие различные способы разделения.

По способам подготовки зернового вороха к разделению:

- воздушно-решетные очистки, в которых в качестве транспортирующего рабочего органа выступает стрясная доска, совершающая колебания, за счёт которых происходит сегрегация зернового вороха;
- системы очистки с предварительным разделением зернового вороха, в которых из зернового вороха выделяется часть зерна до его поступления на основную очистку;
- шнековые системы очистки, в которых в качестве транспортирующего рабочего органа применяются винтовые транспортеры;
- комбинированные очистки, сочетающие различные способы подготовки.

1.3 Анализ конструктивных решений системы очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах

Рассмотрим тенденции совершенствования системы очистки зерноуборочных комбайнов по области применения.

Классическая воздушно-решётная система очистки (ВРО) приведена на рисунке 1.3. Данная очистка в недалёком прошлом применялась во многих моделях зерноуборочных комбайнов; в настоящее время – в зерноуборочных комбайнах NOVA, VECTOR, выпускаемых ООО «КЗ «Ростсельмаш» [90].

Система очистки содержит стрясную доску 1, верхний решётный стан 5, удлинитель верхнего решета 6 и нижний решётный стан 7, которые соединены шатунами 12 с эксцентриковым приводным механизмом 11 и установлены посредством двухплечего рычага 13 и подвесок 14, 15, 16 в корпусе молотилки.

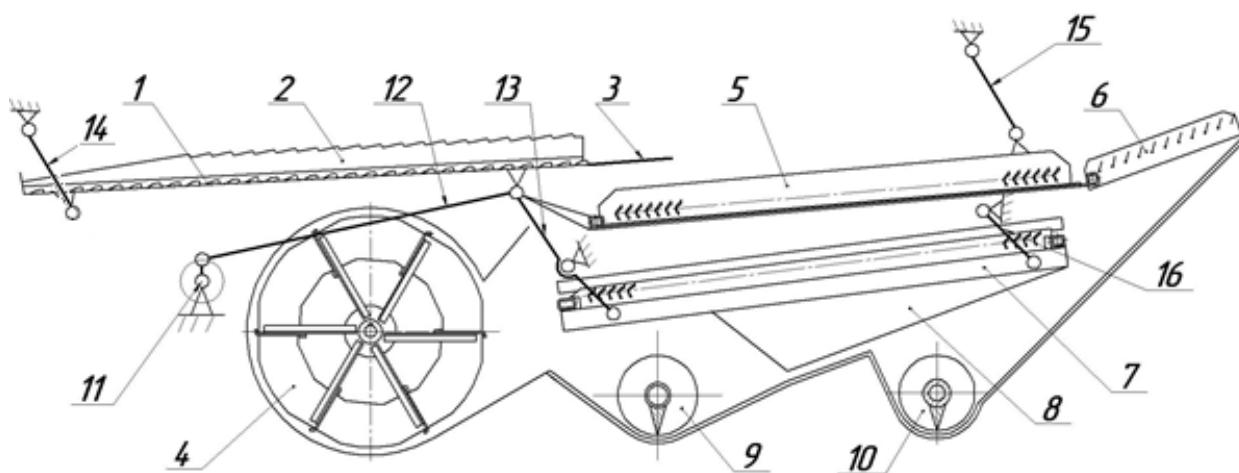


Рисунок 1.3 – Схема классической воздушно-решётной системы очистки (расшифровка позиций – в тексте)

На стрясной доске установлены продольные гребёнки (продольные перегородки) 2, а в задней части – пальцевая решётка 3. Верхний 5 и нижний 7 решётные станы, а также удлинитель 6 снабжены жалюзийными решетками и устройствами для регулирования положения жалюзи. Стрясная доска 1, верхний решётный стан 5 и удлинитель верхнего решета 6 образуют грохот. Система очистки также содержит вентилятор 4, зерновой 9 и колосовой 10 шнеки, скатную доску 8.

Технологический процесс протекает следующим образом. Зерновой ворох поступает в систему очистки двумя потоками: первый поток, состоящий в основном из зерновой фракции q'_{ZO} и небольшого количества солоmistых примесей q'_{CO} , поступает из молотильно-сепарирующего устройства (МСУ) на начало стрясной доски; второй поток, содержащий зерновую фракцию q''_{ZO} и солоmistые примеси q''_{CO} примерно в равном соотношении, поступает из сепаратора грубого вороха (СГВ) на конец стрясной доски.

Зерновой ворох при перемещении по стрясной доске 1, совершающей колебательное движение, частично разделяется – зерновая фракция (более плотная) опускается к поверхности стрясной доски, а солоmistая фракция – поднимается в верхнюю часть слоя. Предварительное расслоение зернового вороха повышает эффективность работы очистки. Так, Г.А. Нестеров [76] выявил, что уменьшение стрясной доски на 960 мм приводит к резкому возрастанию потерь зерна за системой очистки. На пальцевой решётке 3 происходит выделение зерновой фракции, поступающей на начало верхнего жалюзийного решета, а остальная часть зернового вороха идёт сходом с пальцевой решётки. Верхнее жалюзийное решето также совершает колебательное движение, за счёт которого, а также за счёт воздушного потока, подаваемого центробежным вентилятором 4, солоmistая фракция идёт сходом судлинителя верхнего решета и выводится из молотилки, а зерно с колосками, в которых имеется необмолоченное зерно, поступает на нижнее решето, на котором происходит окончательная сепарация зерна. Зерно поступает в зерновой шнек 9, а колоски, поступающие с нижнего решета и удлинителя верхнего решета (проход), поступают в колосовой шнек и далее в домолачивающее устройство (автономного типа или совмещённого с молотильно-сепарирующим устройством). Потери зерна за очисткой составляет свободное зерно, сошедшее сходом с удлинителя верхнего решета.

Отметим основные причины повышенного уровня потерь зерна за системой очистки при работе на склонах комбайна равнинной (базовой) конструкции:

1) при движении комбайна с поперечным наклоном (креном) происходит смещение зернового вороха в сторону уклона (поперечное смещение), ухудшается распределение зернового вороха на решете – у одной боковой стороны решета толщина вороха увеличивается и, как следствие, сопротивление проходу воздушного потока увеличивается, скважность вороха снижается; у другой боковой стороны решета толщина вороха уменьшается, что приводит к непродуктивному расходу воздушного потока;

2) при движении комбайна вверх по склону скорость зернового вороха по решету увеличивается, а время пребывания вороха на решете уменьшается, зерно не успевает пройти сквозь всю толщину вороха;

3) при движении комбайна вниз по склону скорость зернового вороха уменьшается, толщина слоя вороха увеличивается, степень разрыхленности вороха уменьшается, что приводит к снижению интенсивности сепарации зерна;

4) при движении комбайна вверх по склону с одновременным наклоном в поперечном направлении – одновременное действие факторов пп. 1 и 2;

5) при движении комбайна вниз по склону с одновременным наклоном в поперечном направлении – одновременное действие факторов пп. 1 и 3.

Несомненно, наибольшие потери зерна происходят при движении комбайна вверх или вниз по склону с одновременным креном в поперечном направлении.

Ухудшение качества работы системы очистки при работе зерноуборочного комбайна с поперечным или продольным наклоном молотилки, увеличение неравномерности зернового вороха на решётах, ухудшение сепарации зернового вороха при неравномерной подаче хлебной массы отмечается многими исследователями [14, 15, 54, 62, 64, 106, 128, 132, 140, 143, 149, 154, 155, 156].

В результате проведенных исследований Д.С. Уркинбаевым выявлено, что за равнинным комбайном КЗС-3 при изменении угла поперечного наклона от 0 до 8 ° потери зерна в полове увеличились с 0,15 до 1,90 %. При этом заметных изменений в потерях зерна за соломотрясом и молотильным барабаном не наблюдалось, а дробление зерна повышается в 1,8 раза. При изменении угла продольного наклона комбайна (движение вверх по склону) в пределах от 0 до 8 ° наблюдалось нарастание потерь зерна за очисткой и соломотрясом в 2,4 и 1,5 раза, а величины дробления зерна – до 4,9 % (против 2,5 % при горизонтальном положении) [132].

Исследованиями В.Е. Бердышева и С.Г. Ломакина установлено увеличение потерь зерна с 0,7 до 12,7 % (в 18 раз) при увеличении бокового наклона очистки от 0 до 10 ° [15].

Исследованиями, проведенными в АлтГТУ, установлено, что при увеличении поперечного крена молотилки зерновой ворох смещается в сторону уклона, возрастает неравномерность зернового вороха на решетке. Это приводит к ухудшению качественных показателей работы системы очистки. При поперечном крене молотилки зерноуборочного комбайна в наиболее неблагоприятных условиях оказываются крайние участки решета (рисунок 1.4).

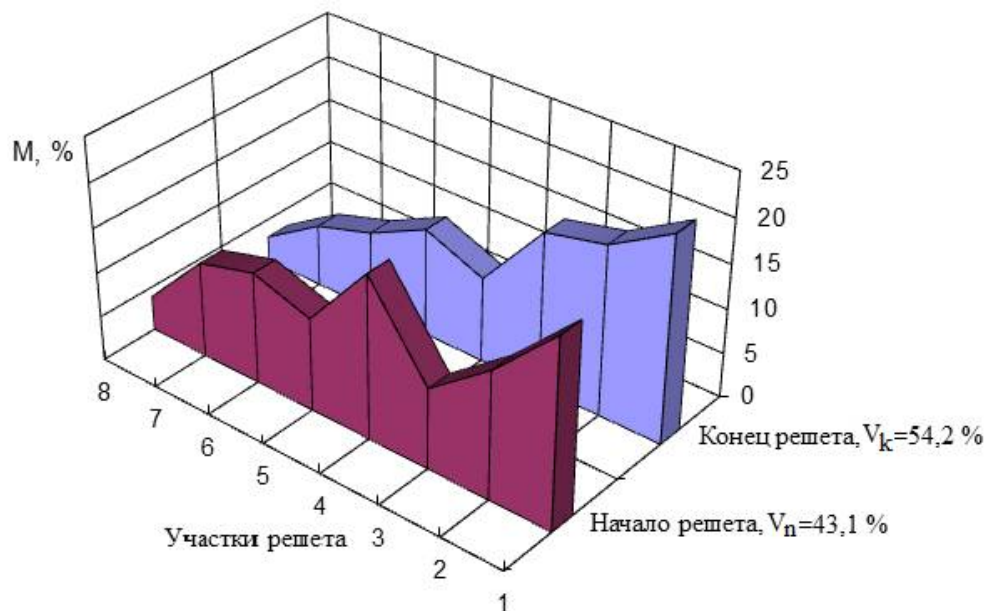


Рисунок 1.4 – Распределение зернового вороха на верхнем решете при поперечном кренекомбайна на угол 8 ° и подаче вороха 2,9 кг/с [122]

При поперечном крене молотилки 8 ° на первый участок решета поступает 21,0 % вороха, а концу решета увеличивается до 23,0 %, на восьмом участке – от 3,9 до 2,9 % соответственно.

Увеличение неравномерности вороха на решетке отрицательно сказывается на качественных показателях работы системы очистки равнинного комбайна – потери зерна, сход зерна в колосовой шнек и засоренность бункерного зерна увеличиваются [34, 47, 101, 122].

Совершенствованием классической системы очистки, увеличением пропускной способности и улучшением качественных показателей её работы занимались многие учёные.

Созданию системы очистки с предварительным разделением зернового вороха посвящены работы Е.А. Гурьева [29], Н.И. Косилова [52], Л.Н. Логинова и В.П. Гаврилова [61], В.Ф. Федорова [134], П.Н. Гришкевича [28] и других ученых. Основная идея указанных работ – это нецелесообразность смешивания потоков зернового вороха, поступающих в систему очистки из МСУ и СГВ.

Идея о нецелесообразности смешивания двух потоков зернового вороха реализована в двухпоточных очистках, разработке которых посвящены работы учёных Э.В. Жалнина [40] и В.А. Анисимова [5, 40], коллектива ученых Алтайского политехнического института им. И.И. Ползунова [99], А.М. Горячкина [26], двухпоточной очистке с пневмоцентробежным сепаратором коллектива авторов И.В. Горбачева [25], А.В. Сиротина [25] и М.М. Бабаева [6, 25]

Предварительное разделение зернового вороха также реализовано в системе очистки с решётно-винтовым сепаратором (РВС) [118]. Применение РВС позволило обеспечить повышение пропускной способности системы очистки как на равнине, так и при поперечном наклоне молотилки.

Интенсификации сепарации зерна в классической системе очистки посвящены работы учёных: за счёт изменения механизма привода системы очистки И.И. Канеева [48], Д.С. Мартыненко [65]; за счёт применения пальцевых решёт, пространственных решёт – С.А. Алфёрова [4], С.М. Барашева [8], М.И. Эйгера [141]; за счёт применения активаторов сепарации зернового вороха – В.Н. Романенко [89]; за счёт улучшения распределения воздушного потока по сепарирующим рабочим органам, улучшения качественных показателей работы вентилятора системы очистки – Ф.И. Салеева [97], А.И. Русанова [92], Ю.И. Ермольева, Д.К. Муратова [36, 37].

Для интенсификации работы системы очистки Ю.И. Ермольев и Д.К. Муратов предлагают секционное верхнее решето, в котором передняя часть имеет оригинальные жалюзи и механизм индивидуального открытия, что позволило обогатить зерновой ворох, поступающий на начало верхнего решета и снизить потери зерна с 0,49 до 0,37 % [37].

Одной из тенденций совершенствования системы очистки является повышение равномерности подачи зернового вороха на верхнее решето. Это может быть достигнуто за счёт замены стрясной доски винтовыми транспортёрами. Однако, как показали исследования, проведённые Т.Б. Микая [70], отсутствие обогащения нижних слоёв зернового вороха снижает эффективность работы очистки. Исследования, проведённые В.Е. Бердышевым и С.Г. Ломакиным, также показали ухудшение работы системы очистки при установке вместо стрясной доски шнековых транспортёров. Увеличение количества шнеков с пя-

ти до шести в молотилке шириной 1500 мм, привело к увеличению неравномерности распределения зернового вороха по ширине очистки и увеличению потерь зерна. Увеличение неравномерности загрузки решёт учёные объясняют ухудшением распределения зернового вороха между шнеками, большей загруженностью двух крайних шнеков [15].

Заметим, что применение в системе очистки решётно-винтового сепаратора, в котором совмещены функции транспортирования зернового вороха с функцией сепарации зерна, позволило повысить эффективность работы системы очистки [118]. Также имеется положительный иностранный опыт применения решётно-винтового сепаратора в системе очистки зерноуборочного комбайна, причём авторами отмечена низкая повреждаемость зерна [144].

Совмещение функции транспортирования с сепарацией зерна также применено в конвейерной очистке, разработанной А.Д. Бекаровым [10], и транспортёрно-колебательной очистке, разработанной В.Е. Бердышевым [16], причём учёные отмечают, что указанные очистки работают эффективнее эталонной в условиях неровного рельефа.

Крутосклонные зерноуборочные комбайны отличаются от базовых модификаций наличием механизмов, выравнивающих молотилку в поперечном и продольном направлениях, устройств контроля и автоматического регулирования положения молотилки, а также ходовой и жатвенной частью.

К отечественным крутосклонным модификациям зерноуборочных комбайнов относились СКК-5 и «Дон-120К», выпускаемые заводом «Ростсельмаш». Основное преимущество крутосклонных модификаций – рост производительности. Так, в сравнении с равнинными модификациями при угле наклона 10° производительность возрастает на 53 %, а при 17° – на 226 % [102]. Зерноуборочный комбайн СКК-5 отличался от базовой модификации конструкцией жатки, ходовой части, выполненной в виде параллелограммного механизма, наличием гидросистемы автоматического регулирования, обеспечивающей наклон влево на 14° , вправо – на 22° . Масса комбайна увеличилась с 7320 кг (масса модели СК-5А) до 8860 кг [102], т.е. на 21 %.

Имеется зарубежный опыт разработки и использования крутосклонных комбайнов. Зерноуборочный комбайн модели 3350AL фирмы Fitagri Laverda, шириной молотилки 1040 мм, отличается способностью к самовыравниванию молотилки в продольном направлении при движении на склонах вверх с уклоном до 30 % и вниз до 10 %, в поперечном направлении – до 42 %. При работе на склонах комбайн автоматически стабилизируется в продольном и поперечном направлениях [148, 149]. Комбайн Laverda 3300AL имеет систему выравнивания, которая обеспечивает горизонтальное положение молотилки в поперечном направлении на склонах до 41 %; в продольном направлении при движении комбайна вверх по склону – до 30 % и вниз – до 10 % [147].

В работе [152] отмечено, что выпускаемые фирмой New Holland (США) крутосклонные комбайны имеют недостатки, а именно – при движении комбайна с поперечным наклоном клавишный соломотряс не занимает горизонтального положения, а при продольном наклоне комбайна положение молотил-

ки вообще не корректируется. Это снижает производительность комбайна. В крутосклонном комбайне модели TL 58i установлена гидравлическая система автоматического выравнивания. Гидроцилиндры выравнивания соединяют ходовую часть комбайна с его корпусом. В работе отмечено, что примененная система выравнивания корпуса уборочной машины обеспечивает удовлетворительную работу комбайнов при движении вдоль склона крутизной до 20 %, а при движении вверх или вниз по склону крутизной до 8 %, что позволяет уменьшить потери зерна в 6 раз, а рабочую скорость увеличить на 40 %.

В крутосклонных комбайнах MF38 и MF40RS установлена система самовыравнивания остова комбайна, включающая в себя маятниковые датчики наклона, сигнал от которых управляет двумя гидроцилиндрами, вращающими эксцентриковую конечную передачу, выравнивающую остов комбайна [Заявка 4016878 ФРГ; Заявл. 25.05.90; Опубл. 28.11.91].

Крутосклонные комбайны Fiatagri AL 519 Collina и New Holland AL 59 Hillside оснащены системой Laverda, сочленённой с электронным управлением. Данная система обеспечивает выравнивание молотильно-сепарирующей системы комбайна, что позволяет ему работать на поперечных склонах до 38 % и на продольных склонах до 30 и 10 % [151].

Фирма New Holland в зерноуборочном комбайне серии CSX для пологих и покатых склонов применяет систему Smart-Sieve, которая придаёт верхнему решету колебания в поперечном направлении, а для уборки зерновых на сильно пересечённой местности – систему с боковым выравниванием молотилки [150].

Таким образом, крутосклонные модификации комбайнов имеют более сложную конструкцию, обеспечивающую возможность их работы на склонах до 25° (42 %).

Основываясь на известных технических данных зернокомбайна СКК-5, выполним анализ рентабельности крутосклонной модификации зерноуборочного комбайна. В соответствии с ГОСТ Р 53057-2008 «Машины сельскохозяйственные. Методы оценки конкурентоспособности», определим интегральный показатель конкурентоспособности машины

$$k_M = k_1 \cdot \gamma_1 + k_2 \cdot \gamma_2 + k_3 \cdot \gamma_3 + k_4 \cdot \gamma_4 + k_5 \cdot \gamma_5 , \quad (1.4)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – факторные коэффициенты соответственно цены, прямых затрат денежных средств, производительности труда, безопасности труда, величины убытка от снижения продуктивности и повреждения сельскохозяйственного продукта конкурирующей машины; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ – значения удельного веса факторных коэффициентов.

Факторный коэффициент k_1 зависит от цены базовой $B_б$ и цены $B_к$ конкурирующей машин. Примем цену машин прямо пропорционально их массе

$$k_1 = \frac{B_{\bar{o}}}{B_{\kappa}} = \frac{M_{\bar{o}}}{M_{\kappa}} = \frac{7320}{8860} = 0,826, \quad (1.5)$$

где $M_{\bar{o}}$ – масса базовой машины (зерноуборочного комбайна СК-5А); M_{κ} – масса конкурирующей машины (зерноуборочного комбайна СКК-5).

Факторный коэффициент k_3 зависит от производительности труда конкурирующей Z_{κ} и базовой $Z_{\bar{o}}$ машин

$$k_3 = \frac{Z_{\kappa}}{Z_{\bar{o}}}. \quad (1.6)$$

Так как при угле наклона комбайна до 4° потери зерна и, следовательно, производительность зерноуборочного комбайна изменяются незначительно, а при углах наклона 10 и 17° производительность крутосклонного (конкурирующего) комбайна возрастает соответственно на 53 и 226% [102], то значения коэффициента для указанных углов наклона равны: $k_{3,4} = 1$; $k_{3,10} = 1,53$; $k_{3,17} = 3,26$.

С учётом вышесказанного, интегральный показатель конкурентоспособности крутосклонного комбайна вычислим по формуле (1.4), при этом учтём только два коэффициента – k_1 и k_3 со значением удельного веса $\gamma_1 = 0,5$ и $\gamma_2 = 0,5$. Остальные факторные коэффициенты, требующие для расчёта дополнительные данные, с учётом рекомендаций по ГОСТ Р 53057-2008, приняты равными нулю. Результаты расчёта представлены на рисунке 1.5.

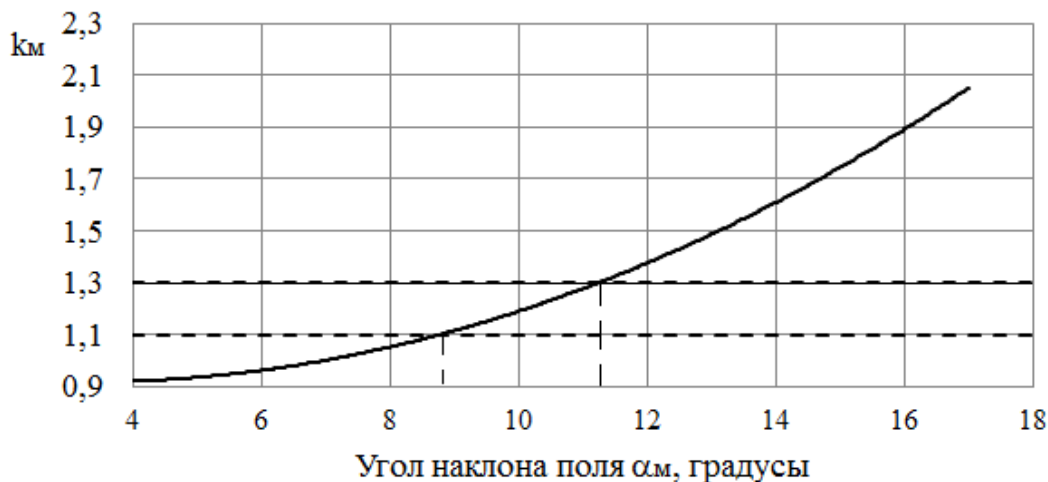


Рисунок 1.5 – График зависимости интегрального показателя конкурентоспособности машины от уклона поля

По ГОСТ Р 53057-2008 значение показателя от $1,0$ до $1,1$ свидетельствует о низком уровне конкурентоспособности, от $1,1$ до $1,3$ – о среднем уровне, более $1,3$ – о высоком. Таким образом, крутосклонную модификацию зерноуборочного комбайна целесообразно применять на полях с уклоном более 10° .

Другие исследователи также получили похожие результаты [102, 149, 156]. В работе [149] отмечено, что цена крутосклонных комбайнов увеличива-

ется по сравнению с их базовыми моделями на 20–50 %, причем на небольших склонах достаточно выравнивания только очистки комбайна.

Таким образом, на покатых и сильно покатых склонах до 10 ° целесообразно использовать косогорную модификацию зерноуборочного комбайна, отличающуюся от базовой наличием устройств, способствующих повышению эффективности работы системы очистки.

Можно выделить следующие направления повышения эффективности работы системы очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах:

- повышение равномерности подачи зернового вороха, поступающего на верхнее решето системы очистки;
- выравнивание системы очистки и решет относительно горизонта;
- выравнивание толщины зернового вороха на верхнем решете за счёт введения дополнительных колебаний решета в поперечном направлении;
- изменение распределения воздушного потока в зависимости от наклона молотилки.

Эти направления реализованы в конструкциях очисток зарубежных косогорных зерноуборочных комбайнах, разработках отечественных ученых, в т.ч. разработках ученых АлтГТУ.

Зерновой ворох поступает на верхнее решето в основном сострясной доски. Равномерное распределение зернового вороха по поверхности стрясной доски, особенно в её конце, обеспечивает равномерность поступления вороха на верхнее решето. Отметим следующие основные группы устройств, применение которых повышает равномерность подачи зернового вороха на решето: пассивные устройства; автономные устройства с активными рабочими органами; устройства, предназначенные для решения и других задач, например, сепарации зернового вороха.

Для предотвращения смещения зернового вороха в сторону уклона на стрясной доске устанавливаются продольные гребенки. Причем в моделях зерноуборочных комбайнов шаг и высота гребенок увеличиваются: в зерноуборочном комбайне СК-5 М «Нива» количество продольных гребенок $m_{\Pi} = 2$, высота $h_{\Pi T} = 0,05$ м; в комбайне «Вектор» – $m_{\Pi} = 4$, $h_{\Pi T} = 0,08$. Как было отмечено, продольные гребенки предотвращают перемещение зернового вороха в боковом направлении, т.е. сохраняют распределение вороха, поступающего на стрясную доску, но не улучшают его. Шаг продольных гребенок и их высота должны определяться исходя из пропускной способности зерноуборочного комбайна, типа молотильно-сепарирующего устройства, ширины стрясной доски.

В устройстве по а.с. № 1119630 СССР (авторы П.М. Арбузов, А.П. Малышев, О.В. Автоманов и др.) для улучшения распределения зернового вороха на стрясной доске путём предотвращения его смещения в сторону уклона гребенки установлены под углом относительно продольной оси комбайна.

В конструкции системы очистки по а.с. № 1414344 СССР (авторы Н.В. Чунарев и В.М. Пучков) над стрясной доской установлены два шнека с

винтовой навивкой разных направлений, включаемых в работу в зависимости от наклона комбайна вправо или влево. Применение шнековых распределителей выравнивает зерновой ворох по ширине очистки до его поступления на верхнее решето, но усложняет конструкцию системы очистки.

Для предотвращения смещения зернового вороха в сторону уклона В.П. Егоровым предложена конструкция зерноуборочного комбайна, в которой вместо стрясной доски установлен ленточно-планчатый транспортёр с поперечными перегородками и лопастные барабаны, расположенные по боковым сторонам (а.с. № 1436925 СССР). Во время работы комбайна на склоне включается тот лопастной барабан, в сторону которого произошёл наклон. Зерновой ворох отбрасывается от боковой стенки, чем достигается повышение равномерности его подачи на верхнее решето. Однако зерновой ворох при перемещении ленточно-планчатым транспортёром не расслаивается на компоненты, что снижает эффективность сепарации зерна на верхнем решете.

Распределитель зернового вороха, установленный над стрясной доской, может быть выполнен в виде вращающихся дисков с лопастями, а для предотвращения бокового смещения зернового вороха на поверхности стрясной доски установлены продольные перегородки (заявка № 4016878 ФРГ).

Равномерность распределения зернового вороха также может быть достигнута путем изменения угла наклона стрясной доски зерноуборочного комбайна. В устройстве по заявке ФРГ № 4128667 наклон стрясной доски может меняться как в продольном, так и в поперечном направлениях. Это обеспечивается за счет специальной системы подвески доски на шаровых опорах с направляющими и тросового привода, действующего от следящей гидросистемы с маятниковым датчиком наклона. В устройстве по заявке ФРГ № 4034435 разравнивание зернового вороха обеспечивается смещением транспортной доски вбок относительно продольной оси комбайна в направлении вверх по уклону, поворачиваясь относительно вертикальной оси, находящейся в передней части устройства. Это смещение обеспечивается применением направляющей и кулачка, установленных в конце транспортной доски.

Предотвращение смещения зернового вороха на верхнем решете по а.с. № 1648279 СССР (авторы В.П. Луговой и Ю.В. Луговой) обеспечивается применением криволинейных в поперечной плоскости сепарирующих элементов, причём указанные сепарирующие элементы могут быть выполнены из плоских секций. В патенте РФ № 2113104 (автор В.А. Горлов) для работы зерноуборочного комбайна на склоне и обеспечения равномерного распределения зернового вороха по ширине решета применено перфорированное решето, разделённое на полосы перегородками в виде гофр, делящих решето на 8–10 полос, а высота гофр составляет 0,3–0,4 ширины полосы.

Заметим, что применение устройств этой группы не позволяет достичь высокой эффективности функционирования системы очистки из-за смещения зернового вороха на верхнем решете. Вызывает интерес сочетание устройств, подготавливающих зерновой ворох до очистки и предотвращающих смещение его на верхнем решете. Так, в устройстве по а.с. № 1435192 СССР (авто-

ры С.Г. Ломакин и В.Е. Бердышев) направители потока вороха установлены на стрясной доске и верхнем решете.

Повышение эффективности работы зерноуборочного комбайна на склонах также может быть достигнуто за счёт горизонтального выравнивания решёт или системы очистки. Сотрудниками Всесоюзного научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства разработана очистка со стабилизированным в двух плоскостях решетным станом. Выравнивание решёт в продольной плоскости в предлагаемых конструкциях очистки достигается с помощью вспомогательной рамы, шарнирно соединённой с рамой комбайна с возможностью наклона в продольной плоскости. Стабилизация решёт в поперечной плоскости достигается установкой блока решёт с возможностью поворота относительно продольного шарнира с помощью гидроцилиндра (а.с. № 1821088 СССР, авторы А.С. Мнацканов, Э.В. Жалнин, Д.Н. Уркинбаев). Стабилизация решёт в горизонтальном положении в другом устройстве достигается путём разделения решёт на две части с выравниванием каждой части (а.с. № 1825601 СССР, авторы Д.Н. Уркинбаев, Э.В. Жалнин, А.С. Мнацканов). Д.Н. Уркинбаев отмечает, что стабилизация положения решётного стана зерноуборочного комбайна с роторным соломосепаратором при изменении угла продольного наклона до 8° «потери зерна в полове ... оставались практически постоянными и составляли соответственно 0,7...0,9 % ...» [132, с. 19] (за базовой очисткой – 0,7...2,4 %). При поперечном наклоне комбайна на угол 6° полученные результаты отличались: «Стабилизация горизонтального положения решета в поперечном направлении позволила снизить потери зерна с 2,3 до 1,2 %, т.е. в 1,9 раза, при наклоне комбайна вправо» [132, с. 19], а при наклоне влево – «с 3,3 до 1,6 %, т.е. в 2,1 раза ...» [132, с. 19]. Различие потерь зерна в зависимости от наклона молотилки вызвано работой роторного соломосепаратора, смещающего зерновой ворох к одной из стенок молотилки. Применение в очистке зерноуборочного комбайна решетного стана с возможностью поворота относительно поперечной оси предложено сотрудниками ВИМа (пат. № 2036576 РФ).

Боковое выравнивание решет применено в зерноуборочных комбайнах Ford фирмы New Holland TF46 [145] и серий «ТС» и «ТХ» [153], в зерноуборочных комбайнах фирмы Deutz-Fahr (уклон до 11°) [146]. В Институте Сельскохозяйственной Инженерии Природоведческого Университета г. Вроцлав разработано двухплоскостное сито, установленное в зерноуборочном комбайне New Holland-Vizon и предназначенное для снижения потерь зерна при движении вверх по склону (в гору) [17]. Испытания показали, что при установке заводского решета при движении в гору до 15° потери зерна составляли от 6 до 7 %, а установка двухплоскостного решета уменьшила потери зерна до 0,35 %. Таким образом, достигнуто значительное повышение эффективности работы зерноуборочного комбайна. Заметим, что комбайн не может постоянно перемещаться вверх по склону, что влечёт повышенный уровень потерь зерна при движении комбайна вниз по склону или поперёк склона.

Несоответствие распределения по ширине очистки воздушного потока распределению зернового вороха, что наблюдается при работе комбайна на

склонах, также приводит к повышенным потерям зерна. Автором совместно с сотрудниками АлтГТУ выполнены исследования по определению влияния распределения воздушного потока на работу системы очистки при поперечном крене комбайна. Исследования выполнены на лабораторной установке, разработанной на основе молотилки зерноуборочного комбайна третьего класса. Неравномерность распределения зернового вороха и воздушного потока оценивали с помощью коэффициента вариации. При горизонтальном положении молотилки потери зерна за системой очистки составили 0,13 %, при этом наблюдалась некоторая неравномерность как воздушного потока (24,3 %), так и зернового вороха (9,1 %) (рисунок 1.6) [47, 125].

При поперечном крене молотилки зерновой ворох смещается в сторону уклона. Для направления воздушного потока в сторону уклона в патрубке вентилятора были установлены три направителя воздуха (рисунок 1.7).

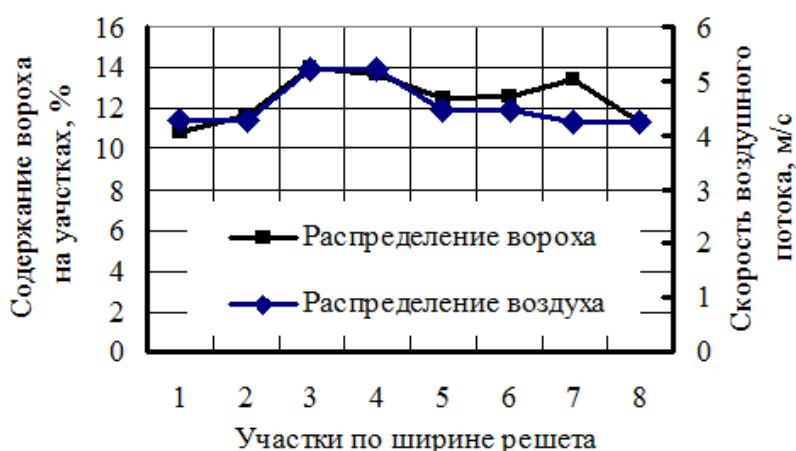


Рисунок 1.6 – Распределение зернового вороха и воздушного потока на верхнем решете при горизонтальном положении молотилки

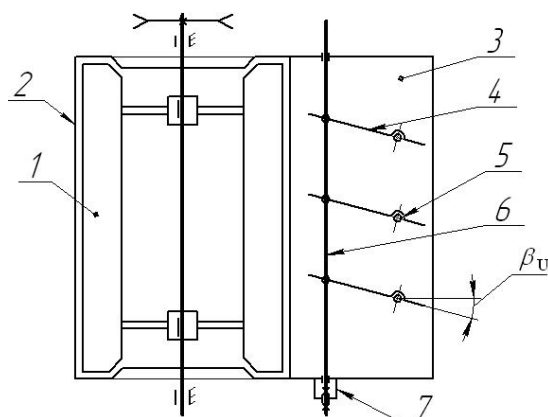


Рисунок 1.7 – Схема вентилятора с устройством для перераспределения воздуха в зависимости от поперечного крена молотилки: 1 – крылач; 2 – кожух; 3 – выходной патрубок; 4 – направитель; 5 – ось направителя; 6 – тяга; 7 – регулировочное устройство

Положение направителей 4 относительно продольной оси комбайна (угол β_U) изменяли посредством тяги 6 и регулировочного устройства 7, установленного на кожухе 2 вентилятора. При изменении угла установки направителей от 0 до 25 ° средняя скорость воздушного потока на верхнем решете снизилась с

4,5 до 4,0 м/с, т.е. на 11,1 %, при этом воздушный поток направлялся к одной из стенок, что привело к увеличению коэффициента вариации скорости воздуха V_U до 50,9 % (рисунок 1.8).

При поперечном крене молотилки на угол 8° потери зерна уменьшились и практически оставались на одном уровне при угле установки направителей от 15° (рисунок 1.9), но при этом наблюдался рост засоренности зерна соломистыми примесями.

При поперечном крене молотилки на угол 12° существенное снижение потерь зерна наблюдалось при β_U от 25 до 30° . Таким образом, изменение направления воздушного потока при поперечном крене молотилки улучшает работу системы очистки.

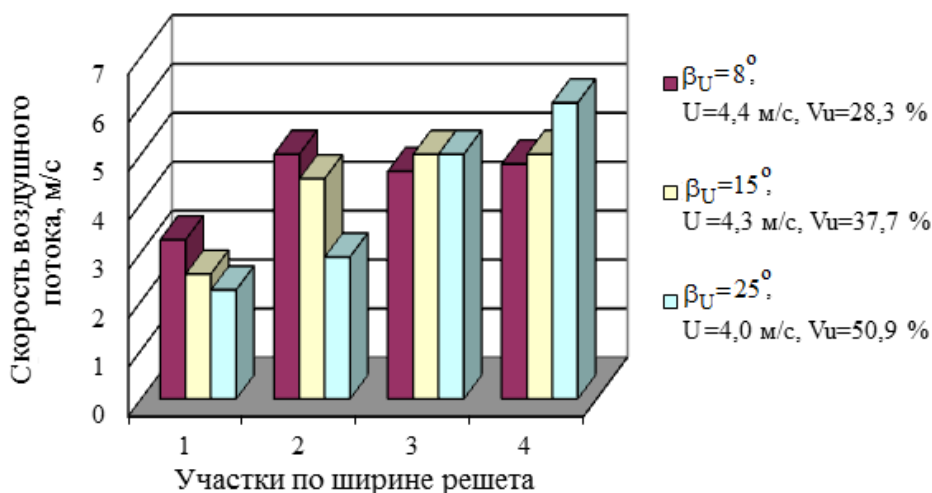


Рисунок 1.8 – Распределение воздушного потока в зависимости от положения направителей воздуха

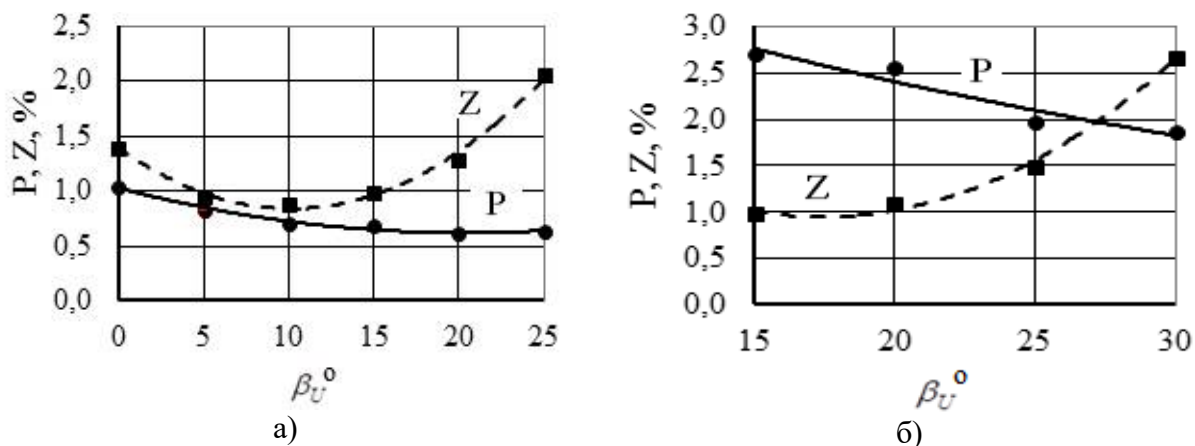


Рисунок 1.9 – Потери зерна P и засоренность бункерного зерна Z в зависимости от угла β_U ($q_B=2,9$ кг/с, $C=30$ %): а) поперечный крен молотилки 8° ; б) поперечный крен молотилки 12°

Изменение распределения воздушного потока в зависимости от поперечного крена комбайна вправо или влево достигается в устройстве двухсекционного верхнего решета за счёт различного зазора между сегментами секций решета (патент № 2195804 РФ, авторы С.Ф. Сороченко, А.А. Коптев). В секции решета, которая находится внизу (в сторону уклона) и на которую смещается

зерновой ворох, зазор между сегментами увеличивается, а в другой секции решета, которая менее загружена ворохом, зазор между сегментами уменьшается, что приводит к перераспределению воздушного потока.

Для изменения распределения воздушного потока в системе очистки с осевыми вентиляторами (по типу зерноуборочного комбайна «Кедр-1200» [61]) разработан вентилятор, в выходном окне которого в зоне размещения крыльчаток расположены криволинейные экраны, с кривизной, равной кривизне кожуха вентилятора. Экраны имеют перфорированные и неперфорированные участки, выполнены с возможностью перемещения относительно выходного окна и закреплены зеркально между собой (патент № 2098936 РФ, авторы С.Ф. Сороченко, Ф.И. Салеев). При уборке зерновых на склонах экраны поворачиваются, причём выходное окно в его нижней стороне открывается полностью, а на противоположной стороне перекрывается неперфорированным участком экрана. В результате обеспечивается соответствие распределения воздушного потока и зернового вороха.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности работы зерноуборочного комбайна на склонах является применение устройств с инерционным выравниванием зернового вороха на верхнем решете очистки. Это направление реализовано в конструкциях зарубежных комбайнов, прежде всего фирмы Claas – система 3D-очистки (патент № 1371489 СССР, патентообладатель Клаас ОХГ), а также в разработках отечественных учёных – сотрудников ПО «Ростсельмаш» (патент № 2041594 РФ) и с 1994 г. – сотрудников АлтГТУ [32, 34] (патент № 2073411 РФ, авторы С.Ф. Сороченко, В.М. Фролов, В.Ф. Семёнов, А.Г. Колесников; патент № 2134503 РФ, авторы С.Ф. Сороченко, И.В. Киреев, А.Ю. Кулаков; патент № 2177683 РФ, авторы С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюк). Зерноуборочные комбайны TUCANO, оснащённые 3D-очисткой, обеспечивают стабильную работу при боковых кренах до 20 % [79]. В 2010 г. авторским коллективом Казанского ГАУ (А.В. Белинский, А.И. Фарухшин, П.А. Матвеев и Н.А. Корсаков) запатентован способ динамического выравнивания слоя вороха, заключающийся в сообщении решётному стану боковых колебаний, и устройство для его осуществления в виде гидровибраторов правого и левого крена (патент № 2519850 РФ), а А.В. Белинским, А.В. Милюковым и Р.А. Жильцовым предложено кулачковое устройство для создания решету колебаний в поперечном направлении (патент № 2521667 РФ).

Применение колебаний решета в поперечном направлении (авторский коллектив в составе У.К. Сабиева, И.В. Скусанова, А.Ю. Головина [96]) или круговых движений решета (И.П. Лапшин [58]) с целью интенсификации процесса сепарации зерна также применяется при послеуборочной обработке зерна.

Выполненный анализ позволил разработать классификацию технологических операций и конструкций очисток комбайна для работы на склонах, представленную на рисунке 1.10.

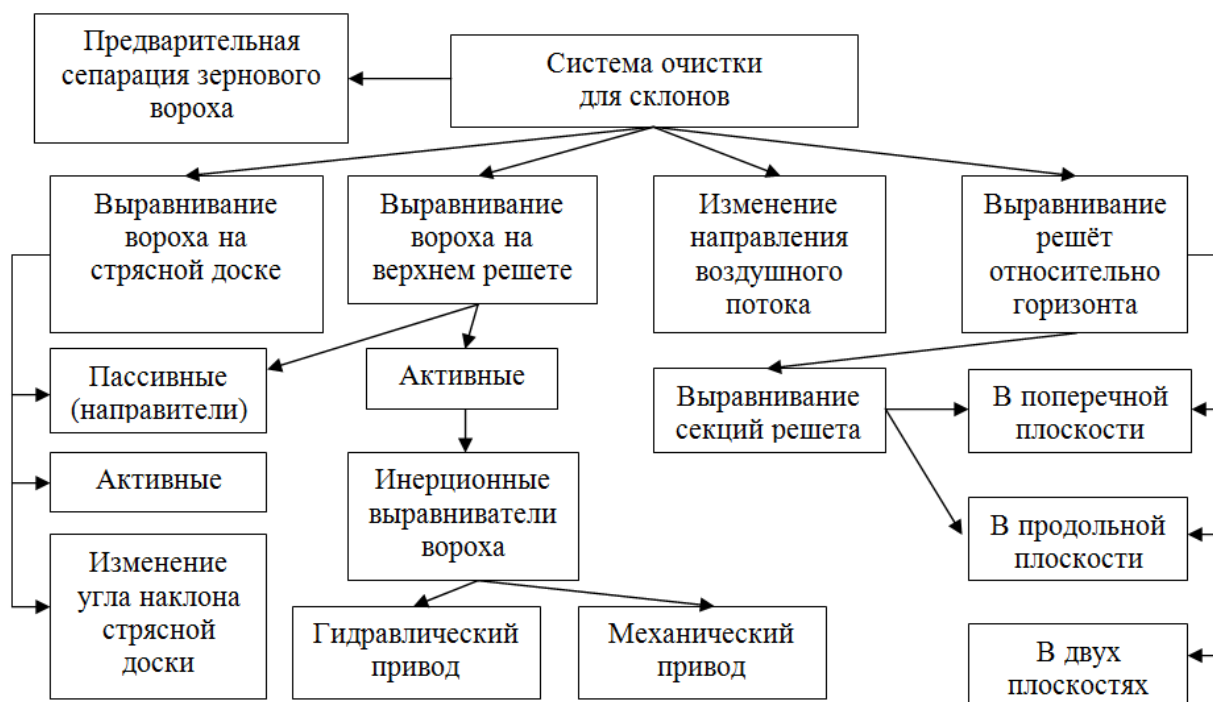


Рисунок 1.10 – Классификация технологических операций и технических решений сепарации зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах

1.4 Факторы, влияющие на поведение зернового вороха в системе очистки

В процессе работы зерноуборочного комбайна в систему очистки поступает зерновой ворох, состоящий из семян основной культуры, соломистой фракции, семян других культурных и сорных растений, минеральных примесей. Соломистая фракция представлена сбоиной (перебитая солома различной длины с узелками и без них), половой (колосковые и цветочные чешуйки), невымолоченными колосьями и их частями, вымолоченными колосьями.

Отметим факторы, влияющие на поведение зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна (движение по поверхности решета и жалюзи, смещение в сторону уклона, подбрасывание и полёт над решетом, сегрегацию, сепарацию зернового вороха):

1) физико-механические свойства компонентов вороха: размерные характеристики $\Omega(l)$; аэродинамические (скорость витания $\Omega(U_S)$ и коэффициент парусности $\Omega(k_{II})$); влажность $\Omega(W)$; фрикционные (коэффициент трения зерна по соломе f_{ZC} , коэффициент трения компонентов вороха по поверхности жалюзи $\Omega(f)$, приведенный коэффициент трения вороха по решету (f_{II})); плотность $\Omega(\rho_B)$ и объемная масса $\Omega(\gamma_B)$;

2) технологические: подача зернового вороха q_B ; содержание соломистой фракции в зерновом ворохе C ; угол наклона молотилки комбайна в продольной δ_K и поперечной α_K плоскостях;

3) конструктивные параметры системы очистки: площадь решета (длина L_P , ширина решета B_P); тип и размеры отверстий решета (живое сечение решета φ_P); количество (m_{II}) и высота (h_{II}) продольных гребенок (или перегородок);

4) кинематические параметры системы очистки: радиус кривошипа приводного вала r , циклическая частота колебаний ω , направление колебаний решета относительно горизонта β ;

5) аэродинамические параметры системы очистки: скорость воздушного потока U и угол наклона воздушного потока γ ; коэффициент вариации воздушного потока по ширине решета V_{UB} ; коэффициент вариации воздушного потока по длине решета V_{UL} ;

6) параметры, описывающие состояние зернового вороха: распределение зерна по высоте слоя вороха; распределение вороха по ширине очистки (оценивается коэффициентом вариации толщины вороха V_h); скорость зернового вороха в продольном направлении V_{BX} ; скорость зернового вороха в поперечном направлении V_{BY} ; скорость просеивания зерна в слое вороха V_C ; разрыхленность вороха η .

Вследствие многообразия частиц каждого компонента зернового вороха значения свойств являются случайными величинами, которые оцениваются статистическими характеристиками: средним значением \bar{X} ; математическим ожиданием M_X ; дисперсией σ_X^2 ; среднеквадратичным отклонением σ_X ; коэффициентом вариации случайной величины

$$V_X = \frac{\sigma_X}{\bar{X}} \cdot 100\% . \quad (1.7)$$

Фракционный состав соломистой части зернового вороха пшеницы сорта «Алтайская 81» и «Целинная 60» после обмолота хлебной массы однобарабанным зерноуборочным комбайном СК-5М «Нива» приведен в таблице 1.2. Аэродинамические свойства компонентов зернового вороха пшеницы сорта «Алтайская 81» приведены в таблице 1.3 [118].

Таблица 1.2 – Фракционный состав соломистой фракции зернового вороха

Сорт пшеницы	Компоненты	Содержание, %
Алтайская 81	Колосковые и цветковые чешуйки (длина частиц менее 20 мм)	70,9
	Сбоина и колоски	28,5
	Целые колосья и части колоса	0,6
Целинная 60	Колосковые и цветковые чешуйки (длина частиц менее 15 мм)	80,7
	Сбоина и колоски	19,3

Таблица 1.3 – Аэродинамические свойства компонентов зернового вороха

Компоненты вороха	Скорость витания, м/с		Коэффициент парусности \bar{k}_Π
	\bar{U}_S	σ_{US}	
Целые зерна	8,5	0,49	0,14
Полова	2,4	0,36	1,70
Сбоина	5,0	1,86	0,39
Колоски	5,1	1,72	0,38

При перемещении зернового вороха по решетку вместо коэффициента трения применяют приведённый коэффициент трения $f_{\Pi P}$, в котором учтено сцепление соломистой фракции с решетом [4, 118].

Автором, совместно с В.А. Дрюком и А.Г. Подлесновым, с помощью прибора В.А. Желиговского определены приведенные коэффициенты трения соломистой фракции зернового вороха с жалюзийным решетом и перфорированным решетом [120]. Исследовалась соломистая фракция зернового вороха пшеницы «Алтайская 50». Приведённый угол трения определяли по отклонению центра пучка солоmistых частиц от нормали к линейке при ее движении вдоль направляющей. В пучке солоmistые частицы были хаотично ориентированы. По величине приведенного угла трения $\varphi_{\Pi P}$ определяли приведенный коэффициент трения.

В результате проведенных экспериментов с применением метода планирования эксперимента получены следующие параметры:

- коэффициент трения солоmistых частиц по стальной поверхности

$$f = 0,556 - 0,765/W; \quad (1.8)$$

- приведенный коэффициент трения солоmistой фракции зернового вороха с влажностью от 6,4 до 30,2 % по поверхности перфорированного решета с отверстиями диаметром от 7 до 15 мм – 0,81;

- приведенный коэффициент трения солоmistой фракции зернового вороха по решетку в поперечном направлении – 0,88;

- приведенный коэффициент трения солоmistой фракции зернового вороха по жалюзийному решетку в прямом направлении, в зависимости от зазора между гребенками жалюзийного решета S

$$f_{\Pi P} = 0,45 + 0,033 \cdot S; \quad (1.9)$$

- приведенный коэффициент трения солоmistой фракции зернового вороха по жалюзийному решетку в обратном направлении – 1,19.

По данным исследователей, рациональная скорость воздушного потока в системе очистки имеет следующие значения: над поверхностью верхнего решета – 4,0–5,0 м/с, в перепаде между стрясной доской и верхним решетом – 6,0–7,4 м/с (В.И. Машанов [67], Н.Д. Дымченко [35]); над верхним решетом $U = (1,0 \dots 1,25)U_S$, здесь U_S – критическая скорость солоmistых частиц, удаляемых воздушным потоком (Е.А. Гурьев) [29]; над верхним решетом – 3,16–4,7 м/с (С.А. Алферов [4]).

Для сепарации зернового вороха немаловажное значение имеет распределение воздушного потока по решетам очистки. В работе [75] отмечено, что воздушный поток должен быть равномерно распределен по ширине верхнего решета, а по длине начальный участок должен обдуваться с большими скоростями, на остальной же части скорости должны уменьшаться по гиперболическому закону с достаточным обдувом удлинителя.

1.5 Анализ математических моделей поведения зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна

Сепарация зернового вороха является основным технологическим процессом, протекающим в системе очистки зерноуборочного комбайна.

Отделение зерна от примесей зерна в зерноуборочном комбайне происходит в молотильно-сепарирующем устройстве (МСУ), в сепараторе грубого вороха (СГВ) и в системе очистки. Модели, описывающие сепарацию зерна в указанных устройствах, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Модели сепарации зерна в сепарирующих устройствах зерноуборочных комбайнов

Автор, источник	Рабочий орган	Модель сепарации
1	2	3
М.Н. Летошнев [60]	Соломотряс	$y = a \cdot e^{-\mu \cdot x}, \quad (1.10)$ <p>где a – подача зерна; μ – коэффициент сепарации; x – расстояние от начала решета</p>
И.Ф. Василенко [20]	Соломотряс	$y = a \cdot e^{-\mu \cdot x},$ $\mu = \frac{\alpha_C \cdot k_C}{V_{CO} \cdot \Delta t}, \quad (1.11)$ <p>где α_C – вероятность просеивания зерна через слой соломы; k_{CZ} – вероятность просеивания зерна через решетку сепаратора; V_{CO} – скорость соломы; t – время между двумя последовательными встряхиваниями</p>
И.Ф. Василенко [20]	Соломотряс	$\frac{\mu}{\mu_1} = \frac{H_1}{H}, \quad (1.12)$ <p>где μ, μ_1 – коэффициенты сепарации при толщине слоя соломы H и H_1 соответственно</p>
Н.Е. Авдеев [2]	Соломотряс	$y = a \cdot e^{-\mu \cdot x^2} \quad (1.13)$
Г.А. Кузин [56]	Роторный соломотряс	$y = a \cdot e^{-\mu \cdot S}, \quad (1.14)$
		$\mu = \frac{\alpha_C \cdot k_{CC}}{\beta_0}, \quad (1.15)$ <p>где α_C – вероятность просеивания через решетку соломотряса; k_{CC} – вероятность просеивания зерна через солоmistую решетку; β_0 – длина дуги одной попытки</p>

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3
С.А. Алферов [4], С.М. Барашев [8], М.И. Эйгер [141]	Система очистки	$y = a \frac{\mu_P e^{-\mu_B \cdot L} - \mu_B e^{-\mu_P \cdot L}}{\mu_P - \mu_B}, \quad (1.16)$ <p>где μ_P – коэффициент сепарации зерна через решето; μ_B – коэффициент сепарации зерна через слой вороха</p>
С.М. Барашев [8]	Система очистки	$\mu_B = \mu_{ЭЛ} \cdot \frac{h_{ЭЛ}}{h_B}, \quad (1.17)$ $\mu_{ЭЛ} = \frac{P \cdot k}{V_{CP} \cdot \Delta t}, \quad (1.18)$ <p>где $\mu_{ЭЛ}$ – коэффициент сепарации на элементарном слое; $h_{ЭЛ}, h_B$ – толщина элементарного слоя и слоя вороха</p>
С.А. Алферов [4], М.И. Эйгер [141]	Система очистки	$\mu_B = \mu_{ЭЛ} - \frac{1}{x} \cdot \ln \sum_{i=1}^n \left[\frac{a_i \cdot \sum_{k=0}^{i-1} (\mu_{ЭЛ} \cdot x)^k}{k!} \right], \quad (1.19)$ $\mu_{ЭЛ} = \frac{P_{ПП} \cdot k}{V_{CP} \cdot \Delta t}, \quad (1.20)$ <p>где a_i – количество проходových частиц в i-ом слое; n – количество слоев; $P_{ПП}$ – вероятность прохода зерна сквозь элементарный слой; k – коэффициент пропорциональности; Δt – время</p>
Н.А. Смирнов [104]	Сепаратор соло-мистого вороха	$P_B = \frac{\alpha_{II}^n}{\Gamma(n)} \int_0^t x^{n-1} \cdot e^{-\alpha_{II} x} dx, \quad (1.21)$ <p>где P_B – вероятность выделения зерна до момента времени t; $\Gamma(n)$ – гамма-функция; α_{II} – интенсивность разрушения препятствий; n – количество препятствий</p>
Н.И. Косилов, М.Р. Думанский [53]	Система очистки	$y = a \cdot \exp(-L_P \mu_P e^{-a_1 \sigma_B^2}), \quad (1.22)$ <p>где a_1 – коэффициент, зависящий от подачи и состава вороха; σ_B – среднеквадратическое отклонение подачи вороха</p>
А.И. Русанов [92]	Молотильно-сепарирующее устройство (МСУ) и соломотряс	$\xi = 100 \cdot \exp(-\mu_0 \cdot L^\alpha) \cdot \exp(-\mu_{OC} \cdot L_C^\beta), \quad (1.23)$ <p>где μ, μ_{OC} – коэффициенты сепарации (МСУ и соломотряс); L, L_C – длина подбарабання и соломотряса; α, β – коэффициенты</p>
М.А. Ульяненко [131]	Система очистки	$y_2 = y_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot L_1} \cdot (1 - e^{-\mu_2 \cdot L_2}), \quad (1.24)$ $y_3 = y_0 \frac{\mu_1}{\mu_3 - \mu_1} (e^{-\mu_3(L_3 - L_1) - \mu_1 L_1} - e^{-\mu_3 L_3}), \quad (1.25)$ <p>где y_2 – проход зерна через удлинитель; y_3 – сход зерна с нижнего решета; y_0 – подача зерна на очистку; μ_1, μ_2, μ_3 – коэффициенты сепарации зерна на верхнем решете, удлинителе и нижнем решете соответственно</p>

Часто сепарацию зерна описывают с помощью экспоненциальной зависимости (1.10), предложенной М.Н. Летошневым и уточнённой И.Ф. Василенко, формулы (1.11, 1.12). Указанная зависимость применена в работах С.А. Алфёрова, С.М. Барашева и М.И. Эйгера [4, 8, 141], в которых различается сепарация зерна в мелком ворохе и на поверхности жалюзийного решета (двухслойное «неоднородное» по высоте решето). Расчет коэффициента сепарации с учетом основных положений, предложенных И.Ф. Василенко (формулы 1.11 и 1.12), применен в работах [4, 8, 56, 141]. Так, при определении коэффициента сепарации для слоя вороха солоmistая часть вороха представлена в виде элементарных горизонтальных слоев, в которых находится $2/3$ солоmistых частиц, образующих элементарную решетку. При определении коэффициента сепарации $\mu_{эл}$ вероятность прохода зерна сквозь элементарную решетку определена как геометрическая вероятность на основе решения задачи Бюффона. В данной модели сепарация зерна описана теоретически, что повышает ее потенциальность, однако приведенная схематизация мелкого зернового вороха позволила приблизиться к экспериментальным данным с применением коэффициента пропорциональности.

Л.В. Шабанова мелкий зерновой ворох рассматривала в виде слоев с образованием солоmistыми частицами решёток, причем процесс сепарации на такой решетке описывается уравнением (1.10), а коэффициент сепарации соответствующего слоя – уравнением (1.16) [139].

Модель сепарации зерна через многослойное неоднородное по высоте решето применена в модели М.А. Ульяненко [131]. Им определены коэффициенты сепарации на верхнем решете, удлинителе и нижнем решете: $\mu_1 = 2,45 \text{ м}^{-1}$, $\mu_2 = 4,26 \text{ м}^{-1}$, $\mu_3 = 7,32 \text{ м}^{-1}$ соответственно.

Ю.И. Ермольевым и Д.К. Муратовым в математической модели сепарации зернового вороха на верхнем решете с активно-сепарирующей поверхностью начального участка для определения полноты просеивания $\varepsilon_{Пj11}$ j-го компонента зернового вороха также применена модель (1.16) [37]

$$\varepsilon_{Пj11} = \frac{\mu_{2j} \cdot \exp(-\mu_{1j} \cdot l_{11}) - \mu_{1j} \cdot \exp(-\mu_{2j} \cdot l_{11})}{\mu_{2j} - \mu_{1j}}, \quad (1.26)$$

где μ_j – коэффициент сепарации для отдельного участка; l_{11} – длина участка.

Д.А. Блиновым [18] уточнена модель солоmistого слоя С.А. Алфёрова. Им введено понятие псевдоскважности – отношение общего числа соломин и модуля разности между количеством горизонтальных и вертикальных соломин. В работе описан процесс взаимодействия зерна с наклонной соломиной. При попадании зерна на наклонную соломину рассмотрено два случая: первый – продольная ось зерна совпадает с продольной осью соломины: зерно или отскочит от соломины, или будет скользить вниз по ней. Во втором случае продольная ось зерна не совпадает с осью соломины: зерно будет двигаться вдоль соломины или соскользнет поперек соломы.

П.Н. Гришкевичем при описании сепарации зерна на дополнительном грохоте за основу взято также уравнение (1.10). Вероятность P_0 полного просеивания зерна им определена в виде произведения вероятностей просеивания зерна через слой сбины P_{CB} и через «живое сечение» решета грохота P_P [28]. Коэффициент сепарации зерна решетом грохота им определен, исходя из вероятности просеивания зерна через слой вороха и решето как геометрические вероятности

$$\mu = \frac{\pi \cdot d_{от} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot l_3 - \pi \cdot d_3}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{B \cdot H_P \cdot M / (\pi \cdot Q_{CB}) - d_3 / 2}} \right]}{\xi_B}, \quad (1.27)$$

где d_3 – средний диаметр круга сечения зерна; l_3 – средняя длина зерна ржи; $d_{от}$ – диаметр отверстий решета грохота; B – ширина грохота; H_P – максимальная высота слоя сбины; M – масса одной частицы соломы средней длины, поступающей на решето грохота; Q_{CB} – масса сбины, находящейся на решете грохота в любой период времени при установившемся режиме работы; ξ_B – относительное перемещение.

Для дополнительного грохота – обогатителя вороха, им получен коэффициент сепарации $\mu = 2,6 \cdot m^{-1}$.

Б.М. Мильман сепарацию зерна в системе очистки зерноуборочного комбайна рассматривал на основе уравнения движения зерна в виброоживленном слое вороха, а положение частицы в слое вороха определил действием силы тяжести, силой сопротивления среды, силой инерции и некоторым случайным воздействием [71]

$$m_1 \frac{dV}{dt} = m_C \left(\frac{\rho}{\rho_C} - 1 \right) - \mu_{ЭВ} V + \xi(t), \quad (1.28)$$

где m_1 – эффективная масса частицы, составленная из массы частицы и присоединённой массы, связанной с нестационарностью её движения; ρ, ρ_C – плотность частицы и частиц среды; m_C – масса частиц среды; $\mu_{ЭВ}$ – коэффициент эффективной вязкости; $\xi(t)$ – случайная функция времени.

Основываясь на предложенной гипотезе, Б.М. Мильман установил, что потери зерна за системой очисткой зависят от экспозиции процесса и уровня расслоения вороха, поступающего на решето [71]

$$P = f(z) \cdot e^{-\lambda \cdot t}. \quad (1.29)$$

Вопросами сепарации зерна в молотильно-сепарирующем устройстве и сепараторе грубого вороха занимались Н.Е. Авдеев [2], В.И. Зубков [46], Н.И. Кленин [50], Г.А. Кузин [56], Б. Махметов [66], А.И. Русанов [91, 92] и другие учёные.

Н.И. Кленин в работе [50], отметив, что показатель сепарации зерна на соломотрясе зависит от средней скорости продвижения зерна по слою, устано-

вил, что указанная скорость распределена по нормальному закону, причём её математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение не зависят от исходной толщины вороха. Вероятность сепарации зерна из вороха соломотряса получено им исходя из нормального закона распределения скорости продвижения зерна, толщины вороха и закона распределения зерна по слою вороха.

Б. Махметовым при исследовании сепарации зерна битерным сепаратором грубого вороха за основной параметр, определяющий вероятность выделения зерна, также принята скорость проникновения зерна через слой соломы. Вероятность выделения зерна из слоя за цикл принята в функции скорости проникновения, времени сепарации, продолжительности цикла, толщины слоя вороха и закона распределения зерна по слою. Полная вероятность выделения зерна за цикл μ_V принята в виде произведения вероятностей выделения зерна из слоя и прохода зерна через решетчатую поверхность барабана, а полнота выделения зерна определена по экспоненциальной зависимости с учётом числа циклов V [66]

$$\eta = 1 - e^{-\mu \cdot V} \quad (1.30)$$

В некоторых работах коэффициент сепарации определен с помощью эталонных коэффициентов сепарации и толщины слоя, причем И.Ф. Василенко [20] в качестве эталонных предлагал использовать экспериментальные параметры (формула 1.12), а С.М. Барашев [8] – элементарного слоя (формула 1.18).

Н.Е. Авдеев при исследовании сепарации зерна на клавишном соломотрясе предложил толщину элементарного слоя принять равной 0,01 м, а вероятность прохождения зерна сквозь весь слой определить как произведение вероятностей прохождения зерна через элементарный слой. Им экспериментально определена вероятность просеивания единичного зерна через элементарный слой за одну попытку, равная 0,9. Модель сепарации также описана экспоненциальной зависимостью [2].

Введение эмпирических коэффициентов в математические модели сепарации встречается во многих работах. Модель сепарации (1.23), предложенная А.И. Русановым, позволяет оценить работу сепаратора, состоящего из молотильно-сепарирующего устройства и соломотряса, а введение коэффициентов $\alpha_C=0,9$ и $\beta_C=0,92$ [92] в уравнение сепарации, позволило, по данным автора, получить более точные результаты.

В.В. Баевым предложена математическая модель технологического процесса однобарабанного комбайна классической схемы также с применением эмпирических коэффициентов [7]

$$P = q_3 \cdot (1 - e^{-\beta_C \cdot L_n}) \cdot \exp(-\mu_{oc} \cdot L_n \cdot e^{-a_2 \cdot q}) \cdot \exp(-\mu_{oc} / 1,25) \quad (1.31)$$

В.И. Орбинский использовал зависимость (1.10) в качестве модели сепарации зерна на решетках очистки, а коэффициент сепарации определил в виде регрессионного уравнения [77]:

$$y_3(L) = y_1 \cdot e^{-\mu \cdot L} \quad (1.32)$$

$$\mu = 3,43 + 0,2 \cdot X_4 - 0,92 \cdot X_6 + 1,08 \cdot X_7 + 0,48 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,26 \cdot X_5 \cdot X_6,$$

где $y_3(L)$ – количество свободного зерна, сошедшего с решета длиной L ; y_1 – количество зерна, поданного на решето; $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$ – кодированные значения входных параметров; X_1 – величина открытия жалюзи верхнего решета (от 10 до 18 мм); X_2 – величина открытия жалюзи нижнего решета (4–10 мм); X_3 – угол наклона нижнего решета (0–2 °); X_4 – угол наклона удлинителя (8–22 °); X_5 – величина открытия жалюзи удлинителя (4–16 мм); X_6 – загрузка очистки ворохом (2–4 кг/с); X_7 – содержание зерна в ворохе (0,3–0,5). Автором работы сделан вывод, что на значение коэффициента сепарации наиболее значимо влияют содержание зерна в ворохе и загрузка очистки [77].

Следует заметить, что коэффициент сепарации, рассчитываемый по регрессионному уравнению, более точно отражает конкретные условия работы системы очистки, в сравнении с другими эмпирическими коэффициентами. Предельные значения коэффициента сепарации – от 0,49 до 6,37 м⁻¹.

В.К. Максимчук также использовал зависимость (1.10) для определения потерь зерна в соломе [64]. Зависимость между коэффициентом сепарации и величиной нагрузки он определял как

$$\frac{\mu_1}{\mu_0} = \left(\frac{q_0}{q_1} \right)^{m_1} = \left(\frac{H_0}{H_1} \right)^{m_1}, \quad (1.33)$$

где μ_0 – коэффициент сепарации при подаче q_0 (толщина вороха H_0);

μ_1 – коэффициент сепарации при подаче q_1 (толщина вороха H_1);

m_1 – коэффициент, характеризующий условия работы рабочего органа.

В математической модели, предложенной В.К. Максимчуком, оценивается влияние неравномерности распределений зерна и соломы по ширине молотилки на потери зерна за соломотрясом [64]

$$\delta_Z = \frac{1}{B} \cdot \int_0^B f_1(x) \exp\left(\frac{-k_C \cdot L_C}{[f_2(x)]^{m_c}}\right) dx, \quad (1.34)$$

где B – ширина молотилки; $f_1(x)$ – функция распределения зерна по ширине молотилки; $f_2(x)$ – функция распределения соломы по ширине молотилки; x – текущая координата ширины; $k_C = \mu \cdot q^m = const$ – коэффициент; L_C – длина соломотряса.

Неравномерность распределения зерна и соломы В.К. Максимчук оценивал с помощью коэффициентов v_3 и v_C [64]

$$v_{3,C} = \frac{1}{\bar{F}_{1,2}(x)} \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^n [F_{1,2}(x_i) - \bar{F}_{1,2}(x_i)]^2}{n-1}}, \quad (1.35)$$

где $F_{1,2}(x_i)$ – значение функции распределения зерна и соломы в i -ой точке; $\bar{F}_{1,2}(x_i)$ – среднее значение функции распределения зерна и соломы; n – число точек.

Влияние неравномерности подачи вороха на потери зерна за системой очистки оценено в модели, предложенной Н.И. Косиловым и М.Р. Думанским [53]

$$y = a \cdot \exp(-L_P \mu_P e^{-a_1 \sigma^2}), \quad (1.36)$$

где a_1 – опытный коэффициент, зависящий от подачи и состава вороха; σ – среднеквадратическое отклонение подачи вороха.

Потери зерна в зависимости от подачи хлебной массы также могут быть описаны логистической функцией. Э.В. Жалнин при анализе принципа разделения потока обрабатываемого материала (обоснование двухпоточной очистки) применил, со ссылкой на отраслевой стандарт, логистическую функцию [42] вида

$$y_i = \frac{b}{1 + c \cdot \exp(-k \cdot x_i)}, \quad (1.37)$$

где y_i, b – текущие и предельные потери зерна; x_i – текущая подача массы в комбайн; c – постоянная интегрирования; k – коэффициент интенсивности роста потерь зерна.

Зерновой ворох, перемещаемый по решетку зерноуборочного комбайна, состоит в основном из зерна основной культуры, легких примесей (половы) и крупных примесей (сбоины и колосков), причем каждый из основных компонентов может быть описан комплексом физико-механических параметров (основные – размеры, фрикционные свойства, аэродинамические свойства, плотность) и, как показано ранее, значения которых значительно отличаются друг от друга. Вместе с тем, движение зернового вороха по решетку зернокомбайна можно назвать упорядоченным, зависящим от параметров системы очистки и решета.

Исследованиям движения зернового материала по колеблющейся (качающейся или вибрирующей) поверхности посвящены работы многих ученых.

Можно выделить следующие методы описания движения.

Первый тип моделей основан на описании движения одиночной частицы по колеблющейся поверхности, который применён в трудах Б.А. Берга, Г.Д. Терскова, П.М. Василенко, М.Н. Летошнева, С.А. Алфёрова, Л.В. Шабановой, В.А. Дрюка и других учёных. Указанный метод применяют для описания поведения зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна, адекватность моделей подтверждены многочисленными экспериментальными данными.

Второй тип моделей основан на описании движения зернового материала по вибрируемой поверхности на основе моделей сплошной среды, в которых учитываются взаимодействия между частицами (или элементарными объёмами) и воздушным потоком [84, 133, 135]. Как отметил Д.Н. Пирожков, модель

на основе уравнений Лоренца объясняет поведение зернистого слоя при вибрации: дрожание, циркуляцию, стохастическое поведение частиц [84]. Указанное поведение сыпучего материала наблюдается при большой частоте и малой амплитуде колебаний вибрирующей поверхности.

Можно выделить третий тип моделей, в которых взаимодействие обрабатываемого материала с плоским решетом описано с позиций синергетики [81, 82]. Для описания поведения зерна на рабочих органах зерноочистительной машины В.А. Патриным предложена система синергетических уравнений, первое уравнение которой определяет баланс энергии в системе, второе уравнение – поступление энергии в обрабатываемое зерно и обратную связь в системе, третье – величину силы или момента, выполняющих полезную работу в системе. При этом он вводит в рассмотрение элементарный слой и отмечает, что «... существуют связи между элементарными слоями сыпучей среды, переменные по величине» [81, с. 9]. Движение слоя, описанное на основе движения материальной точки по модели М.Н. Летошнева, описано им с учётом теории послынного движения сыпучей среды В.В. Гортинского, а сила сопротивления сдвигу слоя определена с учётом приведённого коэффициента внутреннего трения слоя $f_{ПР} = f_0(1+i \cdot \varepsilon_Z)$ по формуле

$$F_{hi} = \gamma \cdot h \cdot g \cdot f_0(1+i \cdot \varepsilon_Z), \quad (1.38)$$

где ε_Z – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства зерна; f_0 – коэффициент трения верхнего слоя зерна; γ_Z – плотность зерна; i – безразмерная координата положения слоя по высоте.

Причём В.А. Патриным принято, что приведённый коэффициент трения увеличивается в направлении к поверхности решета по прямолинейному закону [81], а решение модели выполнено графоаналитическим методом.

В теории инерционного транспортирования материалов для разграничения режимов с подбрасыванием или без подбрасывания материала применяют коэффициент λ (подбрасывание материала при $\lambda < 1$) [51]

$$\lambda = \frac{g \cdot \cos \delta}{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\beta - \delta)}, \quad (1.39)$$

где δ – угол наклона желоба; A – амплитуда колебаний желоба; β – угол наклона линии направления колебаний.

На рисунке 1.11 приведены результаты расчёта коэффициента λ для решета зерноуборочного комбайна (без учёта воздействия воздушного потока, $\omega = 28 \text{ рад/с}$, $\beta = 25^\circ$).

Режим транспортирования зернового вороха может проходить с подбрасыванием или без подбрасывания материала, а значение коэффициента λ значительно отличается от единицы. Поэтому при рассмотрении движения зернового вороха по решетам зерноуборочного комбайна многие учёные останавливаются на первом типе моделей.

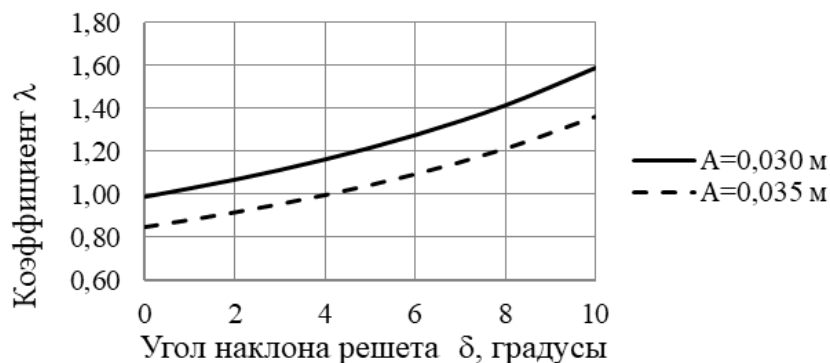


Рисунок 1.11

Академик М.Н. Летошнев в работе [59] рассматривал движение вороха по поверхности грохота, используя исследования профессора Б.А. Берга. В связи с тем, что длина подвесок намного больше полного размаха грохота, предложено рассматривать перемещение решета как прямолинейное, с размахом, равным диаметру окружности, описываемой кривошипом, а движение грохота – как прямолинейное гармоническое колебательное движение, в котором перемещение x , скорость V и ускорение j грохота описываются следующими уравнениями:

$$x = -r \cdot \cos \omega t, \quad (1.40)$$

$$v = \omega \cdot r \cdot \sin \omega t, \quad (1.41)$$

$$j = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t, \quad (1.42)$$

где t – время.

При описании относительного движения тела по поверхности грохота Б.А. Берг учитывал силу тяжести G , реакцию плоскости N , силу трения $F = tg\varphi \cdot N$ (здесь φ – угол трения) и силу инерции $P_{ин} = -m \cdot j$ тела с массой m в переносном его движении вместе с колеблющейся плоскостью. В результате получены уравнения движения тела вверх и вниз по плоскости:

$$\frac{1}{\delta_1} \cdot \frac{d^2 \xi_{BB}}{dt^2} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t - g \cdot tg(\alpha + \varphi), \quad (1.43)$$

$$\frac{1}{\sigma_1} \cdot \frac{d^2 \xi_{BH}}{dt^2} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t - g \cdot tg(\alpha - \varphi), \quad (1.44)$$

где ξ_{BB}, ξ_{BH} – относительные перемещения тела вверх или вниз по поверхности; α – наклон поверхности к горизонту; а коэффициенты равны:

$$\delta_1 = \cos \alpha - \sin \alpha \cdot tg \varphi, \quad (1.45)$$

$$\sigma_1 = \cos \alpha + \sin \alpha \cdot tg \varphi. \quad (1.46)$$

В работе [59] приведен графоаналитический способ определения скорости частицы вверх и вниз по плоскости, определены условия движений частицы, средняя скорость за одно колебание

$$V_{CP} = \frac{\xi_{BH} + \xi_{BB}}{2 \cdot \pi} \cdot \omega. \quad (1.47)$$

С.А. Алферов при исследовании движения частиц вороха по лепестку жалюзи решета зерноуборочного комбайна, кроме силы тяжести G , реакции N , силы трения F и силы инерции P_{IH} , учитывал силу воздействия воздушного потока $R_B = mk_{II}U^2$ (здесь m – масса частицы) [4]. Он принял, что скорость частицы не оказывает влияние на значение силы R_B , воздушный поток направлен по поверхности лепестка жалюзи. Также им введено допущение, что коэффициент трения f зерна при движении вверх и вниз по лепестку постоянен, а для сбиины, ввиду наличия сил сцепления с соломозацепами, различен. Уравнения движения частицы по лепестку имеют вид:

$$\frac{d^2 \xi_{BB}}{dt^2} = r\omega^2 \cos\omega t \cdot \cos(\beta - \alpha) + k_{II}U^2 - g \sin\alpha - [g \cos\alpha - r\omega^2 \cos\omega t \cdot \sin(\beta - \alpha)] \cdot tg\varphi, \quad (1.48)$$

$$\frac{d^2 \xi_{BH}}{dt^2} = r\omega^2 \cos\omega t \cdot \cos(\beta - \alpha) - k_{II}U^2 + g \sin\alpha - [g \cos\alpha + r\omega^2 \cos\omega t \cdot \sin(\beta - \alpha)] \cdot tg\varphi. \quad (1.49)$$

В работе [4] также приведено упрощенное (замечание С.А. Алферова), уравнение, описывающее движение всего слоя мелкого зернового вороха по горизонтальной поверхности жалюзийного решета

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = (r\omega^2 \cos\omega t + k_{II}U^2) \cdot \frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\cos\varphi_1} - g \cdot tg\varphi_1, \quad (1.50)$$

где φ_1 – угол трения короткой сбиины при движении в положительном направлении оси ξ .

Анализ движения зерна по жалюзи, выполненный Д.К. Муратовым с применением уравнений (1.48) и (1.49), позволил обосновать скорость воздушного потока в начале решета – 6–6,5 м/с и угол открытия жалюзи более 70° [72].

Л.В. Шабанова также не учитывала относительную скорость движения частицы в воздушном потоке при рассмотрении относительного движения соломистой частицы по интенсифицированной поверхности (с дополнительной продольной решеткой) решета [139]. Отмечено, что относительное движение слоев возможно в том случае, если имеется достаточное различие в их массе, коэффициенте сцепления между отдельными слоями. Уравнение относительного движения соломистой частицы, наделенной всеми свойствами слоя вороха, по поверхности решета имеет вид:

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = [r\omega^2 \cos\omega t - (\frac{g \cdot \sin(\alpha \pm \varphi)}{\cos(\beta + \alpha \pm \varphi)} + \frac{U^2}{U_S^2} \cdot \frac{\cos(\gamma - \alpha \pm \varphi)}{\cos(\beta + \alpha \pm \varphi)})] \cdot \frac{\cos(\beta + \alpha \pm \varphi)}{\cos\varphi}. \quad (1.51)$$

В.Н. Романенко рассматривал движение зернового вороха по решетке в виде движения частицы, при этом он ввёл неподвижную систему координат, связанную с комбайном, и подвижную систему координат, связанную с верхним решетом. При рассмотрении движения частицы он учёл силу, действующую на частицу со стороны потока воздуха, как прямо пропорциональную «квадрату скорости частицы относительно потока в данной точке, а направление – противоположно вектору относительной скорости» [89, с. 7]. Заметим, что это положение увеличивает точность математической модели в сравнении с моделями, приведенными ранее, однако исследовано только движение по поверхности решета, без учёта фазы полёта частицы над решетом, причём «под движением частицы по решетке понимается её движение по «шероховатой поверхности» параллельно плоскости решета, на которой находятся вершины решета; ребристость поверхности учитывается коэффициентом трения» [89, с. 7]. Таким образом, В.Н. Романенко при описании движения частицы не учёл приведённый коэффициент трения зернового вороха с поверхностью жалюзийного решета, который имеет различное значение при движении зернового вороха по решетке в прямом и обратном направлении [4, 120].

При описании движения частицы по колеблющейся поверхности, как было отмечено ранее, часто принимают, что поверхность совершает прямолинейное гармоническое колебательное движение, заменяя движение поверхности по дуге движением по хорде. Указанное допущение значительно упрощает полученные математические модели и, как заметил С.А. Алферов, «не даёт существенной ошибки при условии, что $L/r \geq 10$ и $l/r \geq 10$, где L и l – длины шатуна привода и подвески решётного стана» [4, с. 51]. Однако погрешность вычисления всё-таки появляется. Исследования, выполненные В.Н. Романенко [89], коллективами авторов: М.И. Беловым, В.Н. Романенко, В.И. Славкиным [13] и С.С. Родионовым, В.Г. Чумаковым, С.И. Родионовой [88] показывают, что введение в математические модели реальных перемещений колеблющейся поверхности увеличивает точность полученных результатов.

Моделированием движения зернового вороха по наклонённому, относительно горизонтального положения, жалюзийному решетке занимались Э.В. Жалнин, А.А. Соловейчик, Д.И. Уркинбаев, В.А. Дрюк.

В работе учёных Э.В. Жалнина, А.А. Соловейчика, Д.И. Уркинбаева [41] приведена система уравнений динамического равновесия частицы при её скольжении по решетке:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = J_X \pm F_X - P_X \\ m \cdot \ddot{z} = P_Z - F_Z \end{cases}, \quad (1.52)$$

где J_X, F_X, P_X – проекции силы инерции, силы трения и веса частицы на ось X (продольную ось); P_Z, F_Z – проекции силы инерции и силы трения на ось Z (поперечную ось).

Определены интервалы возможных движений частицы по решетке. Расчёты, проведённые при частоте вращения кривошипа 260 об/мин, радиусе кривошипа 0,016 м, продольном угле наклона решета 4° , угле направлении колеба-

ний 26° , угле трения покоя 30° , показали, что скольжение частицы вперёд возможно при углах поворота от $27,7$ до $152,3^\circ$, а при наличии поперечного крена на угол 12° – от $24,6$ до $154,40$, т.е. при поперечном крене границы интервала расширяются [41]. Однако в математической модели (1.52) отсутствует сила воздействия на частицу воздушного потока, расчёт проведён при коэффициенте трения $f = 0,58$ (по значению можно заключить, что в работе рассматривается движение солоистой частицы по стальной поверхности), что несколько искажает реальное движение зернового вороха по поверхности жалюзийного решета. Кроме этого, в работе [41, с. 14] сделан вывод, что «отрыв материала от поверхности решета в рассматриваемом диапазоне углов поперечного крена не наступает ни при каком значении угла поворота кривошипа».

Д.И. Уркинбаев при описании движения частицы вороха учел воздействие на частицу воздушного потока, в результате им получена система дифференциальных уравнений [132]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -g[\sin \beta - k_B \pm f \cos \gamma (\cos \beta \cos \alpha - k_B \sin \delta)] + \\ \quad + \omega^2 r \cdot (\cos \sigma \pm f \cos \gamma \sin \sigma) \sin \omega t \\ \ddot{z} = g[\cos \beta \sin \alpha - f \sin \gamma (\cos \beta \cos \alpha - k_B \sin \delta)] + \\ \quad + \omega^2 r f \sin \gamma \sin \sigma \sin \omega t \\ \gamma = \arctg(\dot{z} / \dot{x}), \end{cases} \quad (1.53)$$

где β, α – углы продольного и поперечного наклона решета; γ – угол между составляющими силы трения; f – коэффициент трения скольжения; σ – угол направления колебаний решета; $k_B = U^2 / U_S^2$ – безразмерный коэффициент; U, U_S – скорости воздушного потока и витания частицы соответственно; δ – угол наклона открытия жалюзи решета.

Математическая модель (1.53) учитывает наклоны решета в продольной и поперечной плоскостях, воздействие воздушного потока на частицу, однако в ней не учтено изменение коэффициента трения (вернее, приведённого коэффициента трения) при движении частицы в положительном и отрицательном направлениях оси X, отрыв частицы от поверхности решета, влияние колебаний и относительной скорости частицы на силу воздействия воздушного потока. В результате решения системы уравнений (1.53) рассчитана средняя скорость продольного движения вороха, которая лежит в интервале от $0,33$ до $0,35$ м/с, а поперечная скорость при наклоне решета до 12° возрастает с 0 до $0,25$ м/с [222]. Д.И. Уркинбаевым отмечено, что частица может находиться в следующих «состояниях: относительного покоя, скольжения вверх или вниз по решету с одновременным перемещением в поперечном направлении (или при отсутствии такового при $\alpha=0$, полёта (отрыва от поверхности решета)» [132, с. 11]. Фаза полёта в работе не учтена.

При описании поведения зернового вороха по наклонённому решету приняты допущения [132]:

- в начале решета поверхностный слой вороха параллелен плоскости решета, по мере продвижения вороха происходит его смещение и на некотором расстоянии от начала решета его поверхность становится горизонтальной;

- скорость слоя вороха в поперечном направлении определена по формуле

$$V_{\theta} = V_0 - k \cdot (\alpha - \theta), \quad (1.54)$$

где V_0 – поперечная скорость поверхностного слоя вороха на начале решета; k – коэффициент, $k = V_0 / \alpha$; θ – угол между поверхностью слоя и решетом;

- поверхностный слой вороха представляет вид треугольника, а средняя скорость горизонтального перемещения центра масс треугольника определена по формуле

$$V_{ABC}^{\Gamma} = \frac{1}{2} \cdot V_0 \cdot \cos \theta; \quad (1.55)$$

- поперечное сечение вороха, находящегося на решете, имеет вид трапеции, а значения высоты слоя у правой и левой боковин решета определены на основании теоремы о центре масс плоской фигуры.

А.В. Белинский для принятой схемы выравнивателя зернового вороха с использованием кулачкового или гидравлического вибраторов предложил методику расчёта кинематических параметров решета [12]. Однако в представленных расчётах не были учтены параметры колебаний решета в продольном направлении, воздействие воздушного потока на частицу, фаза полёта частицы над решетом.

Коллектив учёных АлтГТУ исследовал движение зернового вороха по решету комбайна при добавлении колебаний в поперечном направлении [32, 34, 112, 119]. В модели учтено воздействие воздушного потока на частицу, однако принято, что относительное перемещение частицы по решету и колебания решета не оказывают влияния на силу воздействия воздушного потока на частицу. Колебания решета в поперечном направлении учтены введением дополнительной силы инерции $F_{ИН}$. Выявлено, что частица может иметь три качественно различных состояния относительного движения: покой; скольжение частицы вперёд и назад по решету; полёт. Система дифференциальных уравнений движения вороха по наклонённому решету, колеблющемуся в двух направлениях, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{ИН} \cos(\beta - \delta) + R_B \cos(\gamma - \delta) \mp F \cos \varepsilon - G \cos \alpha \sin \delta \\ m\ddot{y} = F_{ИН} - G \sin \alpha \cos \delta \mp F \sin \varepsilon \\ m\ddot{z} = P_{ИН} \sin(\beta - \delta) + R_B \sin(\gamma - \delta) + N - G \cos \alpha \cos \delta. \end{cases} \quad (1.56)$$

Исследованиям движения частицы в воздушном потоке посвящены работы Б.Г. Турбина [130], С.А. Алфёрова [4], В.Л. Злочевского и В.П. Зайцева [45], И.И. Канеева [48] и других учёных.

Движение частицы в наклонном воздушном потоке часто описывают системой уравнений [130]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = R_B \cdot \cos \varphi \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = -R_B \cdot \sin \varphi + mg \end{cases}, \quad (1.57)$$

где φ – угол между осью Ox и направлением силы R_B .

Сила сопротивления воздушного потока, действующая на частицу, помещенную в воздушный поток, направлена в противоположную сторону относительной скорости частицы, а её значение равно [130]

$$R_B = k_V \cdot \rho_B \cdot F_M \cdot U_o^2, \quad (1.58)$$

где k_V – коэффициент сопротивления; ρ_B – плотность воздуха; F_M – миделево сечение тела; U_o – относительная скорость.

Коэффициент сопротивления k_V достаточно трудно определить, поэтому силу R_B определяют по упрощённой формуле с введением коэффициента парусности k_{II} [4]

$$R_B = m \cdot k_{II} \cdot U_o^2. \quad (1.59)$$

И.И. Канеев при исследовании движения вороха по решетке, совершающему сложное движение в вертикальном и горизонтальном направлениях, обеспечивающее движение вороха с подбрасыванием, не учитывал относительную скорость движения частицы в воздушном потоке [48]. Им определены фазы отрыва частицы от поверхности решетки при эллиптическом и круговом движении точек решетки, после чего частица совершает полет (силой сопротивления внешней среды И.И. Канеев пренебрег). Дифференциальные уравнения полета частицы имеют вид:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m \cdot k_{II} \cdot U^2 \cdot \cos \gamma \\ m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = m \cdot k_{II} \cdot U^2 \cdot \sin \gamma - mg. \end{cases} \quad (1.60)$$

Заметим, что допущения, принятые И.И. Канеевым, приводят к большой погрешности вычисления траектории полёта частицы. Более точно движение частицы описывается системой дифференциальных уравнений, предложенной коллективом авторов В.И. Орбинским, В.П. Шацким и А.С. Корневым [78], в которой используется относительная скорость движения частицы V_{OTH} , определяемая по теореме косинусов:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = m \cdot k_{II} \cdot V_{OTH}^2 \cdot \cos \gamma \\ m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = m \cdot k_{II} \cdot V_{OTH}^2 \cdot \sin \gamma - mg. \end{cases} \quad (1.61)$$

Уравнения движения частиц в наклонном воздушном потоке приведены в монографии С.А. Алфёрова [4]. Направляющие косинусы вектора относительной скорости им определены по формулам:

$$\cos\theta_r = \frac{V_{aX} - U_X}{\sqrt{(V_{aX} - U_X)^2 + (V_{aY} - U_Y)^2 + V_{aZ}^2}}, \quad (1.62)$$

$$\cos\delta_r = \frac{V_{aY} - U_Y}{\sqrt{(V_{aX} - U_X)^2 + (V_{aY} - U_Y)^2 + V_{aZ}^2}}, \quad (1.63)$$

$$\cos\gamma_r = \frac{V_{aZ}}{\sqrt{(V_{aX} - U_X)^2 + (V_{aY} - U_Y)^2 + V_{aZ}^2}}. \quad (1.64)$$

Приведена система дифференциальных уравнений в проекции на оси неподвижной системы координат OXYZ [4]:

$$\begin{cases} -m \cdot \ddot{X} + R_{BX} = 0 \\ -m \cdot \ddot{Y} + mg + R_{BY} = 0 \\ -m \cdot \ddot{Z} + R_{BZ} = 0, \end{cases} \quad (1.65)$$

где R_{BX} , R_{BY} , R_{BZ} – проекция на оси x , y , z реакции R_B воздушной среды на движущуюся частицу (термин из работы [4]), $R_B = m \cdot k_{II} \cdot |v_r|^2$.

При движении зернового вороха по колеблющейся поверхности происходит отрыв компонентов от поверхности жалюзийного решета, а затем движение в воздушном потоке до момента соударения с решетом. Так как в этом случае взаимодействием между частицами можно пренебречь, поэтому для описания полёта зернового вороха, находящегося на колеблющемся и наклонённом в продольном и поперечном направлении решете, целесообразно применить уравнения (1.62–1.65).

Таким образом, как следует из анализа состояния вопроса, уборка зерновых культур на склонах зерноуборочными комбайнами равнинного исполнения сопровождается повышенным уровнем потерь зерна, причём основная доля потерь приходится на систему очистки за счёт увеличения неравномерности распределения зернового вороха на верхнем решете. Снижение потерь зерна до допустимого уровня приводит к уменьшению производительности зерноуборочного комбайна. Крутосклонные модификации комбайнов, имеющие устройства для выравнивания всей молотилки относительно горизонта, рентабельны при уборке зерновых культур на склонах более 10°. Так как по склоновой доступности равнинные комбайны могут работать на склонах до 10°, то повышение эффективности работы зерноуборочного комбайна на склонах целесообразно осуществить совершенствование системы очистки.

При разработке перспективных систем очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах, необходимо разработать теорию движения зернового вороха по решету, учитывающей факторы, возникающих при работе зерноуборочного комбайна на склонах при поперечном и продольном наклонах комбайна. Для сравнения известных и разрабатываемых систем очистки требуется инструмент (например, модель сепарации), позволяющий в зависимости от распределения зернового вороха на верхнем решете при кренах комбайна оценивать качество работы системы очистки.

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА НА ВЕРХНЕМ РЕШЕТЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ КОМБАЙНА НА СКЛОНАХ

2.1 Основные допущения и ограничения

Рассмотрим движение зернового вороха по поверхности жалюзийного решета при работе зерноуборочного комбайна на склонах. При рассмотрении выделим: 1) компонент зернового вороха находится на поверхности лепестка жалюзи; 2) зерновой ворох находится на поверхности решета. В первом случае движение компонента зернового вороха рассматриваем как движение частицы (зерновки или сбиины), а силу сопротивления движению – как силу трения. Во втором случае движение вороха рассматриваем как движение элемента, наделённого комплексом физико-механических свойств зернового вороха, причём сила сопротивления движению элемента зависит от возможного его сцепления с поверхностью решета.

При описании движения частицы (или элемента) принимаем:

- плоскопараллельное движение решета, описываемое гармоническим законом [4, 130]

$$\xi = r \cdot \cos \omega t, \quad \dot{\xi} = -\omega \cdot r \cdot \sin \omega t, \quad \ddot{\xi} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t; \quad (2.1)$$

- частицу (или элемент) зернового вороха рассматриваем в виде материальной точки, которая обладает известным набором физико-механических свойств.

Решето, совершающее колебания, движется в воздушном потоке, скорость которого постоянная. Поэтому скорость воздушного потока, обдувающего решето, будет зависеть от скорости движения решета и, следовательно, сила воздействия воздушного потока на частицу также зависит от колебаний решета.

Произведем расчет скорости решета $\dot{\xi}$ в зависимости от угла поворота кривошипа ($\omega = 28 \text{ рад / с}$, $r = 0,03 \text{ м}$). Скорость решета изменяется в интервале от «минус» 0,84 до «плюс» 0,84 м/с, поэтому на частицу, находящуюся в состоянии покоя на поверхности решета, воздействует воздушный поток с непостоянной скоростью. Например, при скорости воздушного потока 4,0 м/с скорость обдува колеблющегося решета (и частицы) изменяется от 3,16 до 4,84 м/с (рисунок 2.1).

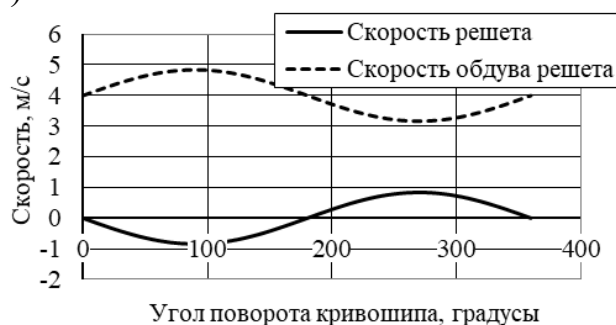


Рисунок 2.1 – Скорости решета и обдува решета воздухом в зависимости от угла поворота кривошипа

При изменении скорости воздушного потока от 2 до 7 м/с коэффициент вариации изменяется от 120 до 34 %, поэтому при исследовании движения зернового вороха по решетке следует учитывать относительную скорость решетки в воздушном потоке.

Воздух обдувает верхнее решето с неодинаковой скоростью по длине решета: в начале решета скорость имеет большее значение, в конце – меньшее. Изменение скорости воздушного потока по длине решета отмечено в работах [4, 67, 138]. С.А. Алферов в работе [4] привел данные Н.Д. Кутцбаха, из которых следует, что если решето загружено зерновым ворохом, то отношение скорости воздушного потока в сечении к максимальной скорости воздушного потока примерно одинаково по всей длине верхнего решета. Поэтому предполагаем, что воздушный поток равномерно распределен по поверхности решета (по ширине и длине).

Введем подвижную систему координат $OXYZ$, связанную с поверхностью: ось X направлена вдоль поверхности; ось Y – в поперечном направлении, противоположном уклону; ось Z – перпендикулярно поверхности; плоскость XOY – рассматриваемая поверхность (рисунок 2.2). На частицу, находящуюся на плоскости XOY , действуют силы: $G = m \cdot g$ – сила тяжести (здесь m – масса частицы; g – ускорение свободного падения); $R_B = m \cdot k_{\Pi} \cdot U_0^2$ – сила воздействия воздушного потока (здесь k_{Π} – коэффициент парусности частицы; U_0 – относительная скорость частицы в воздушном потоке); R_{BY} – сила сопротивления воздушного потока при движении частицы в поперечном направлении; N – нормальная реакция поверхности; F – сила трения (сопротивления) при движении частицы по рассматриваемой поверхности; $P_{ин} = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega t)$ – сила инерции частицы от продольных колебаний решета (здесь r – радиус кривошипа; ω – циклическая частота колебаний; t – время). Векторы сил \bar{R}_B и $\bar{P}_{ин}$ находятся в плоскости XOZ . Отклонение вектора скорости частицы \bar{V}_B от продольного направления (оси X) определяется углом $\varepsilon = \arctg(\dot{y}/\dot{x})$ (здесь \dot{y}, \dot{x} – проекции скорости частицы на оси Y и X соответственно).

При наклоне в поперечном направлении решета вместе с молотилкой комбайна на угол α появляется составляющая от силы тяжести.

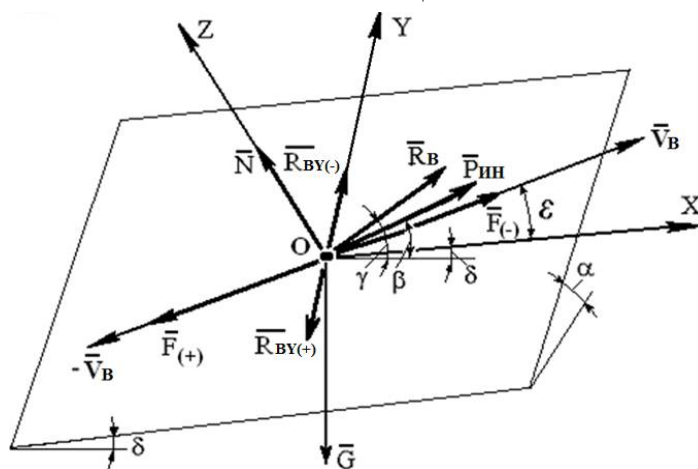


Рисунок 2.2 – Схема сил, действующих на частицу

Дифференциальные уравнения движения частицы имеют следующий вид (верхние знаки – при движении частицы в положительном направлении осей) [109]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{ИHX} + R_{BX} \mp F_X - G_X \\ m\ddot{y} = \mp F_Y \mp R_{BY} - G_Y \\ m\ddot{z} = N + P_{ИHZ} + R_{BZ} - G_Z \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{ИH} \cdot \cos(\beta - \delta) + R_B \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp F \cdot \cos\varepsilon - G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta \\ m\ddot{y} = \mp F \cdot \sin\varepsilon \mp R_{BY} - G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\delta \\ m\ddot{z} = N + P_{ИH} \cdot \sin(\beta - \delta) + R_B \cdot \sin(\gamma - \delta) - G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\delta. \end{cases} \quad (2.3)$$

С помощью системы уравнений (2.3) можно исследовать движение частицы по лепестку жалюзи и элемента зернового вороха по поверхности жалюзийного решета.

2.2 Движение компонентов зернового вороха по жалюзи решета

В этом случае угол δ определяет наклон лепестка относительно горизонта. Принимаем силу трения частицы по лепестку $F = f \cdot N$ (здесь f – коэффициент трения частицы по поверхности лепестка), коэффициент трения частицы при движении в любом направлении имеет одинаковое значение (для зерна $f = 0,32$, для соломистых примесей $f = 0,4$). В соответствии с рекомендациями С.А. Алфёрова [4], работ А.Я. Пяткина [83], Ю.И. Ермольева и Д.К. Муратова [37] принимаем, что воздушный поток направлен вдоль лепестка ($\gamma = \delta$). Сопротивлением воздушного потока перемещению частицы в поперечном направлении ввиду малой её относительной скорости пренебрегаем. Относительную скорость частицы в воздушном потоке в продольном направлении определим с учётом скорости решета и скорости частицы относительно решета

$$U_o = U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}. \quad (2.4)$$

Наклон лепестка относительно горизонта зависит не только от угла открытия жалюзи, но и наклона решета относительно молотилки комбайна, а при работе комбайна на склонах – также от угла продольного наклона молотилки. Поэтому угол δ равен:

- при движении комбайна вниз по склону

$$\delta = \delta_J + \delta_r + \delta_K, \quad (2.5)$$

где δ_J – угол открытия жалюзи; δ_r – угол наклона решета относительно молотилки комбайна; δ_K – угол продольного наклона молотилки комбайна;

- при движении комбайна вверх по склону

$$\delta = \delta_J + \delta_r - \delta_K. \quad (2.6)$$

На рисунке 2.3 показаны варианты расположения поверхности лепестка относительно горизонта.

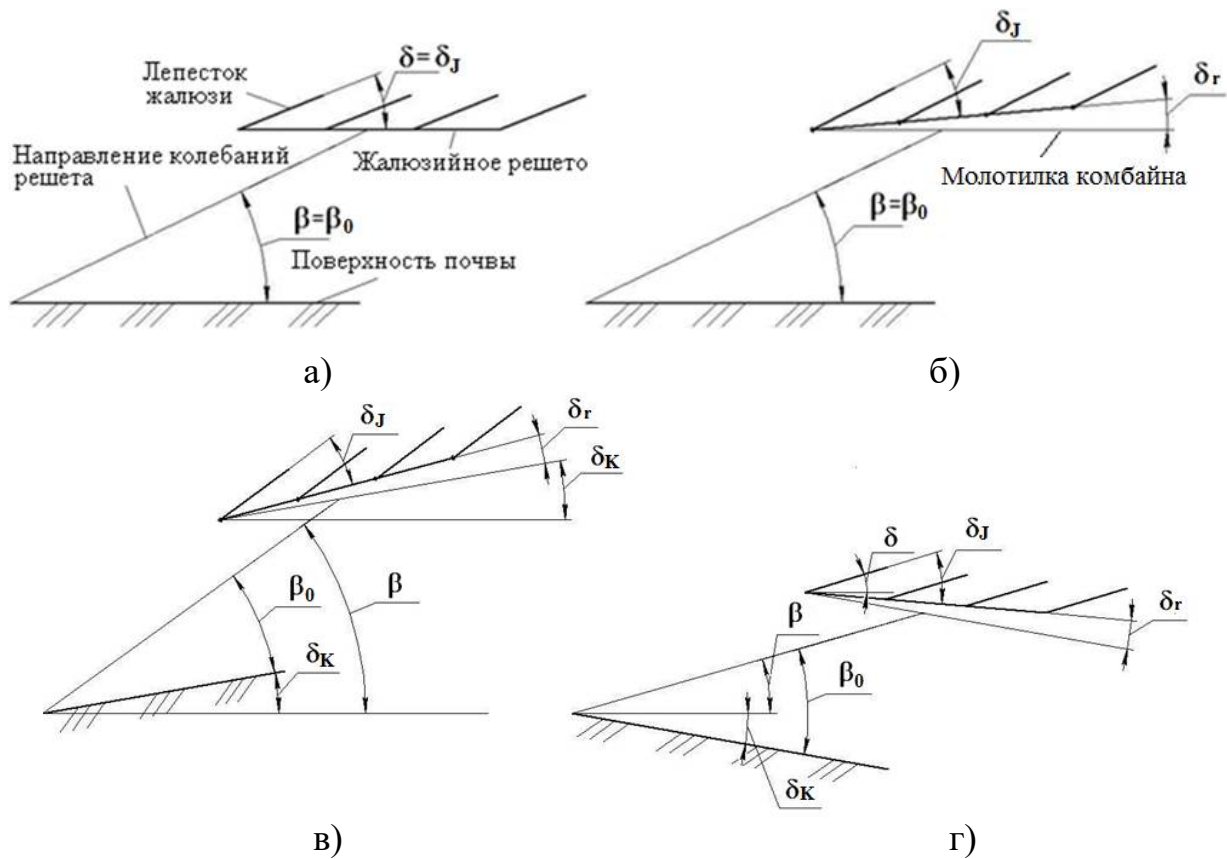


Рисунок 2.3 – Схемы к определению углов δ и β : а – горизонтальное положение молотилки, решето не наклонено относительно молотилки; б – горизонтальное положение молотилки, решето наклонено; в – зерноуборочный комбайн движется вниз по склону, решето наклонено; г – зерноуборочный комбайн движется вверх по склону, решето наклонено

Продольный наклон молотилки также оказывает влияние на значение угла β , причём при отсутствии продольного наклона молотилки $\beta = \beta_0$ (здесь β_0 – угол направления колебаний относительно молотилки), при движении зерноуборочного комбайна вниз по склону

$$\beta = \beta_0 + \delta_K, \quad (2.7)$$

при движении вверх по склону

$$\beta = \beta_0 - \delta_K. \quad (2.8)$$

Предположим, что частица, находящаяся на лепестке жалюзи, может находиться в следующих состояниях: скольжения по лепестку (вперёд или назад), покоя, полета. Определим с учетом принятых допущений условия отрыва частицы от поверхности лепестка. Из третьего уравнения системы (2.3), учитывая, что $\sin(\gamma - \delta) = 0$ и $\ddot{z} = 0$, получим

$$Nl(\varphi) = \frac{N(\varphi)}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos\varphi \cdot \sin(\beta - \delta) + g \cdot \cos\alpha \cdot \cos\delta = 0. \quad (2.9)$$

Расчеты, выполненные в программе Mathcad, показали: величина Nl положительна при любых углах поворота кривошипа, зависит от угла δ и практически не зависит от угла α ; частица может иметь три состояния движения по лепестку: перемещаться в положительном направлении оси $X_{(+)}$, в отрицатель-

ном направлении $X_{(-)}$, находиться в состоянии покоя X_{Π} . Отрыв частицы от лепестка жалюзи не происходит.

Для определения указанных интервалов рассмотрим установившееся движение частицы ($\ddot{x}=0, \ddot{y}=0, \ddot{z}=0$). Интервал $X_{(+)}$ возможен при положительном значении ускорения $\ddot{x}>0$, $X_{(-)}$ – при $\ddot{x}<0$. Соответствующие условия получили из первого уравнения системы уравнений (2.3). Границы интервалов определим из системы уравнений (2.3) при $\ddot{x}=0, \ddot{y}=0$; силу трения скольжения заменим силой трения покоя (коэффициент f_{Π} характеризует трение покоя частицы о поверхность лепестка); учтем, что $\cos(\gamma-\delta)=1$.

В соответствии с этими положениями получена система уравнений:

$$\begin{cases} \omega^2 \cdot r \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\beta-\delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 \mp f_{\Pi} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos\varepsilon - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta = 0 \\ \mp f_{\Pi} \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin\varepsilon - g \cdot \sin\alpha \cdot \cos\delta = 0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

а угол ε

$$\varepsilon = \arctg\left[\frac{-g \cdot \sin\alpha \cdot \cos\delta}{\omega^2 \cdot r \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\beta-\delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta}\right]. \quad (2.11)$$

Условие движения частицы в положительном направлении – интервал $X_{(+)}$

$$\omega^2 \cdot r \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\beta-\delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 - f_{\Pi} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos\varepsilon - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta \geq 0, \quad (2.12)$$

в отрицательном направлении $X_{(-)}$

$$\omega^2 \cdot r \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\beta-\delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 + f_{\Pi} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos\varepsilon - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\delta \leq 0. \quad (2.13)$$

На рисунке 2.4 приведены интервалы движения зерна и соломистой частицы, рассчитанные при следующих параметрах: $\omega = 28 \text{ рад/с}$, $r = 0,03 \text{ м}$, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 26^\circ$, $\gamma = \delta = 27^\circ$, $U = 4,5 \text{ м/с}$. Параметр N/m рассчитан по второму уравнению системы (2.10), угол ε – по формуле (2.11), скорость частицы относительно решета – $\dot{x}=0$.

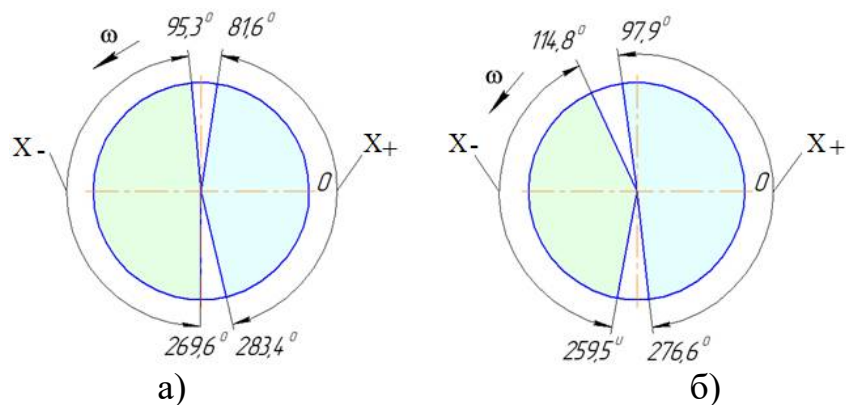


Рисунок 2.4 – Интервалы движения частиц по лепестку жалюзи:
а – зерна ($U_S = 8,5 \text{ м/с}$); б – соломистой частицы ($U_S = 5,0 \text{ м/с}$)

При указанных параметрах для зерна интервал $X_{(-)}$ больше интервала $X_{(+)}$, а для соломистой частицы, наоборот, т. е. зерно движется дальше в отрицательном направлении оси X , а соломистая частица – в положительном.

Система уравнений (2.3), описывающая движение частицы по лепестку, имеет следующий вид (верхние знаки – при движении частицы в положительном направлении осей X и Y) [109]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{II} \cdot [U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x}]^2 \mp \\ \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg(\dot{y} / \dot{x})) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \dot{y} = \mp f \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg(\dot{y} / \dot{x})) - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta . \end{cases} \quad (2.14)$$

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

Решение системы уравнений (2.14) выполнили в пакете программ Mathcad с помощью функции *rkfixed*(*zm, Tnn, Tkk, Nn, D*) [85], здесь *zm* – переменная, *Tnn, Tkk* – начальное и конечное значение времени, *Nn* – количество узлов сетки, *D* – вектор-функция.

При поперечном наклоне решета компоненты зернового вороха под действием силы тяжести смещаются в сторону уклона. На рисунке 2.5 приведены результаты расчёта траекторий движения зерна ($U_S = 8,5 \text{ м/с}, f = 0,32$) и сбоины ($U_S = 5,0 \text{ м/с}, f = 0,4$) по лепестку жалюзи за два периода колебаний. Существенное значение имеет начало движения частицы по лепестку – в положительном или отрицательном направлениях оси X . Поэтому движение частицы по лепестку жалюзи целесообразно рассматривать за один период колебаний решета T , а её скорость рассчитывать как среднее значение скоростей при начале движения в положительном и отрицательном направлениях оси X

$$V_{XCP} = \frac{X_{(+)} + X_{(-)}}{2 \cdot T}, \quad (2.15)$$

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

- в направлении оси Y

$$V_{YCP} = \frac{Y_{(+)} + Y_{(-)}}{2 \cdot T}, \quad (2.16)$$

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

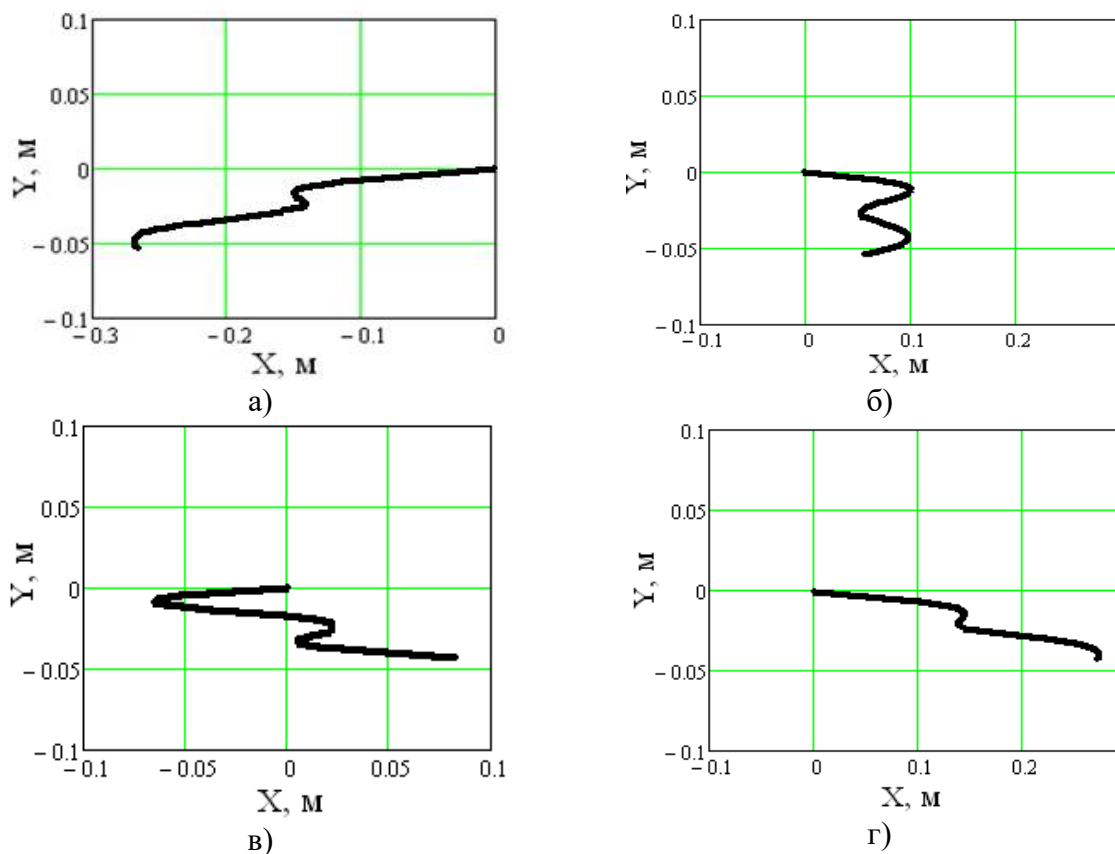


Рисунок 2.5 – Траектории движения компонентов зернового вороха по лепестку жалюзи ($\alpha = 8^\circ$, $\delta = 27^\circ$, $\beta = 26^\circ$): а, б – начало движения зерна в отрицательном и положительном направлениях оси X; в, г – начало движения сбоины в отрицательном и положительном направлениях оси X соответственно

Рассчитана скорость движения частицы (зерна) по лепестку при следующих параметрах: $\omega = 28 \text{ рад/с}$, $r = 0,03 \text{ м}$, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 26^\circ$, $\gamma = \delta = 25^\circ$, $U = 4,5 \text{ м/с}$, $f = 0,32$, $U_S = 8,5 \text{ м/с}$. Средняя скорость частицы с учётом скорости обдува частицы воздушным потоком по формуле (2.4) равна $V_{CP} = -0,167 \text{ м/с}$, а если учитывать только скорость воздушного потока – $V_{CPU} = -0,187 \text{ м/с}$. Относительная ошибка упрощенного рассмотрения движения частицы составляет

$$\delta = \frac{|V_{CP} - V_{CPU}|}{|V_{CP}|} \cdot 100 = \frac{|-0,167 - (-0,187)|}{|-0,167|} \cdot 100 = 12,0 \%. \quad (2.17)$$

При тех же условиях для половы: $V_{CP} = 0,296 \text{ м/с}$, $V_{CPU} = 0,357 \text{ м/с}$, а ошибка составляет 20,6 %.

Результаты расчёта средней скорости частицы в продольном направлении при горизонтальном положении решета и молотилки ($\alpha = 0^\circ$, $\delta_r = 0^\circ$, $\delta_K = 0^\circ$) приведены на рисунке 2.6.

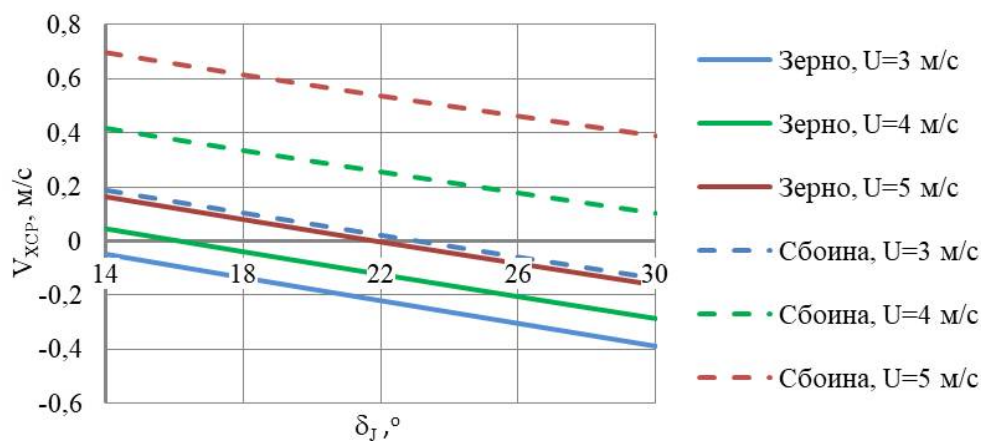


Рисунок 2.6 – Графики зависимости средней скорости зерна ($U_S = 8,5 \text{ м/с}, f = 0,32$) и сбойны ($U_S = 5,0 \text{ м/с}, f = 0,4$) от угла открытия жалюзи и скорости воздушного потока

С увеличением угла открытия жалюзи средняя скорость снижается как для зерна, так и для солоmistых частиц, причём кривые практически совпадают при скорости воздушного потока 5,0 м/с для зерна и 3,0 м/с для солоmistой частицы. При $\delta_J = 14^\circ$ средняя скорость зерна при скорости воздушного потока 4 и 5 м/с имеет положительное значение, а при скорости 3 м/с близка к нулю ($-0,048 \text{ м/с}$), что приводит к увеличению схода зерна с решета. Открытие жалюзи на угол 30° (зазор 19,5 мм) приведёт к проходу солоmistых частиц через решето. Поэтому для рассматриваемого положения решета и молотилки наиболее рациональным значением угла δ_J является 22° (зазор между жалюзи равен 15 мм), при котором средние скорости для солоmistых частиц имеют положительные значения для рассматриваемых скоростей воздушного потока, а для зерна – в основном отрицательные (при скорости $U=5 \text{ м/с}$ $V_{XCP} = -0,003 \text{ м/с}$). На рисунке 2.7 показаны графики зависимости средней скорости частиц от скорости воздушного потока, из которых следует, что рациональная скорость воздушного потока равна $4,0 \pm 0,5 \text{ м/с}$, что хорошо согласуется с рекомендациями других исследователей [4, 35, 67].

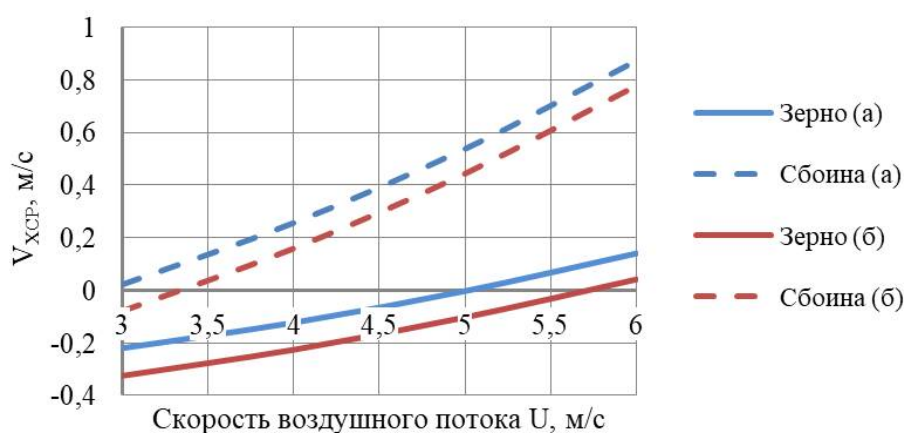


Рисунок 2.7 – Графики зависимости средней скорости зерна ($f = 0,32, U_S = 8,5 \text{ м/с}$) и сбойны ($U_S = 5,0 \text{ м/с}, f = 0,4$) от скорости воздушного потока: а) $\delta = \delta_J = 22^\circ$; б) $\delta_J = 22^\circ, \delta_r = 5^\circ, \delta = 27^\circ$

Установка верхнего решета под небольшим углом относительно продольной оси комбайна (угол δ_r в современных конструкциях зерноуборочных комбайнов находится в интервале от 0 до 7 °) улучшает условия прохода зерна. Это подтверждается расчётами, выполненными при $\delta_r = 5^\circ$ (рисунок 2.7). Рациональная скорость воздушного потока в этом случае увеличивается и равна $5,0 \pm 0,5$ м/с, что обеспечивает лучшую продуваемость зернового вороха на решете.

Рассмотрим влияние продольного наклона молотилки на параметры движения частицы по лепестку при движении комбайна вверх или вниз по склону. Как и в предыдущих расчётах, поперечный крен комбайна $\alpha_K = 0^\circ$. Продольный наклон решета примем равным $\delta_r = 5^\circ$, скорость воздушного потока – $U = 5,0$ м/с.

Результаты расчёта при движении комбайна вверх и вниз по склону приведены на рисунке 2.8.

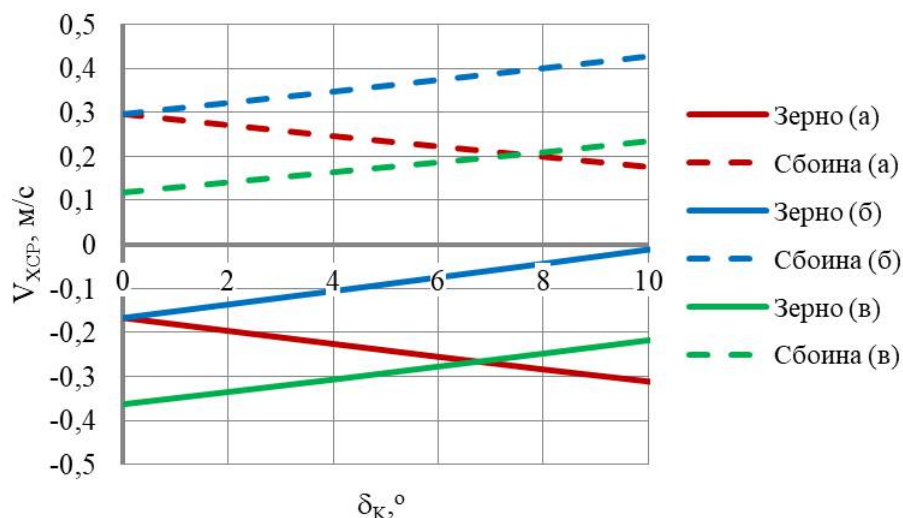


Рисунок 2.8 – Средняя скорость зерна ($U_S = 8,5$ м/с, $f = 0,32$) и сбоины ($U_S = 5,0$ м/с, $f = 0,4$) в зависимости от угла продольного наклона молотилки ($U = 4,5$ м/с):

- а) движение комбайна вниз по склону; б) движение комбайна вверх по склону $\delta_J = 22^\circ, \delta_r = 5^\circ$; в) движение комбайна вверх по склону ($\delta_J = 30^\circ, \delta_r = 7^\circ$)

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

При движении комбайна вверх по склону условия для схода сбоины с лепестка улучшаются, но при этом условия прохода зерна сквозь решето значительно ухудшаются. При угле наклона молотилки 11 ° средняя скорость зерна по лепестку равна нулю, что означает сход зерна с решета.

Одним из способов снижения потерь зерна при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону является увеличение угла открытия жалюзи δ_J и угла наклона решета δ_r . На рисунке 2.8, в показаны результаты расчёта при значениях: $\delta_J = 30^\circ$, $\delta_r = 7^\circ$.

Условия прохода зерна улучшились; при угле продольного наклона молотилки 10° средняя скорость равна «минус» 0,21 м/с, т. е. зерно проходит через решето. Однако при небольшом значении угла продольного наклона молотилки сход соломистых частиц с лепестка ухудшается.

Постоянство качественных показателей работы системы очистки при изменении продольного наклона молотилки обеспечивается за счёт изменения углов δ_J (открытия жалюзи решета) и δ_r (продольного наклона решета относительно молотилки). Так как в современных зерноуборочных комбайнах угол δ_J регулируется дистанционно, то целесообразно изменять именно эту величину. Примем значения углов: $\delta_r = 5^\circ$; при горизонтальном положении молотилки $\delta_{J0} = 22^\circ$. Определены значения углов δ , при которых средние скорости частицы (зерно и сбойна) имеют постоянные значения при различных продольных наклонах молотилки. При расчёте учитывались соотношения между углами, отображенные в формулах (2.5–2.8).

Выявлены зависимости, определяющие рациональные углы открытия жалюзи при движении зерноуборочного комбайна с продольным наклоном [109]:

- вниз

$$\delta_J = \delta_{J0} - 0,7 \cdot \delta_K, \quad (2.18)$$

- вверх

$$\delta_J = \delta_{J0} + 0,7 \cdot \delta_K. \quad (2.19)$$

Техническое предложение, заключающееся в изменении угла наклона жалюзи решета в зависимости от продольного наклона комбайна, реализовано в системе компенсации продольного уклона 4D зерноуборочного комбайна TORUM-785 [90].

Определим скорость движения зерна и сбойны при движении комбайна вниз и вверх по склону при следующих параметрах: $\delta_{J0} = 25^\circ$, $\delta_r = 5^\circ$, $U = 4,5 \text{ м/с}$ (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты расчёта рекомендуемых углов открытия жалюзи решета и средней скорости компонентов вороха при движении комбайна с продольным наклоном до 10°

$\delta_K, ^\circ$	Движение комбайна вниз			Движение комбайна вверх		
	$\delta_J, ^\circ$	$V_{\text{ХСР}}, \text{ м/с}$ (зерно)	$V_{\text{ХСР}}, \text{ м/с}$ (сбойна)	$\delta_J, ^\circ$	$V_{\text{ХСР}}, \text{ м/с}$ (зерно)	$V_{\text{ХСР}}, \text{ м/с}$ (сбойна)
0	25,0	- 0,227	0,241	25,0	- 0,227	0,241
6	20,8	- 0,233	0,244	29,2	- 0,233	0,244
8	19,4	- 0,234	0,245	30,6	- 0,234	0,245
10	18,0	- 0,235	0,246	32,0	- 0,236	0,246

Как видно из приведённых данных, средние скорости зерна и сбиины практически остаются постоянными (разность средних скоростей для зерна и сбиины не превышают 5 %), т. е. условия прохода зерна и схода сбиины остаются практически неизменными как при движении комбайна вниз по склону, так и при движении вверх.

С увеличением угла поперечного крена молотилки условия прохода зерна сквозь решето и сход солоmistых примесей с лепестка жалюзи практически не изменяются, что видно из рисунка 2.9.

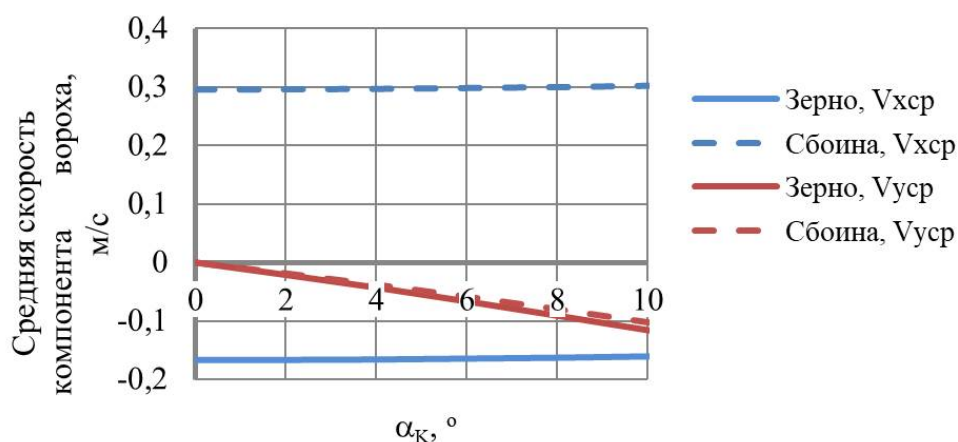


Рисунок 2.9 – Зависимость средней скорости зерна и солоmistой частицы от угла поперечного наклона молотилки ($U=4,5$ м/с; $\delta_J = 22^\circ$; $\delta_r = 5^\circ$)

Как было ранее отмечено, при поперечном крене решета компоненты зернового вороха смещаются в сторону уклона. Причем, как это следует из рисунка 2.9, с увеличением угла поперечного крена скорость в поперечном направлении зерна и солоmistых частиц увеличивается практически одинаково.

2.3 Движение зернового вороха по жалюзийному решету

В этом случае угол δ определяет наклон решета относительно горизонта – при движении комбайна вниз по склону $\delta = \delta_r + \delta_K$, при движении вверх – $\delta = \delta_r - \delta_K$. Значение угла δ_r для верхнего решета находится в интервале от 0 до 7° . Движение зернового вороха рассматриваем в виде движения выделенного элемента, наделённого комплексом физико-механических свойств.

При движении зернового вороха по решету происходит сепарация зерна, выделение половы, столкновения зёрен с солоmistыми примесями, влияющие на сопротивление зернового вороха воздушному потоку. Поэтому при моделировании применён приведённый коэффициент парусности k_{Π} элемента, значение которого определено как средневзвешенное математическое ожидание коэффициента парусности зернового вороха

$$k_{\Pi} = \sum_i^{n_B} (m_{k_{\Pi}i} \cdot \delta_i), \quad (2.20)$$

где $m_{k_{\Pi i}}$ – математическое ожидание коэффициента парусности i -го компонента зернового вороха; δ_i – относительное содержание i -го компонента; n_B – количество компонентов зернового вороха.

Приведённый коэффициент парусности элемента зернового вороха пшеницы, находящегося на верхнем решете, находится в интервале от 0,2 (в начале решета; зерновой ворох состоит из зерна, сбиины, половы и колосков) до 0,4 (в конце решета; зерновой ворох состоит в основном из сбиины и колосков). Скорость воздушного потока находится в интервале от 3,5 до 4,5 м/с.

Коэффициент сопротивления движению элемента в прямом направлении (в положительном направлении оси X) примем равным приведенному коэффициенту трения $f_{\Pi P 1}$ соломистой фракции зернового вороха по жалюзийному решету, зависящим от зазора S между лепестками (формула 1.9); в обратном направлении (отрицательном направлении оси X) – $f_{\Pi P 2} = 1,19$; в поперечном направлении – $f_{\Pi P 3} = 0,88$. При исследовании движения зернового вороха в поперечном направлении по плоским жалюзи, например, скруглённым ламельным жалюзи, коэффициент трения можно принять равным коэффициенту трения соломистой фракции постальной поверхности.

Относительная скорость элемента в воздушном потоке равна

$$U_o = U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta) - \dot{x} \cdot \cos(\gamma - \delta). \quad (2.21)$$

Система уравнений (2.3) для рассматриваемого случая имеет вид [114]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{\Pi} \cdot U_o^2 \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp \\ \mp f_{\Pi P 1, \Pi P 2} \cdot \frac{N}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ \ddot{y} = \mp f_{\Pi P 3} \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) - k_{\Pi} \cdot U_o^2 \cdot \sin(\gamma - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (2.22)$$

Отрыв элемента от поверхности решета возможен при $\ddot{z} \geq 0$, $N=0$; из третьего уравнения системы уравнений (2.22) получим

$$\omega^2 r \cos(\varphi_0) \sin(\beta - \delta) + k_{\Pi} \cdot U_o^2 \cdot \sin(\gamma - \delta) - g \cos \alpha \cos \delta \geq 0. \quad (2.23)$$

Преобразованием неравенства (2.23) получим угол поворота φ_0 , при котором происходит отрыв элемента от поверхности решета

$$\varphi_0 \geq \arccos \left[\frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\delta) - k_{\Pi} \cdot U_o^2 \cdot \sin(\gamma - \delta)}{k_r \cdot \sin(\beta - \delta)} \right], \quad (2.24)$$

где k_r – показатель кинематического режима,

$$k_r = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}. \quad (2.25)$$

Отрыв элемента от поверхности решета возможен, когда

$$k_o \geq \frac{\cos\alpha \cdot \cos\delta - k_{II} \cdot U_o^2 \cdot \sin(\gamma - \delta)}{\sin(\beta - \delta)}. \quad (2.26)$$

Предельное значение кинематического режима k_o , при котором элемент оторвётся от поверхности решета, определим при допущении, что во время отрыва относительная скорость его незначительна, отсюда

$$k_o = \frac{\cos\alpha \cdot \cos\delta - k_{II} \cdot (U + \omega \cdot r \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\gamma - \beta))^2 \cdot \sin(\gamma - \delta)}{\sin(\beta - \delta)}. \quad (2.27)$$

На рисунке 2.10 приведены результаты расчёта ($\beta = 26^\circ$, $\gamma = 30^\circ$, $\alpha = 0^\circ$, рабочий кинематический режим $k_r = 2,4$), выполненные в программе Mathcad.

Значение коэффициента k_o практически не зависит от угла α . Продольный наклон решета оказывает большое влияние на отрыв элемента от поверхности решета. Причём при продольном наклоне решета более 5° и принятых при расчёте параметрах зерновой ворох не отрывается от решета.

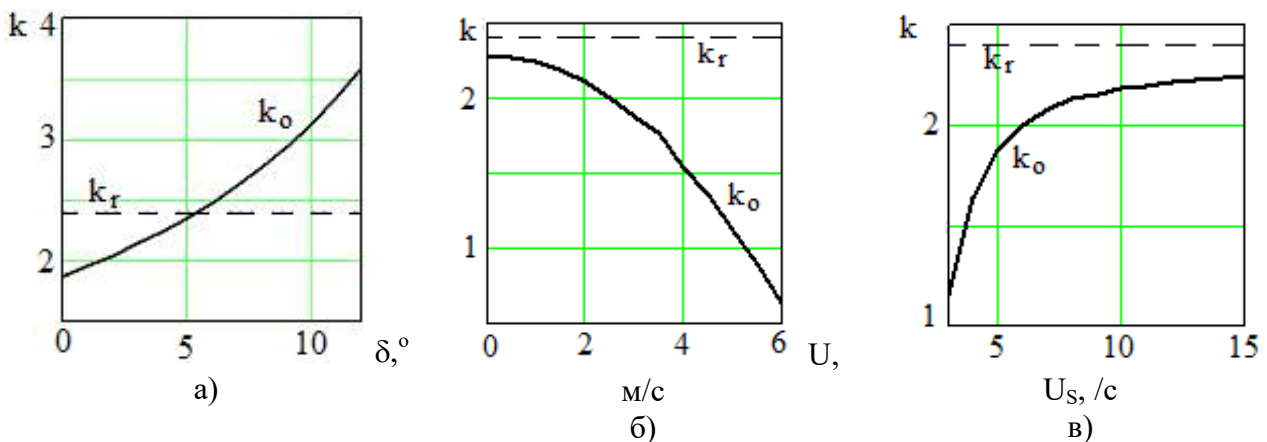


Рисунок 2.10 – Результаты расчёта k_o : а – $U = 3 \text{ м/с}$, $U_S = 5 \text{ м/с}$;

б – $\delta = 0^\circ$, $U_S = 5 \text{ м/с}$; в – $\delta = 0^\circ$, $U = 3 \text{ м/с}$

Так как $\delta = \delta_r + \delta_K$, то можно предположить, что при установке верхнего решета под углом $\delta_r = 5^\circ$ и при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону зерновой ворох будет отрываться от поверхности решета, а при движении вниз по склону – нет.

Наклон молотилки и наклон решета в продольном и поперечном направлениях оказывают влияние на режимы возможного движения зернового вороха по решету – перемещаться по решету в положительном и отрицательном направлениях осей X и Y (обозначим интервалы движения $X_{(+)}$, $Y_{(+)}$, $X_{(-)}$, $Y_{(-)}$); находиться в состоянии покоя (X_{II}); совершать полёт ($Z_{(+)}$).

Определим относительное перемещение элемента по поверхности решета ($N > 0$, $\ddot{z} = 0$). Рассмотрим установившееся движение ($\ddot{x} = 0$, $\ddot{y} = 0$). Интервал $X_{(+)}$ возможен при положительном значении ускорения $\ddot{x} > 0$, интервал $X_{(-)}$ – при $\ddot{x} < 0$.

Границы интервалов определим из системы уравнений (2.22) при $\ddot{x}=0$ и $\ddot{y}=0$. Не учитывая сопротивление воздушного потока движению элемента в направлении оси Y ввиду малости значения скорости элемента в поперечном направлении, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \omega^2 r \cos \omega t \cos(\beta - \delta) + k_{II} U_0^2 \cos(\gamma - \delta) - f_{II1,2} \frac{N}{m} \cos \varepsilon - g \cos \alpha \sin \delta = 0 \\ - f_{II3} \frac{N}{m} \sin \varepsilon - g \sin \alpha \cdot \cos \delta = 0 \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) - k_{II} U_0^2 \sin(\gamma - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta. \end{cases} \quad (2.28)$$

Движение элемента в положительном и отрицательном направлениях оси X определим из первого уравнения системы (2.22):

- интервал $X_{(+)}$

$$\ddot{x}_+ = \omega^2 r \cos(\omega t) \cos(\beta - \delta) + k_{II} U_0^2 \cos(\gamma - \delta) - f_{II1} \frac{N}{m} \cos \varepsilon - g \cos \alpha \sin \delta \geq 0, \quad (2.29)$$

- интервал $X_{(-)}$

$$\ddot{x}_- = \omega^2 r \cos(\omega t) \cos(\beta - \delta) + k_{II} U_0^2 \cos(\gamma - \delta) + f_{II2} \frac{N}{m} \cos \varepsilon - g \cos \alpha \cdot \sin \delta \leq 0. \quad (2.30)$$

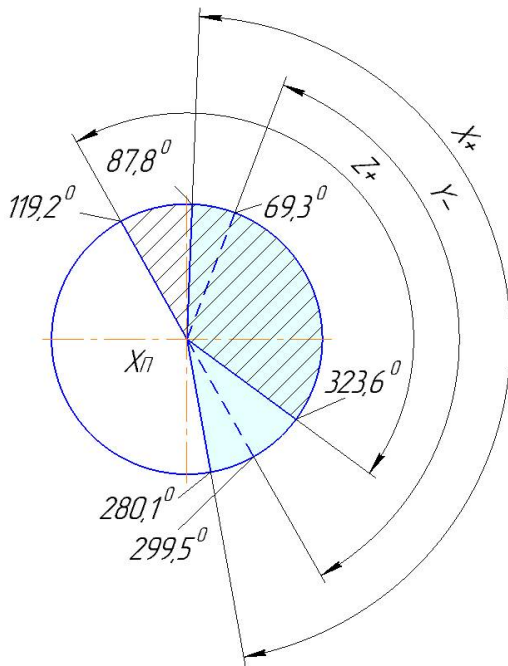


Рисунок 2.11 – Интервалы движения зернового вороха по жалюзийному решету: $U = 4,0 \text{ м/с}$;

$$U_S = 6,5 \text{ м/с} ; \delta = 0^\circ ; \alpha = 8^\circ$$

В результате расчёта интервалов движения зернового вороха по жалюзийному решету, выполненного в программе Mathcad, установлено: движение элемента в отрицательном направлении оси X отсутствует; движение в отрицательном направлении оси Y начинается позже начала движения в направлении оси X ; после касания элемента с поверхностью решета он находится в состоянии покоя (рисунок 2.11).

Движение элемента после отрыва от поверхности решета происходит в воздушном потоке, направление которого зависит от наклона молотилки. Введём систему координат $O_K X_K Y_K Z_K$, связанную с молотилкой (с корпусом комбайна). На рисунке 2.12 изображена схема сил, действующих на элемент вороха, совершающего полёт над решетом.

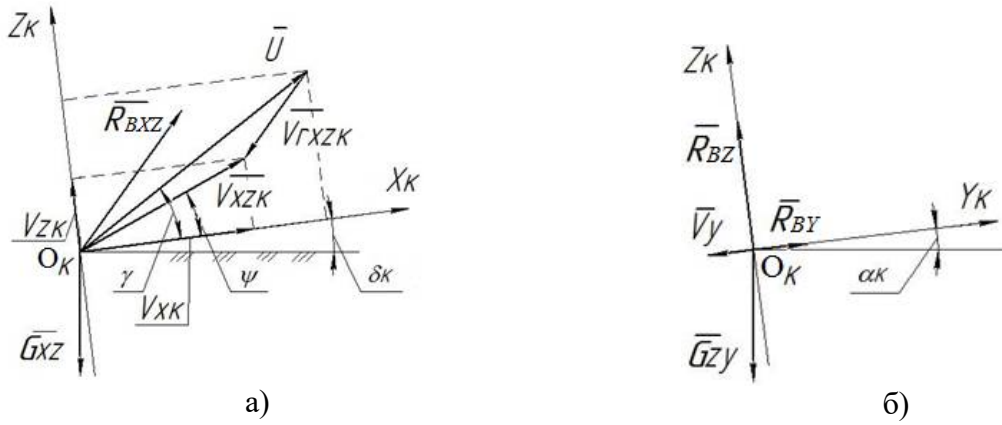


Рисунок 2.12 – Схемы к определению траектории полёта элемента над решетом: а) в плоскости $X_K O_K Z_K$; б) в плоскости $Y_K O_K Z_K$

Полёт элемента относительно системы координат $O_K X_K Y_K Z_K$ описывается системой дифференциальных уравнений [114]:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x}_K = R_{BX} - G \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta_K \\ m \cdot \ddot{y}_K = R_{BY} - G \cdot \sin \alpha_K \cdot \cos \delta_K, \\ m \cdot \ddot{z}_K = R_{BZ} - G \cdot \cos \alpha_K \cdot \cos \delta_K \end{cases} \quad (2.31)$$

где α_K – угол поперечного крена молотилки относительно горизонта.

Проекции относительной скорости элемента слоя на оси X_K и Z_K в соответствии с рекомендациями С.А. Алфёрова [4] равны

$$V_{rXK} = U \cos \gamma - V_{XK}, \quad V_{rZK} = U \sin \gamma - V_{ZK}. \quad (2.32)$$

В соответствии с моделью движения частицы в наклонном воздушном потоке С.А. Алфёрова [4], система дифференциальных уравнений полёта элемента имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_K = k_{II} \cdot \left[\sqrt{V_{rXK}^2 + V_{rZK}^2} \right]^2 \cdot \frac{V_{rXK}}{\sqrt{V_{rXK}^2 + V_{rZK}^2}} - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta_K \\ \ddot{y}_K = \pm k_{II} \cdot V_{rYK}^2 - g \cdot \sin \alpha_K \cdot \cos \delta_K \\ \ddot{z}_K = k_{II} \cdot \left[\sqrt{V_{rXK}^2 + V_{rZK}^2} \right]^2 \cdot \frac{V_{rZK}}{\sqrt{V_{rXK}^2 + V_{rZK}^2}} - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \cos \delta_K \end{cases} \quad (2.33)$$

Начальные условия полёта элемента: $t = t_{ot}$; $x_K = x_{Kot}$; $y_K = y_{Kot}$; $z_K = z_{Kot}$; $\dot{x}_K = \dot{x}_{Kot}$; $\dot{y}_K = \dot{y}_{Kot}$; $\dot{z}_K = \dot{z}_{Kot}$ (здесь индекс ot обозначает отрыв элемента от гребёнки; x_K , y_K , z_K , \dot{x}_K , \dot{y}_K , \dot{z}_K – соответственно проекции перемещения и скорости элемента на оси X_K , Y_K , Z_K).

Численное решение систем дифференциальных уравнений (2.22) и (2.33) выполнили в программе Mathcad. Время соударения элемента с решетом определяли по графикам перемещений по оси Z_K элемента и решета. Поперечную V_{YCP} и продольную V_{XCP} составляющие средней скорости элемента определяли по его перемещению за один период колебаний решета. Направление элемента относительно оси X определяли по углу $\varepsilon_{CP} = \arctg(V_{YCP} / V_{XCP})$. Рас-

чёт проведён при детерминированном значении приведённого коэффициента парусности $k_{II} = 0,23$, которое соответствует скорости витания $U_S = 6,5 \text{ м/с}$.

Выполнен анализ движения зернового вороха по поверхности жалюзийного решета. Выявлено, что на скорость зернового вороха в продольном направлении большое значение оказывают скорость воздушного потока и угол продольного наклона комбайна, рисунок 2.13.

При движении комбайна вверх по склону скорость зернового увеличивается, что приводит к уменьшению времени пребывания вороха на верхнем решете и, таким образом, к снижению эффективности сепарации зернового вороха. Изменение угла продольного наклона с 0 до 10° при скорости воздушного потока 3,5 м/с скорость зернового вороха увеличилась с 0,43 до 0,50 м/с, т.е. на 16,3 %. Наклон комбайна при движении вниз по склону оказывает меньшее влияние на скорость зернового вороха – при продольном наклоне на угол 10° скорость равна 0,41 м/с (т. е. уменьшилась на 4,7%).

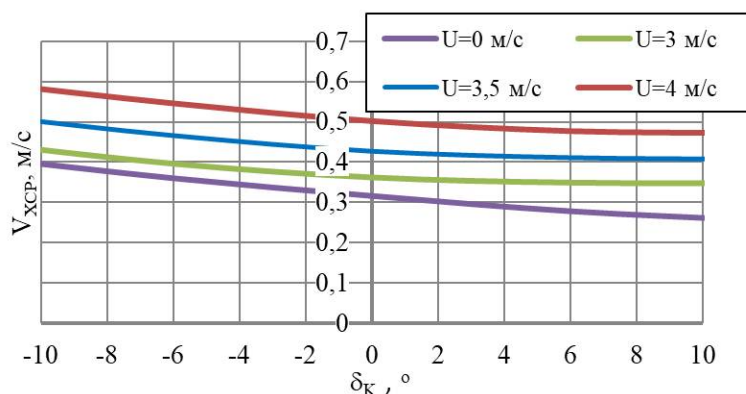


Рисунок 2.13 – Скорость зернового вороха в продольном направлении в зависимости от угла продольного наклона молотилки и скорости воздушного потока (отрицательные значения угла δ_K – движение комбайна вверх по склону, $f_{ПР1} = 0,85$, $f_{ПР2} = 1,19$)

При движении зерноуборочного комбайна с поперечным креном зерновой ворох смещается в сторону уклона. На рисунке 2.14 приведены результаты расчёта кинематических параметров движения зернового вороха в зависимости от угла поперечного крена молотилки.

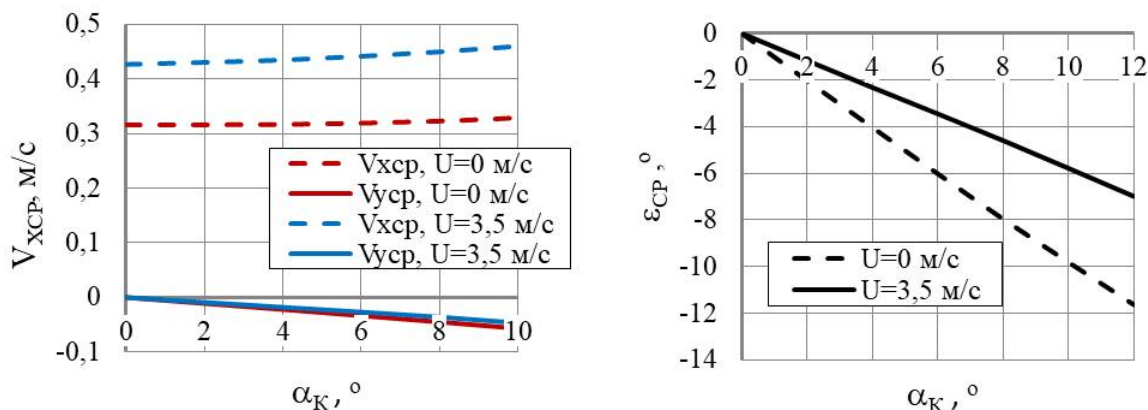


Рисунок 2.14 – Параметры движения зернового вороха по жалюзийному решету в зависимости от поперечного крена молотилки ($f_{ПР1} = 0,85$, $f_{ПР2} = 1,19$, $f_3 = 0,4$)

Скорость зернового вороха в поперечном направлении практически не зависит от скорости воздушного потока. Но в связи с тем, что воздушный поток оказывает влияние на скорость зернового вороха в продольном направлении, его отклонение от продольной оси молотилки с увеличением скорости воздушного потока уменьшается.

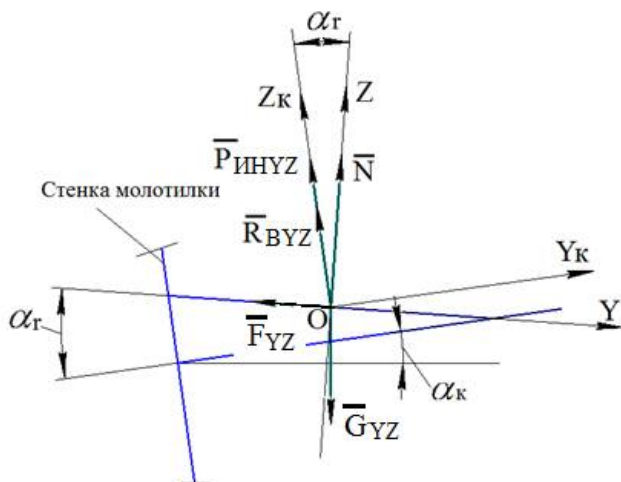


Рисунок 2.15 – Силы в плоскости YOZ, действующие на элемент зернового вороха, находящегося на наклонённом решете

Изменение поперечного наклона решета относительно молотилки, имеющей поперечный наклон, может способствовать перемещению зернового вороха в противоположную сторону уклона. Векторы сил инерции и воздействия воздушного потока остаются в плоскости, параллельной боковинам молотилки, что препятствует интенсивному смещению зернового вороха в сторону, противоположную уклону (рисунок 2.15).

Система уравнений (2.22) в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{IH} \cdot \cos(\beta - \delta) + R_B \cdot \cos(\gamma - \delta) + F_{1,2} \cdot \cos \varepsilon - G \cdot \cos(\alpha_K - \alpha_r) \cdot \sin \delta \\ m\ddot{y} = F_3 \cdot \sin \varepsilon - P_{IH} \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \sin \alpha_r - R_B \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \sin \alpha_r - G \cdot \sin(\alpha_K - \alpha_r) \cdot \cos \delta \\ m\ddot{z} = N + P_{IH} \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \cos \alpha_r + R_B \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \cos \alpha_r - G \cdot \cos(\alpha_K - \alpha_r) \cdot \cos \delta, \end{cases} \quad (2.34)$$

где α_r – угол поперечного наклона решета относительно молотилки комбайна.

Как показали расчёты, с увеличением угла α_r интенсивность смещения зернового вороха в сторону уклона снижается (рисунок 2.16).

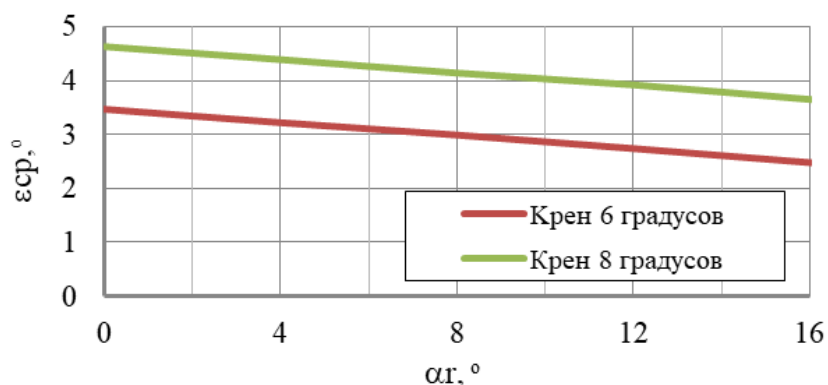


Рисунок 2.16 – Зависимость угла ε_{cp} от поперечного наклона решета (в сторону, противоположную уклону)

Однако силы воздействия воздушного потока и инерции от колебаний решета оказывают большое влияние на движение зернового вороха, контактирующего с поверхностью решета. Так как векторы указанных сил находятся в плоскости, параллельной боковой стенке молотилки (рисунок 2.15), то они способствуют смещению зернового вороха в сторону уклона. Таким образом, применение выравнивания решета относительно горизонта способствует стабилизации распределения зернового вороха на верхнем решете очистки. Для смещения зернового вороха по решету в сторону, противоположную уклону, целесообразно изменить направление колебаний решета добавлением поперечной составляющей, обеспечивающей, при движении решета по ходу движения зернового вороха, движение в сторону, противоположную уклону.

2.4 Движение зернового вороха по жалюзийному решету при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении

Одним из направлений повышения эффективности работы системы очистки на склонах является выравнивание толщины зернового вороха за счёт введения дополнительных колебаний верхнего решета в поперечном направлении с амплитудой r_{Π} (рисунок 2.17).

Угол, определяющий отклонение направления колебаний решета от продольного направления, равен

$$v = \arctg(r_{\Pi}/r). \quad (2.35)$$

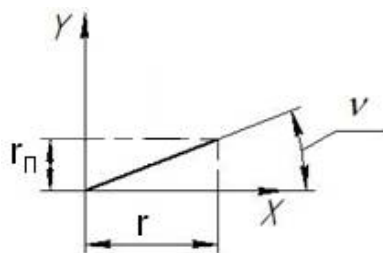


Рисунок 2.17

Движение частицы зернового вороха по наклонённому в поперечном направлении на угол α решету с учётом дополнительных колебаний решета с амплитудой r_{Π} рассмотрено в работах [32, 34, 112, 119].

Однако, как было отмечено ранее, в указанных работах принято, что относительное перемещение частицы по решету и колебания решета не оказывают влияния на силу воздействия воздушного потока на частицу.

Рассмотрим движение элемента зернового вороха по наклонённому и колеблющемуся в двух направлениях жалюзийному решету.

Колебания решета в поперечном направлении приводят к появлению дополнительной инерционной силы $F_{IH} = m \cdot \omega^2 \cdot r_{\Pi} \cdot \cos(\omega t)$ (рисунок 2.18). Колебания решета в поперечном направлении в воздушном потоке приводят к появлению переменной силы сопротивления воздушного потока движению зернового вороха $R_{BY} = m \cdot k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r_{\Pi} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \dot{y})^2$. Однако, как показали дальнейшие исследования, указанная сила несущественно влияет на движение элемента вороха, поэтому её можно не учитывать (ошибка расчёта угла ε_{CP} не превышает 0,1 %).

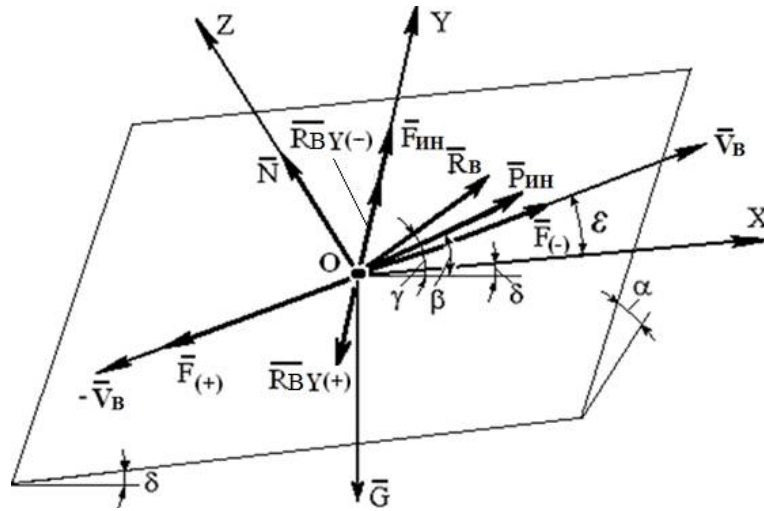


Рисунок 2.18 – Схема сил, действующих на элемент при наложении продольных и поперечных колебаний решета

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение зернового вороха по поверхности решета с учётом силы инерции от поперечных колебаний решета, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{IH} \cdot \cos(\beta - \delta) + R_B \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp F \cdot \cos \varepsilon - G \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \\ m\ddot{y} = F_{IH} \mp F \cdot \sin \varepsilon - G \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta \\ m\ddot{z} = N + P_{IH} \cdot \sin(\beta - \delta) + R_B \cdot \sin(\gamma - \delta) - G \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (2.36)$$

Сила F_{IH} не оказывает влияние на движение зернового вороха относительно осей X и Z, а влияет только на параметры его движения в поперечном направлении. Поэтому предельное значение кинематического режима k_0 , при котором элемент зернового вороха оторвётся от поверхности решета, определено по выражению (2.27).

Наличие силы F_{IH} и возможность отрыва зернового вороха от поверхности решета обуславливают следующие интервалы его движения: $X_{(+)}$; $X_{(+)Y_{(+)}$; $X_{(+)Y_{(-)}}$; $X_{(-)}$; $X_{(-)Y_{(+)}$; $X_{(-)Y_{(-)}}$; X_{Π} ; $Z_{(+)}$ (здесь $X_{(+)}$, $X_{(-)}$, $Y_{(+)}$, $Y_{(-)}$ – соответственно движение в положительном и отрицательном направлениях осей X и Y; X_{Π} – покой; $Z_{(+)}$ – полёт).

Определим для рассматриваемого случая относительное перемещение элемента зернового вороха по поверхности решета ($N > 0$, $\ddot{z} = 0$). Рассмотрим установившееся движение ($\ddot{x} = 0$, $\ddot{y} = 0$). Интервал $X_{(+)}$ возможен при положительном значении ускорения $\ddot{x} > 0$, интервал $X_{(-)}$ – при $\ddot{x} < 0$. Границы интервалов определим из системы уравнений (2.36) при $\ddot{x} = 0$, $\ddot{y} = 0$. Получена следующая система уравнений [114]:

$$\begin{cases} \omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\beta - \delta) + k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \cos(\gamma - \delta) \mp f_{\Pi\Pi 1, \Pi\Pi 2} \frac{N}{m} \cos \varepsilon - g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta = 0 \\ \omega^2 \cdot r_{\Pi} \cdot \cos(\omega \cdot t) \mp f_{\Pi\Pi 3} \cdot \frac{N}{m} \cdot \sin \varepsilon - g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta = 0 \\ \frac{N}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\beta - \delta) - k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \sin(\gamma - \delta) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (2.37)$$

На рисунке 2.19 представлены интервалы возможного движения зернового вороха при амплитуде поперечных колебаний решета 10 мм, на рисунке 2.20 – параметры движения зернового вороха при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении.

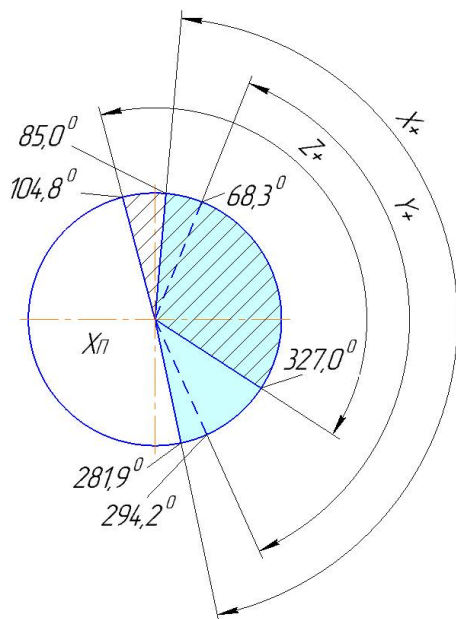
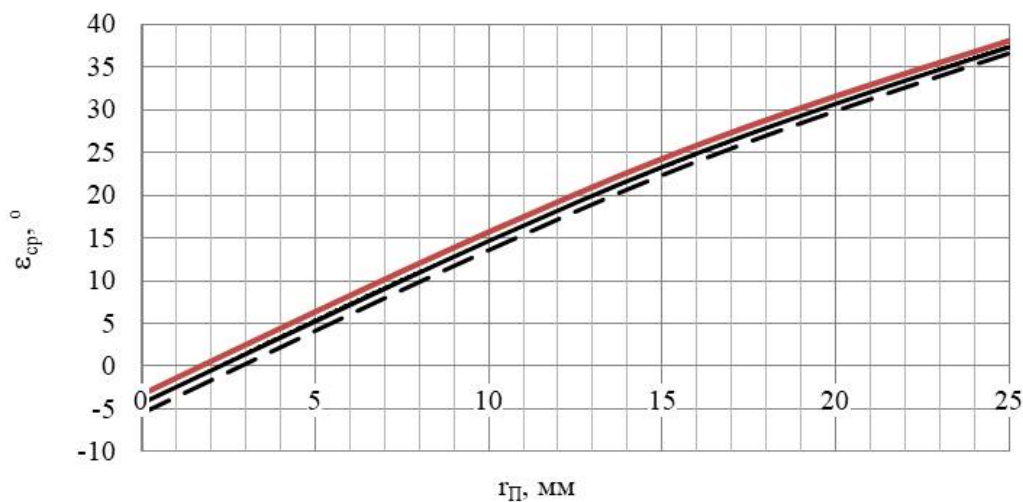


Рисунок 2.19 – Интервалы возможного движения зернового вороха при дополнительных поперечных колебаниях решета ($U=4,0 м/с$; $U_S=6,5 м/с$; $\delta=0^\circ$; $\alpha=8^\circ$)

Зерновой ворох начинает движение вперёд при достижении приводным валом угла $281,9^\circ$. При достижении угла $294,2^\circ$ зерновой ворох начинает относительное движение в положительном направлении оси Y , т. е. вверх по склону. При угле $327,0^\circ$ зерновой ворох отрывается от решета и совершает полёт. После касания зернового вороха с решетом ($104,8^\circ$) он не перемещается относительно решета.



— Крен 6 градусов	$\epsilon_{ср} = -0,0168r_{п}^2 + 2,0862r_{п} - 3,44$; $R^2 = 0,9999$
— Крен 8 градусов	$\epsilon_{ср} = -0,016r_{п}^2 + 2,0798r_{п} - 4,50$; $R^2 = 0,9999$
- - Крен 10 градусов	$\epsilon_{ср} = -0,0156r_{п}^2 + 2,0876r_{п} - 5,67$; $R^2 = 0,9999$

Рисунок 2.20 – Параметры движения элемента зернового вороха при дополнительных колебаниях решета в поперечном направлении ($U=3,5 м/с$; $U_S=6,5 м/с$; $\delta=0^\circ$)

Колебания решета в поперечном направлении способствуют перемещению зернового вороха вверх по решету. При поперечном крене молотилки 6°

зерновой ворох, контактирующий с решетом, не смещается в сторону уклона ($\varepsilon_{CP} \geq 0^\circ$) при поперечных колебаниях решета с амплитудой более 1,7 мм, при крене 8° – более 2,2 мм, при крене 10° – более 2,8 мм (рисунок 2.20).

Теоретические значения угла отклонения вектора скорости зернового вороха от продольной оси молотилки при поперечных колебаниях решета согласуются с экспериментальными данными, полученными В.А. Дрюк [32, 34] ($U=0 \text{ м/с}$, $\alpha_K=8^\circ$, $r_{II}=10 \text{ мм}$): экспериментальное значение угла $\varepsilon_{\text{Э}}=-130^\circ$ ($\sigma=0,23^\circ$), теоретическое $\varepsilon_T=-13,9^\circ$, относительное отклонение $\Delta=6,9\%$.

В рассматриваемом случае нельзя утверждать, что весь слой вороха движется относительно решета в поперечном направлении как единое целое. Нижний слой, контактирующий с колеблющимся в поперечном направлении решетом и вышележащими слоями, и верхние слои, не имеющие контакта с решетом, несомненно, имеют разные условия. С другой стороны, из-за сил сцепления солоmistых частиц между собой, нельзя рассматривать перемещение слоёв между собой. В связи с этим, полученные результаты требуют экспериментального уточнения.

Для выравнивания толщины зернового вороха по поверхности решета, поступившего с начальной неравномерностью, амплитуда поперечных колебаний решета должна обеспечивать его перемещение в сторону, противоположную уклону, т.е. $\varepsilon_{CP} > 0$. Например, поперечные колебания решета с амплитудой 10 мм при поперечном наклоне молотилки 8° обеспечивают перемещение зернового вороха по поверхности решета под углом $14,7^\circ$ от продольной оси комбайна в сторону, противоположную уклону.

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

При изменении направления колебаний решета в горизонтальной плоскости появляется поперечная составляющая колебаний, а амплитуда колебаний решета в продольном направлении уменьшается (рисунок 2.21).

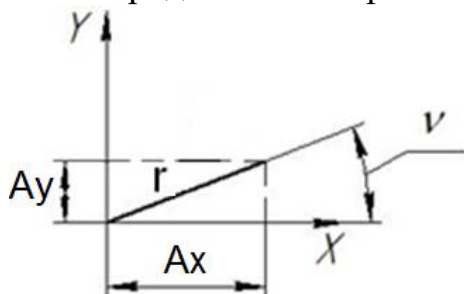


Рисунок 2.21

Параметры колебаний решета:

амплитуда в продольном направлении

$$A_X = r \cdot \cos(\nu);$$

в поперечном направлении

$$A_Y = r \cdot \sin(\nu);$$

угол

$$\nu = \arctg(A_Y/A_X).$$

На рисунке 2.22 графически представлены параметры A_X и ν в зависимости от параметра A_Y ($r = 30 \text{ мм}$). При угле $\nu = 45^\circ$ $A_X = A_Y$ (для $r = 30 \text{ мм}$, $A_X = 21,2 \text{ мм}$, $A_Y = 21,2 \text{ мм}$).

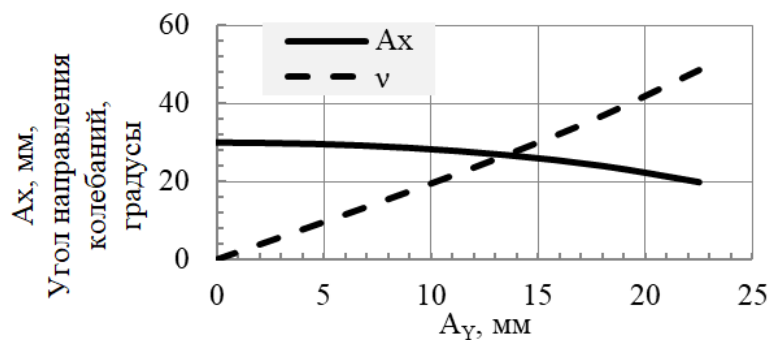


Рисунок 2.22 – График зависимости направления и амплитуды колебаний решета в продольном направлении от амплитуды колебаний в поперечном направлении

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

Угол продольного наклона поверхности гребёнки относительно горизонта δ определен в виде суммы углов – наклона поверхности гребёнки относительно пальцевого решета δ_P , наклона пальцевого решета относительно молотилки δ_r , и наклона молотилки относительно горизонта δ_K (рисунок 2.23)

$$\delta = \delta_P + \delta_r \pm \delta_K. \quad (2.38)$$

В формуле (2.38) при движении комбайна вниз по склону применяются верхние знаки, при движении комбайна вверх по склону – нижние.

Рассмотрим движение элемента зернового вороха, имеющего приведённый коэффициент парусности и фрикционные свойства солоистой фракции зернового вороха. Введём подвижную систему координат $OXYZ$, связанную с поверхностью гребёнки, и систему координат $O_KX_KY_KZ_K$, связанную с молотилкой комбайна. Схема сил, действующих на элемент, представлена на рисунке 2.23.

На элемент зернового вороха, находящегося на пальцевом решете, действуют сила тяжести G ; сила воздействия воздушного потока R_B ; сила сопротивления воздушного потока при движении элемента в поперечном направлении $R_{BY} = m \cdot k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \nu + \dot{y})^2$; N_X, N_Z – нормальные реакции гребёнок по осям X и Z ; сила инерции элемента от колебаний решётки $P_{ин}$; сила трения F ; центробежная сила инерции $F_{ц}$. Заметим, что значение параметра \dot{y} мало, поэтому при определении значения силы R_{BY} его можно не учитывать.

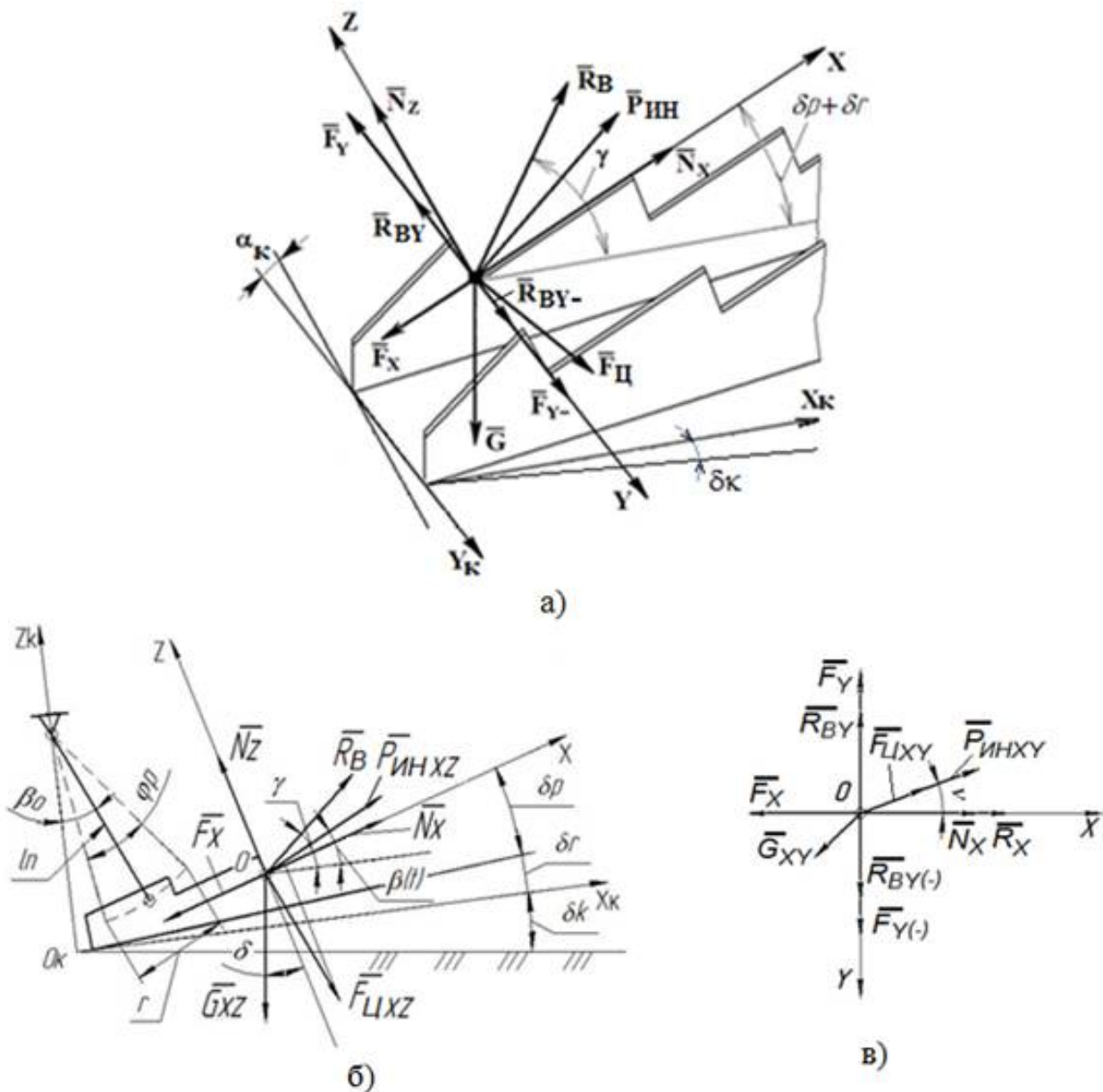


Рисунок 2.23 – Силы, действующие на элемент:
 а) пространственная схема; б) в плоскости XOZ; в) в плоскости XOY

При движении зернового вороха по решетке большое значение имеет направление его скорости в момент отрыва, поэтому рассмотрим движение пальцевой решетки по дуге окружности, имеющей радиус, равный длине подвесок l_n .

В работах [4, 32 и др.] принято допущение, что сила инерции вороха от колебаний решетки направлена по хорде под углом $\beta = const$. Однако при небольшой длине подвесок указанное допущение приводит к большой погрешности определения направления силы инерции (до 37 % при $l_n = 0,12$ м), что сказывается на точности математической модели.

Поэтому угол β определен в виде функции от времени (рисунок 2.23, б) [115]

$$\beta(t) = \beta_0 + \arcsin \frac{r \cdot \cos(\omega \cdot t)}{l_n}, \quad (2.39)$$

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

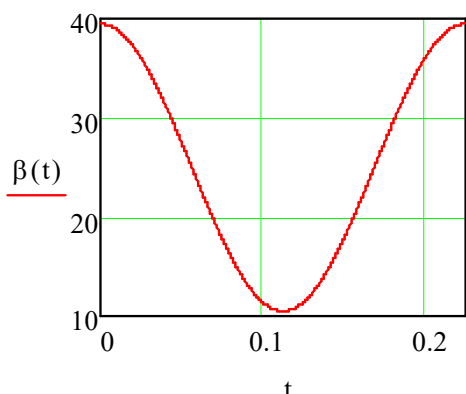


Рисунок 2.24

За один период колебаний решета угол $\beta(t)$ изменяется от 10,52 до 39,48 ° (рисунок 2.24). Углы, определяющие наклон воздушного потока γ и направление колебаний $\beta(t)$, заданы относительно молотилки комбайна.

Так как движение решета происходит по дуге окружности с радиусом l_n , то на элемент зернового вороха также действует центробежная сила инерции $F_{Ц} = m \cdot \omega_e^2 \cdot l_n$ (здесь ω_e – угловая скорость элемента, зависящая от угловой скорости подвески пальцевой решётки ω_a и \dot{x} – проекции относительной скорости элемента на ось X),

$$F_{Ц} = m \cdot \frac{[-\omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) + \dot{x} \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1)]^2}{l_n}, \quad (2.40)$$

где $\delta_1 = \delta_P + \delta_r$.

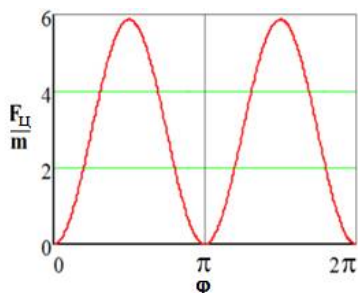


Рисунок 2.25

Зависимость величины $\frac{F_{Ц}}{m}$ от угла поворота кривошипа ($r = 0,03$ м, $\omega = 28$ рад/с, $l_n = 0,12$ м, $\dot{x} = 0$) представлена на рисунке 2.25. Силой Кориолиса ввиду малости относительной скорости элемента по гребёнке пренебрежем.

При определении параметра U_o учтём, что пальцевое решето колеблется в продольном направлении с амплитудой A_X , поэтому

$$U_o = U + \omega \cdot r \cdot \cos(\nu) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\gamma - \beta(t)) - \dot{x} \cdot \cos(\gamma - \delta_1). \quad (2.41)$$

Перемещению элемента в направлении оси Y препятствуют боковые поверхности гребёнок, а перемещению в отрицательном направлении оси X – соломозацепы на гребёнках. Отсюда принимаем коэффициенты трения при движении элемента по гребёнке: $f = 0,4$ – в положительном направлении оси X;

$f_{\text{ПР2}} = 2$ – приведённый коэффициент трения в отрицательном направлении оси X; $f_{\text{ПР3}} = 2$ – приведённый коэффициент трения в направлении оси Y.

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

$$\begin{cases} m\ddot{x} = P_{\text{ИН}} \cos(\beta(t) - \delta_1) \cos v + R_{\text{В}} \cos(\gamma - \delta_1) + F_{\text{Ц}} \sin(\beta(t) - \delta_1) \cos v + N_X \mp F_X - G \cos \alpha_K \sin \delta \\ m\ddot{y} = P_{\text{ИН}} \cos(\beta(t) - \delta_1) \sin v + F_{\text{Ц}} \sin(\beta(t) - \delta_1) \sin v \mp F_Y \mp R_{\text{ВY}} - G \sin \alpha_K \cos \delta \\ m\ddot{z} = P_{\text{ИН}} \sin(\beta(t) - \delta_1) + R_{\text{В}} \sin(\gamma - \delta_1) - F_{\text{Ц}} \cos(\beta(t) - \delta_1) + N_Z - G \cos \alpha_K \cos \delta. \end{cases} \quad (2.42)$$

Предположим, что частица начинает движение в положительном направлении оси X в момент времени t_1 , не отрываясь от поверхности гребёнки, т.е. при $t = t_1 z = 0$, $\dot{z} = 0$, $\ddot{z} = 0$, $N_Z > 0$, $N_X = 0$.

Из третьего уравнения системы уравнения (2.42) получим

$$N_Z = -P_{\text{ИН}} \sin(\beta(t) - \delta_1) - R_{\text{В}} \sin(\gamma - \delta_1) + F_{\text{Ц}} \cos(\beta(t) - \delta_1) + G \cos \alpha_K \cdot \cos \delta. \quad (2.43)$$

Принимая, что $F_X = f \cdot N_Z$, определим условие движения частицы в положительном направлении оси X

$$P_{\text{ИН}} \cos(\beta(t) - \delta_1) \cos v + R_{\text{В}} \cos(\gamma - \delta_1) + F_{\text{Ц}} \sin(\beta(t) - \delta_1) \cos v - f \cdot N_Z - G \cos \alpha_K \cdot \sin \delta \geq 0. \quad (2.44)$$

Подставив в неравенство (2.44) выражения для входящих сил при $\dot{x} = 0$, получим трансцендентное уравнение относительно времени t_1

$$\begin{aligned} & \omega^2 r \cos(\omega t_1) \cos(\beta(t_1) - \delta_1) \cos v + \\ & + k_{\text{П}} [U + \omega \cdot r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\omega t_1) \cos(\gamma - \beta(t_1))]^2 \cdot \cos(\gamma - \delta_1) + \\ & + \frac{(\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t_1))^2}{l_n} \sin(\beta(t_1) - \delta_1) \cos v - \\ & - f [-\omega^2 r \cos(\omega t_1) \sin(\beta(t_1) - \delta_1) - \\ & - k_{\text{П}} [U + \omega \cdot r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\omega t_1) \cos(\gamma - \beta(t_1))]^2 \sin(\gamma - \delta_1) + \\ & + \frac{(\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t_1))^2}{l_n} \cos(\beta(t_1) - \delta_1) + g \cdot \cos \alpha_K \cdot \cos \delta] - \\ & - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta = 0. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Определим время отрыва частицы от поверхности гребёнки. Условия отрыва частицы при $t = t_{0t} z = 0$, $\dot{z} = 0$, $\ddot{z} = 0$, $N_Z = 0$. Из третьего уравнения системы уравнений (2.42) получим

$$P_{\text{ИН}} \sin(\beta(t_{0t}) - \delta_1) + R_{\text{В}} \sin(\gamma - \delta_1) - F_{\text{Ц}} \cos(\beta(t_{0t}) - \delta_1) - G \cos \alpha_K \cos \delta = 0. \quad (2.46)$$

Относительную скорость частицы по решету \dot{x} в виду её малости не учитывали.

После преобразований получим трансцендентное уравнение

$$\begin{aligned}
& \omega^2 r \cos(\omega t_{0t}) \sin(\beta(t_{0t}) - \delta_1) + \\
& + k_{\Pi} [U + \omega \cdot r \cdot \cos(\nu) \cdot \sin(\omega t_{0t}) \cos(\gamma - \beta(t_{0t}))]^2 \sin(\gamma - \delta_1) - \\
& - \frac{(\omega \cdot r \cdot \sin(\omega t_{0t}))^2}{l_n} \cos(\beta(t_{0t}) - \delta_1) - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \cos \delta = 0 \quad (2.47)
\end{aligned}$$

Выявлено, что t_1 и t_{0t} практически не зависят от наклона в поперечном направлении (угла α_K) и направления колебаний (угла ν) пальцевой решётки. При $r = 0,03$ м, $\omega = 28 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $l_n = 0,12$ м, $U = 4,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $k_{\Pi} = 0,23 \text{ м}^{-1}$, $f = 0,4$, $\delta_1 = 10^\circ$ указанные параметры равны: $t_1 = 0,172$ с (угол поворота приводного вала ($\varphi_1 = 275,9^\circ$)) и $t_{0t} = 0,206$ с ($\varphi_0 = 329,7^\circ$). В промежутке времени от t_1 до t_{0t} элемент зернового вороха перемещается по гребёнке.

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

$$\left\{ \begin{aligned}
& \ddot{x} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos \alpha \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) \cdot \cos \nu + k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \cos(\gamma - \delta_1) + \frac{F_{\Pi}}{m} \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) \cdot \cos \nu \mp \\
& \mp f(f_{\Pi P2}) \cdot \frac{N_Z}{m} \cdot \cos(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) - g \cdot \cos \alpha_K \cdot \sin \delta \\
& \ddot{y} = \omega^2 \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) \cdot \sin \nu + \frac{F_{\Pi}}{m} \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) \cdot \sin \nu \mp \\
& \mp f_{\Pi P3} \cdot \frac{N_Z}{m} \cdot \sin(\arctg \frac{\dot{y}}{\dot{x}}) \mp k_{\Pi} \cdot (\omega \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin \nu + \dot{y})^2 - g \cdot \sin \alpha_K \cdot \cos \delta \\
& \frac{N_Z}{m} = -\omega^2 \cdot r \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\beta(t) - \delta_1) - k_{\Pi} \cdot U_0^2 \cdot \sin(\gamma - \delta_1) + \frac{F_{\Pi}}{m} \cdot \cos(\beta(t) - \delta_1) + g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta.
\end{aligned} \right. \quad (2.48)$$

Относительное движение элемента зернового вороха в воздушном потоке после отрыва от пальцевой решётки описывается системой уравнений (2.33).

Решение систем дифференциальных уравнений (2.33) и (2.48) выполнили численным методом Рунге-Кутты, реализованном в программе Mathcad в виде функции rkfixed. Время соударения элемента вороха с пальцевой решёткой определяли по графикам перемещений по оси Z_K элемента вороха и пальцевой решёткой с помощью функции Trase (рисунок 2.26).

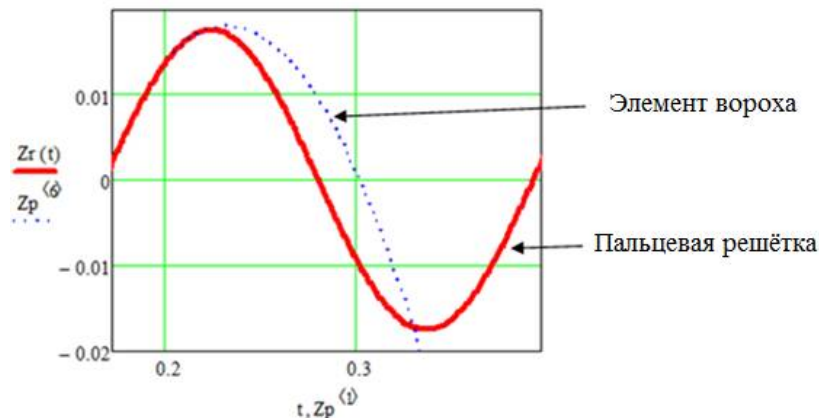


Рисунок 2.26 – Определение времени соударения элемента с решетом

Поперечную V_{YCP} и продольную V_{XCP} – составляющие средней скорости элемента вороха определяли по его перемещению относительно решета за один период колебаний. Направление вороха относительно оси X определяли по углу $\varepsilon_{CP} = \arctg(V_{YCP}/V_{XCP})$. Расчёт проведён при детерминированном значении $k_{II} = 0,23$.

На рисунке 2.27 приведены результаты расчёта средней скорости зернового вороха в продольном направлении. Отрицательные значения угла наклона комбайна обозначают движение его вверх по склону, положительные – вниз.

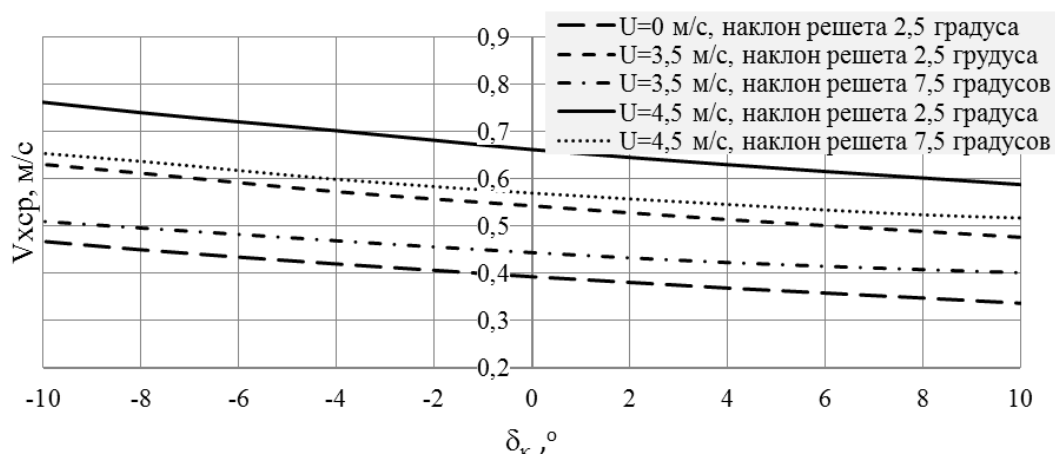


Рисунок 2.27 – Скорость зернового вороха по пальцевому решету в продольном направлении в зависимости от продольного наклона молотилки и скорости воздушного потока (отрицательные значения углов – движение комбайна вверх по склону)

С увеличением угла продольного наклона средняя скорость зернового вороха уменьшается, причём большое влияние оказывает воздушный поток. При отсутствии воздушного потока скорость зернового вороха при наклоне молотилки комбайна в продольном направлении в рассматриваемом диапазоне изменяется от 0,34 до 0,47 м/с. Изменение угла продольного наклона пальцевой решётки на 5° незначительно изменяет относительную среднюю скорость зернового вороха.

Изменение угла продольного наклона молотилки при движении комбайна вверх по склону от 0 до 10° приводит к увеличению скорости зернового вороха ($U=3,5$ м/с и $\delta_r=7,5^\circ$) от 0,44 до 0,51 м/с, т. е. скорость увеличивается на 15,9%. Изменение угла продольного наклона молотилки при движении комбайна вниз по склону от 0 до 10° приводит к изменению скорости зернового вороха при тех же условиях от 0,44 до 0,40 м/с, т. е. скорость снижается на 9,1%.

Изменение направления колебаний решета способствует перемещению зернового вороха в поперечном направлении. Параметры движения зернового вороха при направлении колебаний решета $\nu = 45^\circ$ в зависимости от скорости воздушного потока приведены на рисунке 2.28. При $U=0$ м/с скорость слоя вороха в продольном направлении за одно колебание решета (V_{XCP}) немного больше скорости в поперечном направлении (V_{YCP}), а угол $\varepsilon_{CP} = 42,2^\circ$.

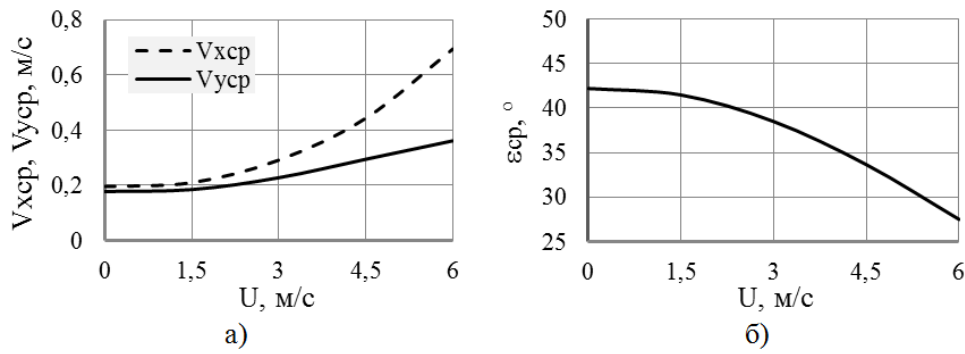


Рисунок 2.28 – Параметры движения зернового вороха в зависимости от скорости воздушного потока ($\alpha_K = 0^\circ$)

Увеличение скорости воздушного потока приводит к увеличению составляющих средней скорости вороха, причём в большей мере – в продольном направлении. При скорости воздушного потока $U=4,5$ м/с – $V_{xcp} = 0,44$ м/с, $V_{ycp} = 0,30$ м/с, а относительные перемещения элемента зернового вороха по решетку в продольном и поперечном направлениях за одно колебание решета соответственно равны 0,100 и 0,066 м (угол $\varepsilon_{cp} = 33,6^\circ$).

На рисунке 2.29 приведены результаты расчёта движения элемента зернового вороха при различных углах поперечного наклона молотилки.

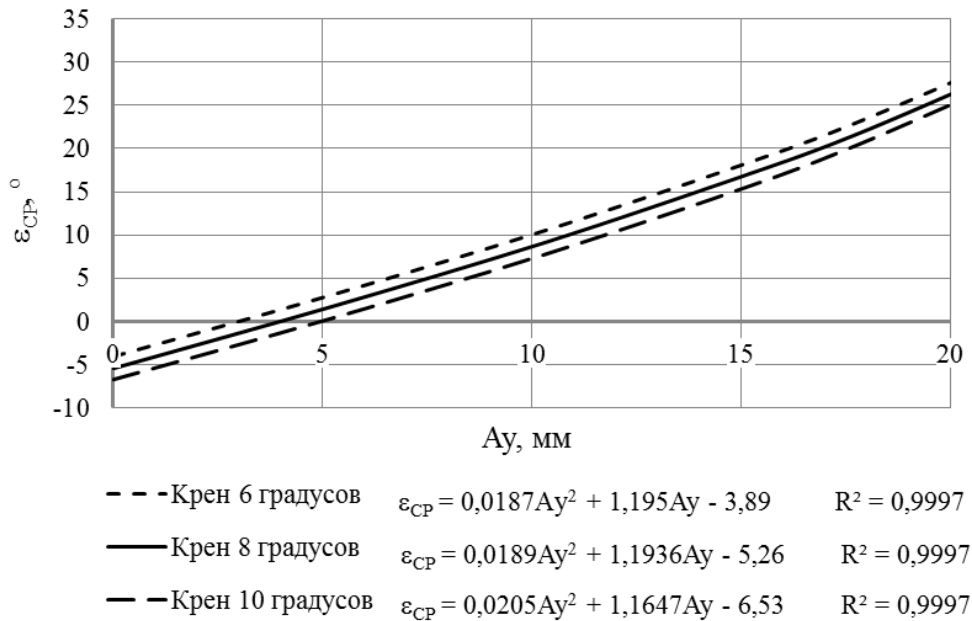


Рисунок 2.29 – График зависимости ε_{cp} от амплитуды колебаний решета в поперечном направлении и угла поперечного наклона молотилки

Определены параметры колебаний решета в поперечном направлении, при которых зерновой ворох, контактирующий с гребёнками решета, не смещается в сторону уклона: $\alpha_K = 6^\circ - v \geq 5,5^\circ$, $A_y \geq 0,003$ м; $\alpha_K = 8^\circ - v \geq 7,5^\circ$, $A_y \geq 0,004$ м; $\alpha_K = 10^\circ - v \geq 9,5^\circ$, $A_y \geq 0,005$ м.

Глава 3. СЕПАРАЦИЯ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ КОМБАЙНА НА СКЛОНАХ

3.1 Распределение зернового вороха на грохоте системы очистки при поперечном наклоне молотилки

Предположим, что вследствие текучести зернового вороха его поверхность на стрясной доске и верхнем решете горизонтальна при любом поперечном крене комбайна; наклон грохота относительно молотилки не изменяется; при отсутствии поперечного крена молотилки сечение зернового вороха представляет собой прямоугольник (рисунок 3.1); толщина слоя зернового вороха, поступающего на верхнее решето, прямо пропорциональна подаче q_B .

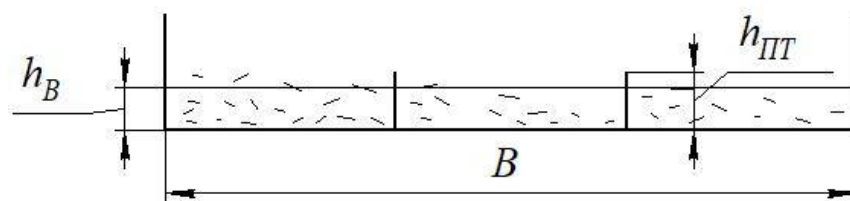


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение зернового вороха ($h_{ПТ}$ – высота продольной перегородки или гребёнки)

Так как объёмная масса зернового вороха на верхнем решете является переменной величиной, а толщина слоя зависит, прежде всего, от содержания солоистой фракции, поэтому толщину слоя определим по формуле

$$h_B = \frac{q_C}{V_{ХСР} \cdot B \cdot \gamma_C}, \quad (3.1)$$

где q_C – подача солоистой фракции зернового вороха; B – ширина рабочего органа (стрясной доски или верхнего решета); γ_C – объёмная масса солоистой фракции зернового вороха.

Площадь поперечного сечения зернового вороха $F_B = B \cdot h_B$.

Обозначим символом $m_{П}$ количество продольных перегородок на рабочем органе. Предположим, что при поперечном крене молотилки на угол α зерновой ворох поступает на рабочий орган равномерным слоем. Выделим объём зернового вороха, перемещающегося в продольном направлении за один период колебаний решета на расстояние Δx

$$\Delta Q = B \cdot h_B \cdot \Delta x = B \cdot h_B \cdot V_{ХСР} \cdot T. \quad (3.2)$$

При поперечном крене молотилки зерновой ворох объёмом ΔQ переместится в поперечном направлении на величину $\Delta y = V_{ХСР} \cdot T$.

Разобьём ширину рабочего органа на n_1 участков, причём $n_1 = B / \Delta y$. Боковые стенки верхнего стана (или стрясной доски) ограничивают движение зернового вороха в поперечном направлении, поэтому участки у нижней боко-

вой стенки увеличатся на элементарный объём $\Delta Q' = \Delta x \cdot \Delta y \cdot h_B = \Delta x \cdot \Delta S$ (здесь ΔS – площадь поперечного сечения элементарного объёма), а верхние участки уменьшатся на указанный объём. Принимая, что верхняя граница зернового вороха горизонтальна, поперечное сечение элементарного объёма, переместившегося по рабочему органу в сторону уклона, преобразуется в прямоугольный треугольник со сторонами Δb_1 и Δh (рисунок 3.2).

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

$$\Delta b_p = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot \Delta S}{\operatorname{tg} \alpha}}. \quad (3.3)$$

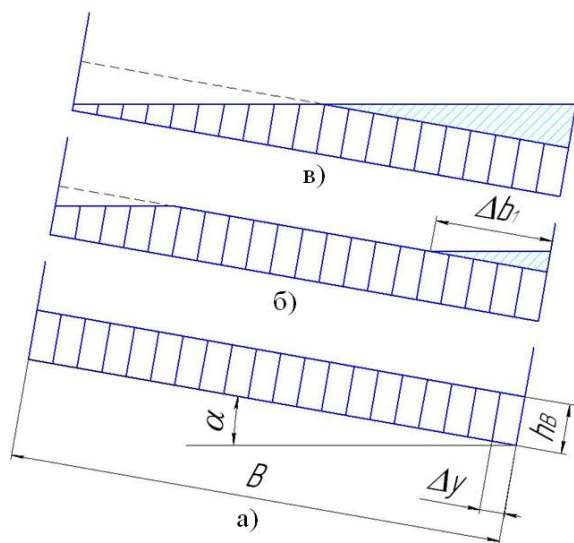


Рисунок 3.2 – Сечение зернового вороха при поперечном наклоне стрясной доски или верхнего решета: а – начальное; б – после одного колебания; в – конечное

Перемещение зернового вороха по решету в сторону уклона будет происходить до тех пор, пока его поверхность не займёт горизонтальное положение, т. е. пока не выполнится условие $\Delta b_p \geq B/2$.

Сечение зернового вороха может принимать вид трапеции или треугольника (если достаточно большая ширина и угол наклона рабочего органа или небольшая толщина зернового вороха).

Описанные положения также относятся к распределению зернового вороха в секции решета или стрясной доски, ограниченной продольными перегородками.

Приняв $\Delta b_p = B/2$, получим количество периодов колебаний рабочего органа, при котором поперечное сечение зернового вороха принимает конечную форму

$$p_k = \frac{B^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{8 \cdot \Delta S}$$

и после преобразований

$$p_k = \frac{B^2 \cdot \omega \cdot \operatorname{tg} \alpha}{16 \cdot \pi \cdot V_{YCP} \cdot h_B}. \quad (3.4)$$

Длина участка рабочего органа X_P , на котором происходит смещение зернового вороха, зависит от продольной скорости элемента слоя, от циклической частоты и количества периодов колебаний, т.е.

$$X_P = \Delta x \cdot p_k = V_{XCP} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \cdot p_k \quad (3.5)$$

Учитывая, что $V_{YCP} / V_{XCP} = \operatorname{tg} \varepsilon$, получим [116]

$$X_P = \frac{B^2}{8 \cdot h_B} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varepsilon}, \quad (3.6)$$

т.е. длина участка рабочего органа, на котором происходит смещение зернового вороха в сторону уклона, зависит от ширины рабочего органа (или его секции), поперечного крена молотилки, угла отклонения вектора скорости зернового вороха от продольной оси комбайна и толщины слоя зернового вороха.

Как показано ранее, с увеличением угла α угол ε также увеличивается, причём отношение $\operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \varepsilon$ практически не изменяется.

При отсутствии на решетке продольных перегородок зерновой ворох смещается в сторону уклона практически по всей длине решета (рисунок 3.3). Установка на рабочем органе продольных перегородок способствует более быстрому переходу зернового вороха в установившееся состояние, при котором форма его поперечного сечения не изменяется.

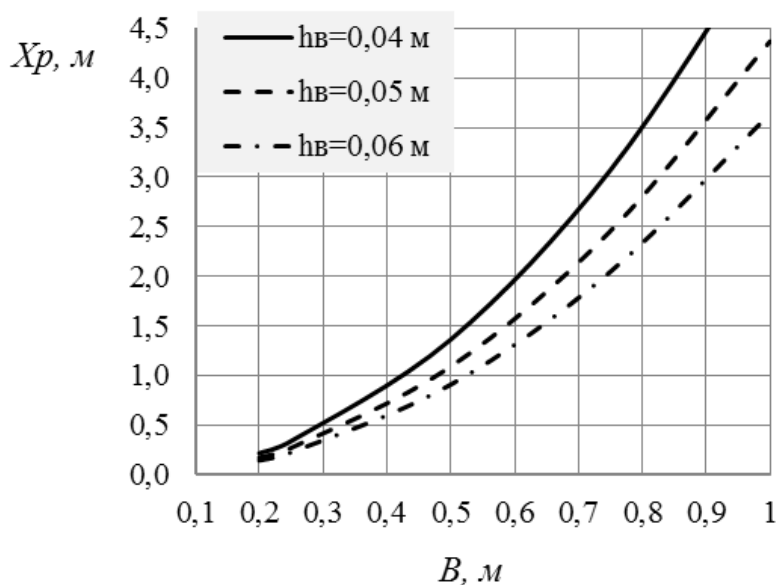


Рисунок 3.3 – Параметры смещения зернового вороха в сторону уклона ($\alpha_K = 8^\circ$, $U = 3,5 \text{ м/с}$, $\varepsilon = 4,6^\circ$)

Оценку неравномерности распределения зернового вороха по ширине очистки выполним с помощью относительного параметра – коэффициента вариации.

3.2 Методика определения коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха

Толщина зернового вороха прямо пропорциональна его подаче, поэтому значение коэффициента вариации неизменно при его расчёте, как по подаче зернового вороха, так и по его толщине, т.е. $V = V_h$ (здесь V_h – коэффициент вариации толщины зернового вороха по ширине решета).

$$V = \frac{\sigma_q}{q_B} = \frac{\sigma_h}{h_B}, \quad (3.7)$$

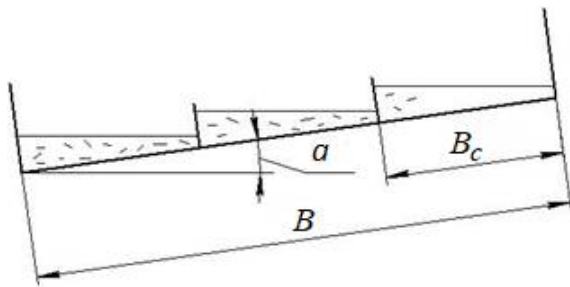
где σ_q – среднеквадратическое отклонение подачи зернового вороха по ширине очистки; q_B – подача зернового вороха на очистку; σ_h – среднеквадратическое отклонение толщины слоя зернового вороха.

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_B)^2}{n-1}}, \quad (3.8)$$

где h_i – толщина зернового вороха на i -ом участке стрясной доски или верхнего решета; n – количество участков по ширине стрясной доски или верхнего решета, на которых определяется толщина слоя вороха.

В зависимости от угла поперечного наклона грохота α зерновой ворох в секции может находиться в нескольких состояниях (рисунок 3.4) [108, 117]:

- 1) зерновой ворох остается в секции, поперечное сечение имеет вид:
 - а) трапеции; б) треугольника;
- 2) часть вороха переваливается через перегородку, поперечное сечение вороха имеет вид: а) трапеции; б) треугольника.



Допущение, что поперечное сечение зернового вороха в системе очистки при поперечном крене комбайна имеет вид трапеции, также принято Д.И. Уркибаевым [132].

Рисунок 3.4 – Поперечное сечение зернового вороха при наклоне грохота на угол α (B_C – ширина секции)

Ширина секции B_C равна

$$B_C = \frac{B}{k_C}, \quad (3.9)$$

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

Площадь поперечного сечения вороха в секции при отсутствии крена определим по формуле

$$F_C = \frac{F_B}{k_C} = B_C \cdot h_B . \quad (3.10)$$

Определим условия, при которых зерновой ворох распределяется в секции решета по трапеции или треугольнику (рисунок 3.5).

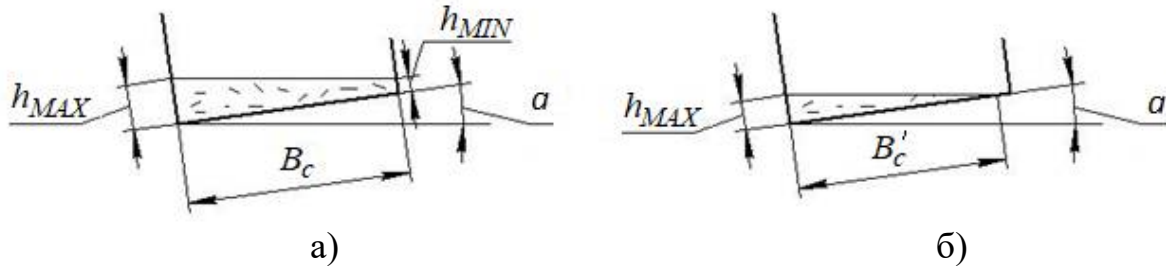


Рисунок 3.5 – Схема к определению вида распределения зернового вороха в секции:
а – распределение по трапеции; б – по треугольнику

При распределении по трапеции (рисунок 3.5, а)

$$F_C = \frac{h_{MAX} + h_{MIN}}{2} \cdot B_C , \quad (3.11)$$

где h_{MAX} , h_{MIN} – соответственно максимальная и минимальная толщина вороха в секции.

$$\text{Выразим} \quad h_{MIN} = h_{MAX} - B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (3.12)$$

Из выражения (3.12) получим, что распределение вороха по треугольнику будет в случае, когда $h_{MIN} \leq 0$ (рисунок 3.5, б), при этом

$$h_{MAX} \leq B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha , \quad (3.13)$$

а площадь поперечного сечения вороха в секции равна

$$F_C = \frac{h_{MAX}^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} . \quad (3.14)$$

Подставив h_{MIN} из выражения (3.12) в выражение (3.11), получим площадь поперечного сечения вороха, распределенного по трапеции

$$F_C = B_C \cdot h_{MAX} - 0,5 B_C^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (3.15)$$

Определим предельный угол α_{II} , при котором ворох не перемещается в другую секцию. При этом выполняется условие $h_{MAX} = h_{III}$.

При распределении вороха по трапеции получим:

$$\frac{h_B \cdot B}{k_C} = B_C \cdot h_{III} - 0,5 B_C^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{II} , \quad (3.16)$$

после преобразований

$$\alpha_{II} = \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot k_C \cdot (h_{III} - h_B)}{B} \right] . \quad (3.17)$$

При распределении вороха по треугольнику после преобразований

$$\alpha_{II} = \arctg \left[\frac{k_C \cdot h_{II}^2}{2 \cdot h_B \cdot B} \right]. \quad (3.18)$$

Если наклон рабочего органа меньше предельного угла, то ворох не перемещается в другие секции, при этом он может быть распределен в секциях по трапеции (случай 1, а) или по треугольнику (случай 1, б).

Максимальную высоту зернового вороха, поперечное сечение которого имеет вид трапеции, определим из формулы (3.15)

$$h_{MAX} = \frac{F_C}{B_C} + 0,5 \cdot B_C \cdot tg \alpha. \quad (3.19)$$

Максимальную высоту вороха в секции при распределении его по треугольнику определим из формулы (3.14)

$$h_{MAX} = \sqrt{2 \cdot F_C \cdot tg \alpha}. \quad (3.20)$$

Если $\alpha > \alpha_{II}$, то часть вороха переходит в другую секцию. Предположим, что ворох из секций переместится в крайнюю, заполнит её, затем заполнит следующую и т. д. (рисунок 3.6).

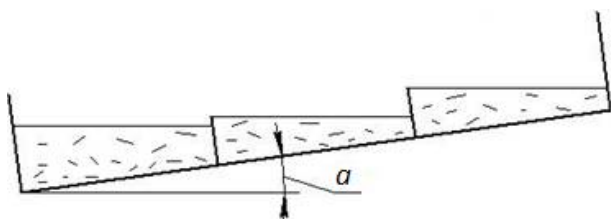


Рисунок 3.6 – Поперечное сечение зернового вороха при $\alpha > \alpha_{II}$

В зависимости от угла α , подачи вороха и содержания в нём соломистой фракции, количества и высоты перегородок также возможно распределение вороха по треугольнику или трапеции.

Вид распределения в секциях определим по условию

$$B_C' = h_{II} / tg \alpha \leq B_C. \quad (3.21)$$

Если выполняется условие $B_C' \leq B_C$, то распределение зернового вороха в секции по треугольнику, если нет – то по трапеции.

При распределении зернового вороха по треугольнику площадь поперечного сечения вороха в секции, с учетом формулы (3.14), равна

$$F_C'' = \frac{h_{II}^2}{2 \cdot tg \alpha}, \quad (3.22)$$

при распределении по трапеции

$$F_C'' = B_C \cdot h_{II} - 0,5 B_C^2 \cdot tg \alpha. \quad (3.23)$$

Площадь поперечного сечения в крайней, наиболее загруженной секции, определим как сумму площади вороха, который остался в этой секции, и площади всех остатков вороха, который не вошел в остальные секции, т. е.

$$F_K = F_C + \sum_{j=1}^{k_C-1} (F_C - F_C''). \quad (3.24)$$

Как показали априорные исследования, для современных зерноуборочных комбайнов ворох в этой секции распределяется при крене до 10° по трапеции. При этом необходимо проверить условие полного заполнения секции:

$$h_{MINK} \leq h_{ПТ} . \quad (3.25)$$

В соответствии с формулами (3.11) и (3.12) получим:

$$\begin{aligned} F_K &= \frac{h_{MAXK} + h_{MINK}}{2} \cdot B_C , \\ h_{MAXK} &= h_{MINK} + B_C \cdot tg\alpha , \\ h_{MINK} &= \frac{F_K}{B_C} - 0,5 \cdot B_C \cdot tg\alpha . \end{aligned} \quad (3.26)$$

Если $h_{MINK} > h_{ПТ}$, то часть вороха остается в предпоследней секции, причем последняя и предпоследняя секции загружаются вместе (рисунок 3.7).

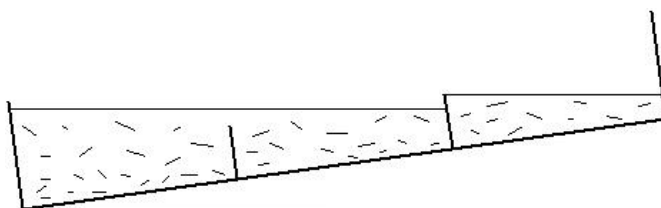


Рисунок 3.7

Для этого случая

$$F_{K2} = 2 \cdot F_C + \sum_{j=1}^{k_C-2} (F_C - F_C''), \quad (3.27)$$

$$h_{MAX2} = \frac{F_{K2}}{2 \cdot B_C} + B_C \cdot tg\alpha . \quad (3.28)$$

Ширина участка, на котором производится расчет толщины вороха, равна

$$B_U = \frac{B}{n} . \quad (3.29)$$

Определим значения h_i для каждого вида распределения вороха.

Вид 1, а – ворох не перераспределяется по секциям, в секциях ворох распределен по трапеции, т. е. выполняются условия $\alpha < \alpha_{ПТ}$, $h_{MIN} > 0$.

В этом случае $h_{MAX1} = h_{MAX2} = \dots = h_{MAXN} < h_{ПТ}$.

Таким образом, для различного числа секций k_C и при условии

$$(d-1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C ,$$

где

$$L_i = (i-0,5) \cdot L_U ,$$

$$h_i = h_{MAX} - ((i-0,5) \cdot L_U - (d-1) \cdot B_C) \cdot tg\alpha , \quad (3.30)$$

при этом $d \in [1..k]$, здесь d – номер секции; h_{MAX} – определена по формуле (3.19).

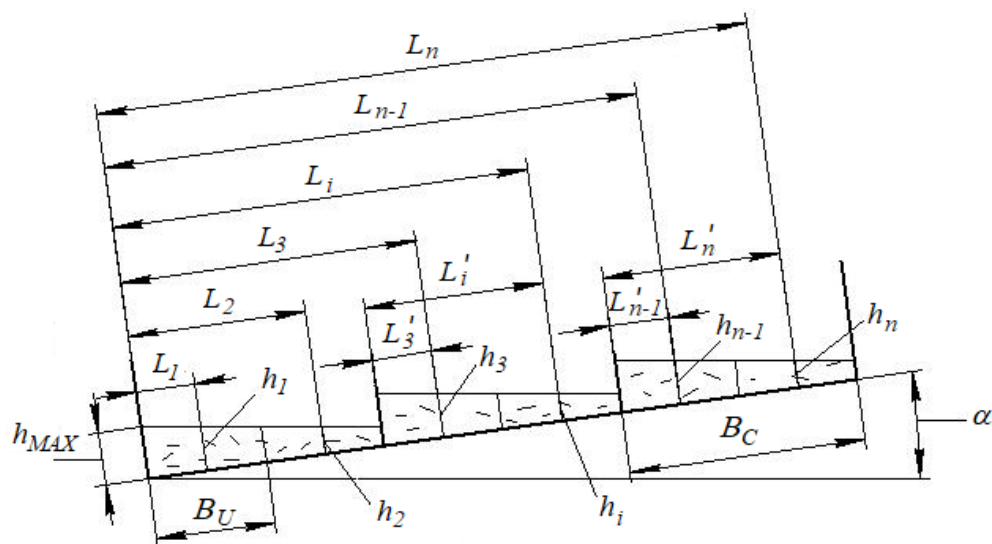


Рисунок 3.8 – Схема по определению h_i для распределения вороха вида 1, а

Вид 1, б – ворох не перераспределяется по секциям, в секции ворох распределен по треугольнику, т. е. $\alpha < \alpha_{II}$, $h_{MIN} \leq 0$.

В этом случае значение h_i определяется так же, как и в предыдущем случае (по формуле (3.30)), а значение h_{MAX} – по формуле (3.20). Если $h_i < 0$, то следует принять $h_i = 0$.

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

Данный случай характеризуется следующими условиями и зависимостями:

а) $\alpha > \alpha_{II}$ (формула 3.17);

б) $h_{MIN} > 0$;

в) минимальная высота в крайней секции меньше высоты перегородок, т.е.

$$h_{MINK} \leq h_{IT},$$

где высота h_{MINK} определена по формуле (3.26);

г) максимальная высота вороха в крайней секции определяется в соответствии с формулой (3.14)

$$h_{MAXK} = \frac{F_K}{B_C} + \frac{B_C}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.31)$$

где F_K – определяется по формуле (3.24);

д) значение ΔF_C определяется по формуле

$$\Delta F_C = F_C - F_C'', \quad (3.32)$$

где F_C определяется по формуле (3.14), а F_C'' – по формуле (3.23);

е) значение h_{MAX} в остальных секциях равно высоте перегородок, т. е.

$$h_{MAX} = h_{ПТ}.$$

В соответствии с указанными особенностями значения h_i , в первой секции при условии $0 < L_i \leq B_C$, здесь $L_i = (i - 0,5) \cdot L_U$,

равны

$$h_i = h_{MAXK} - [(i - 0,5) \cdot L_U] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.33)$$

а для остальных секций при выполнении условий

$$2 \leq d \leq k, (d - 1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C, L_i = (i - 0,5) \cdot L_U$$

равны

$$h_i = h_{ПТ} - [(i - 0,5) \cdot L_U - (d - 1) \cdot B_C] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.34)$$

Разновидность случая 2, а (2) – минимальная высота в крайней секции больше высоты перегородок, т. е. когда две крайние секции загружены ворохом вместе, остальные секции загружены по трапеции. Распределение вороха характеризуется следующими условиями:

а) $\alpha > \alpha_{П}$;

б) $h_{MIN} > 0$;

в) $h_{MINK} > h_{ПТ}$,

где h_{MINK} определяется по формуле (3.26);

г) максимальная высота в крайних секциях

$$h_{MAXK2} = \frac{F_{K2}}{2 \cdot B_C} + B_C \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.35)$$

где F_{K2} определяется по формуле (3.27);

д) значение ΔF_C определяется так же, как в виде 2, а;

е) значение $h_{MAX} = h_{ПТ}$;

Значения h_i в первых двух секциях, т. е. при условии

$$0 < L_i \leq 2 \cdot B_C,$$

где $L_i = (i - 0,5) \cdot L_U$,

равны

$$h_i = h_{MAXK2} - [(i - 0,5) \cdot L_U] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.36)$$

для остальных секций, т. е. при условиях

$$3 \leq d \leq k,$$

$$(d - 1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C,$$

$$L_i = (i - 0,5) \cdot L_U,$$

равны

$$h_i = h_{ПТ} - [(i - 0,5) \cdot L_U - (d - 1) \cdot B_C] \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.37)$$

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

Рассматриваемый случай характеризуется следующими условиями и зависимостями:

а) $\alpha > \alpha_{П}$;

б) $h_{MIN} \leq 0$;

в) минимальная высота в крайней секции меньше высоты перегородок,

т. е.

$$h_{MINK} \leq h_{ПТ},$$

где h_{MINK} определяется по формуле (3.26);

г) максимальная высота вороха в крайней секции определяется по формуле

$$h_{MAXK} = \frac{F_K}{B_C} + \frac{B_C}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.38)$$

где F_K определяется по формуле (3.24);

д) значение ΔF_C определяется по формуле $\Delta F_C = F_C - F_C''$,

где F_C определяется по формуле (3.14), а F_C'' – по формуле (3.22);

е) значение h_{MAX} в остальных секциях равно высоте перегородок, т. е. $h_{MAX} = h_{ПТ}$;

ж) если $h_i < 0$, то принимаем $h_i = 0$;

В соответствии с указанными условиями значения h_i в первой секции, т. е. при выполнении условия

$$0 < L_i \leq B_C, \quad \text{здесь } L_i = (i-0,5) \cdot L_U,$$

равны

$$h_i = h_{MAXK} - [(i-0,5) \cdot L_U] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.39)$$

а для остальных секций, т. е. при условии $2 \leq d \leq k$,

$$(d-1) \cdot B_C < L_i \leq d \cdot B_C, \quad h_i = (i-0,5) \cdot L_U,$$

$$h_i = h_{ПТ} - [(i-0,5) \cdot L_U - (d-1) \cdot B_C] \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.40)$$

причем, если $h_i < 0$, принимаем $h_i = 0$.

Разработанная методика определения коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха применена при оценке распределения зернового вороха на стрясной доске и решетках системы очистки при поперечном крене молотилки комбайна и в математической модели сепарации зернового вороха.

3.3 Математическая модель сепарации зернового вороха

Модель сепарации зернового вороха в системе очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах, должна учитывать неравномерность распределения зернового вороха на верхнем решете. Поэтому за основу разрабатываемой модели принята зависимость, предложенная Н.И. Косиловым и М.Р. Думанским [53] (формула 1.36).

Предположим, зерновой ворох в начале и в конце верхнего решета имеет одинаковое распределение по ширине очистки, например, за счёт установки продольных перегородок по всей длине грохота. В этом случае коэффициенты вариации толщины слоя вороха в начале и в конце решета будут одинаковыми

или отличаться друг от друга незначительно, а модель сепарации можно представить в виде [117]

$$P=100 \cdot \exp(-L_p \mu_{pe}^{-k_1 V_h^{k_2}}) \quad (\%), \quad (3.41)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты.

Установлено, что модель сепарации (3.41) достаточно точно описывает сепарацию зернового вороха при поперечном наклоне молотилки и незначительно отличающихся друг от друга коэффициентах вариации толщины слоя в начале и в конце решета. Значения коэффициентов $k_1 = 1,15, k_2 = 1,3$ [117]. Однако данная модель не позволяет оценить работу системы очистки, если неравномерность распределения зернового вороха на различных участках верхнего решета разная. Например, в начале решета коэффициент вариации равен 0,431 (рисунок 1.4), а в конце решета, за счёт выравнивания зернового вороха, 0,146 [122].

Принимая технологические параметры системы очистки при работе комбайна на склоне постоянными за определённый промежуток времени, в поведении зернового вороха можно выделить две фазы: первая – неустановившееся вынужденное движение, режим – динамический нестационарный, $V_h \neq const$; вторая – движение зернового вороха – установившееся вынужденное, режим – динамический стационарный, $V_h = const$.

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

$$\Delta V_{h1} = (V_{hn} - V_{hx}) / z, \quad (3.42)$$

где z – количество периодов колебаний решета при перемещении зернового вороха на расстояние X_m (или X_p), $z = \text{round}(X_m / \Delta x)$,

а при перемещении от промежуточного сечения к конечному

$$\Delta V_{h2} = (V_{hx} - V_{hk}) / (k - z), \quad (3.43)$$

где k – количество периодов колебаний решета, при котором зерновой ворох находится на его поверхности, $k = \text{round}(L_p/\Delta x)$.

Вследствие того, при скорости зернового вороха по решету 0,43 м/с и периоде колебаний $T = 0,224$ с параметр $\Delta x = 0,096$ м, принимаем $\Delta x = 0,1$ м. Тогда длина решета в большинстве случаев будет кратна Δx , а параметр k (целое число) – характеризует количество участков, на которых определены значения коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха.

Модель сепарации зернового вороха при известных дискретных коэффициентах вариации толщины слоя зернового вороха на любом участке решета имеет вид [116]:

$$P = 100 \cdot \prod_{i=0}^k (\exp(-\mu_P \cdot \Delta x \cdot e^{-\begin{cases} V_{hn} + \Delta V_{h1}(-i) & \text{если } i \leq z \\ V_{hx} + \Delta V_{h2} \cdot (z-i) & \text{если } i > z \end{cases}})). \quad (3.44)$$

Если зерновой ворох смещается в сторону уклона по всей длине верхнего решета, причём известны коэффициенты вариации зернового вороха в начале и в конце решета, то математическая модель (3.44) имеет следующий вид:

$$P = 100 \cdot \prod_{i=0}^k (\exp(-\mu_P \cdot \Delta x \cdot e^{-(V_{hn} - \Delta V_h \cdot i)})), \quad (3.45)$$

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

Коэффициент сепарации зернового вороха определим с учётом коэффициента сепарации эталонной (базовой) системы очистки (в соответствии с работами И.Ф. Василенко [20] и В.К. Максимчука [64])

$$\mu_P = \mu_{P0} \cdot \left(\frac{h_{B0}}{h_B} \right)^c, \quad (3.46)$$

где μ_{P0} , h_{B0} – соответственно эталонные коэффициент сепарации зерна и толщина слоя зернового вороха; c – коэффициент, характеризующий условия работы системы очистки.

Параметр μ_{P0} целесообразно определять по результатам испытаний базового комбайна на горизонтальном участке при номинальной подаче зернового вороха. Например, для комбайна третьего класса, имеющего $L_p = 1,3$ м при $q_B = 2,9$ кг/с, $C = 30$ % (регулируемые параметры приведены в пп 3.6), потери зерна составили 0,13 %, а эталонный коэффициент сепарации зерна

$$\mu_{P0} = -\frac{1}{L_p} \ln \frac{P}{100} = -\frac{1}{1,3} \ln \frac{0,13}{100} = 5,1 \text{ м}^{-1}. \quad (3.47)$$

Анализ результатов экспериментальных данных, полученных при исследовании системы очистки при поперечном наклоне, показал, что коэффициент c в формуле (3.46) также зависит от соотношения толщины слоя зернового вороха при рассматриваемой подаче и эталонной толщины слоя вороха

$$c = \left(\frac{h_B}{h_{B0}} \right)^{\frac{h_{B0}}{h_B}}. \quad (3.48)$$

При известном значении потерь зерна за системой очистки на горизонтальной поверхности при определённой подаче зернового вороха коэффициент сепарации зерна также можно определить по формуле (3.47), в этом случае установленное значение – эталонный коэффициент сепарации, а значение коэффициента $c = 1$.

Разработанная математическая модель сепарации зернового вороха позволяет оценивать функционирование системы очистки при неравномерном распределении зернового вороха на верхнем решете при работе зерноуборочного комбайна на склонах, а также работу выравнивающих устройств.

3.4 Реализация математической модели сепарации зернового вороха в программах для ЭВМ

Предложенная методика расчёта коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха V_h реализована в программе для ЭВМ «Расчет параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна» (Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015610315, авторы Сороченко С.Ф., Самойлов С.С.).

Программируемый язык – Java, среда разработки Net Beans 8.0.1. Исходными данными являются конструктивные и технологические параметры молотилки и системы очистки, в том числе подача хлебной массы, высота и количество продольных перегородок, длина и ширина верхнего решета, угол поперечного наклона молотилки, скорость зернового вороха, коэффициенты, характеризующие работу МСУ, и коэффициент сепарации зернового вороха. Выходные данные: толщина и коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха; потери зерна; вид распределения зернового вороха. Программа выводит графики зависимостей коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха и потерь зерна от подачи хлебной массы в комбайн, длины верхнего решета, количества и высоты продольных перегородок, угла поперечного наклона [98].

На рисунке 3.9, *а* представлено диалоговое окно ввода исходных данных и вывода результатов расчёта в виде графика зависимости $F=f(\alpha)$, на рисунке 3.9, *б* – фрагмент диалогового окна. Расчёт потерь зерна в программе производится по формуле (3.41), т.е. программа оценивает работу системы очистки при одинаковом (или отличающихся незначительно) распределении зернового вороха в начале и в конце решета. Программа позволяет получить распределение зернового вороха на стрясной доске или на верхнем решете (вводом соответствующих исходных данных).

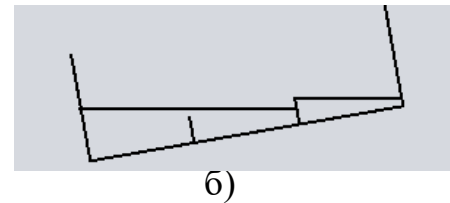
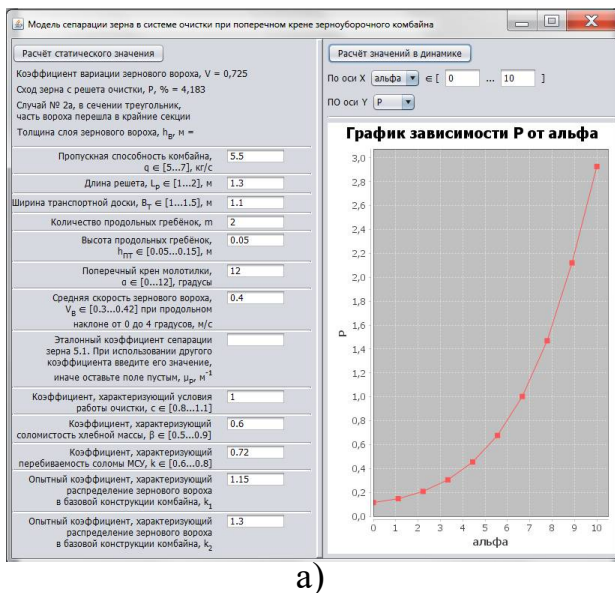


Рисунок 3.9 – Интерфейс программы: а) диалоговое окно; б) фрагмент окна с визуализацией распределения зернового вороха

Для оценки выравнивающих устройств, устанавливаемых на некотором удалении от начала верхнего решета, а также для оценки работы системы очистки с отличающимися значениями коэффициентов вариации зернового вороха в начале решета, на удалении X_m (или X_p) и в конце решета, следует применять математическую модель сепарации (3.44) или (3.45).

Для реализации математической модели сепарации при указанных условиях в среде Mathcad разработана программа для ЭВМ «Математическая модель сепарации зернового вороха» (Приложение А).

Исходными данными являются технологические и конструктивные параметры системы очистки, а также коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха в начале, в конце верхнего решета и при наличии выравнивающего устройства – на удалении X_m от начала решета. Программа также позволяет оценить потери зерна за системой очистки при отсутствии выравнивающих устройств, но при неравномерном распределении зернового вороха на верхнем решете (вводом параметра X_p). В программе рассчитывается коэффициент сепарации зернового вороха, определяется количество участков для расчёта, величина изменения коэффициента вариации на участках. Потери зерна рассчитываются по модели сепарации зернового вороха (формулы 3.44 или 3.45) в зависимости от значения параметра X_m или X_p . Программа также выводит график изменения коэффициента вариации толщины слоя зернового вороха по длине решета.

3.5 Анализ работы системы очистки при поперечном наклоне молотилки с использованием модели сепарации зернового вороха

Как было отмечено ранее, продольные перегородки, установленные на стрясной доске и верхнем решете, должны предотвращать смещение зернового вороха в сторону уклона. Предположим, что зерновой ворох поступает на

стрясную доску из МСУ и СГВ равномерно. Анализ работы системы очистки, выполненный с помощью программы «Расчет параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна», показал, что при подаче зернового вороха 2,9 кг/с (подача хлебной массы в молотилку равна 5,0 кг/с) увеличение количества продольных гребёнок, имеющих высоту 0,05 м, не приводит к улучшению работы системы очистки (рисунок 3.10).

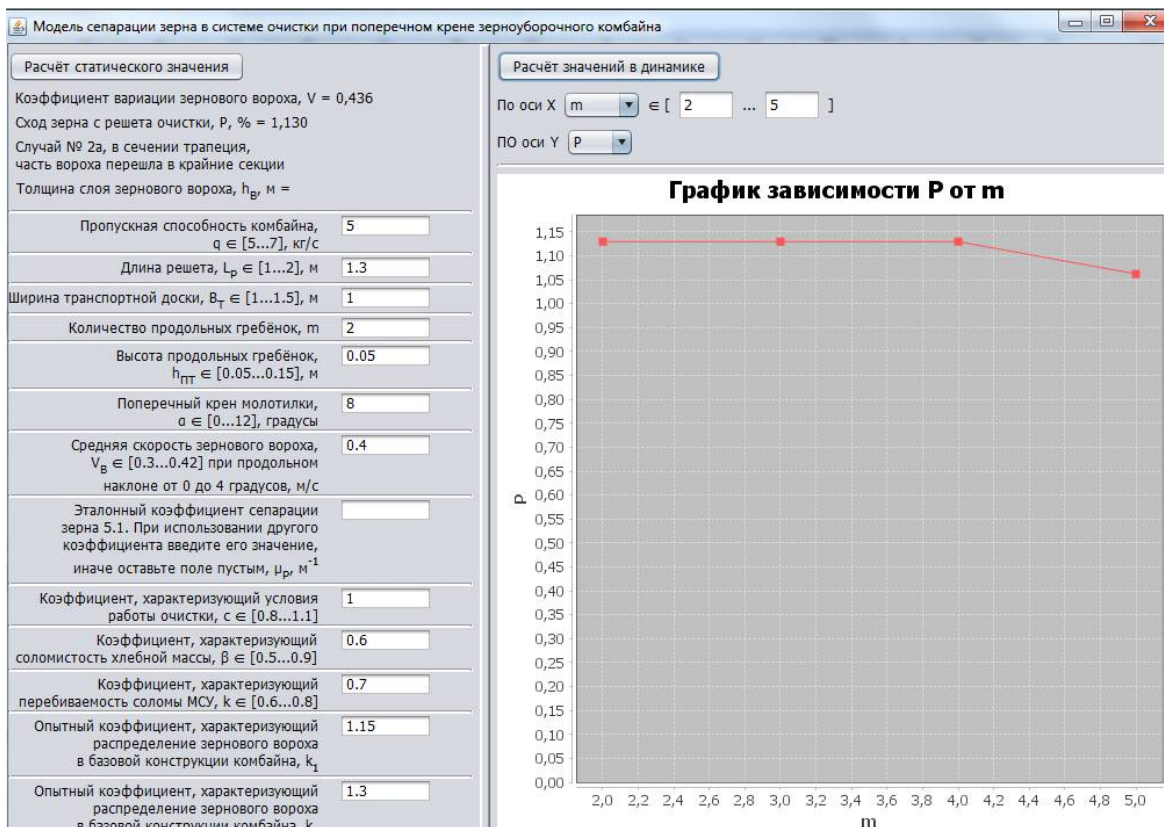






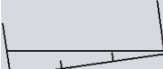
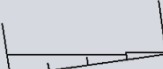



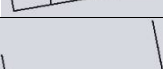
Рисунок 3.10 – Рабочее окно программы с результатами расчёта ($\alpha_K = 8^0$)

Оценим потери зерна за очисткой и распределение зернового вороха на грохоте при поперечном наклоне зерноуборочного комбайна с шириной молотилки 1200 мм. Расчёты проведены при следующих параметрах: ширина стрясной доски $B_T = 1,0$ м; количество продольных гребёнок на стрясной доске 2 шт; высота продольных гребёнок на стрясной доске 0,05 м; ширина верхнего решета $B_P = 1,1$ м; $L_p = 1,3$ м; количество продольных перегородок на верхнем решете 3 шт; высота продольных перегородок на верхнем решете 0,05 м; $C=30$ %; $\mu_{P0}=5,1\text{ м}^{-1}$. Примем, что на верхнее решето зерновой ворох поступает с неравномерностью, приобретенной на стрясной доске. Коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха в начале V_{hn} и в конце V_{hk} верхнего решета и вид распределения зернового вороха определены по программе для ЭВМ «Расчет параметров системы очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна», а потери зерна – по математической модели сепарации зернового вороха (3.44).

С увеличением угла α_K , как и ожидалось, распределение зернового вороха на решете ухудшается (таблица 3.1), причём при наклоне решета более 8^0


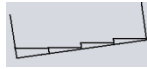
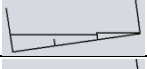
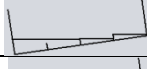
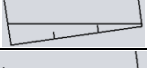
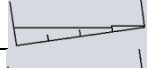
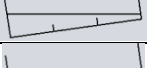
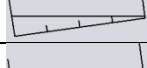

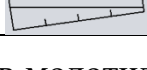
сечение зернового вороха в секции имеет вид треугольника. Это приводит к нерациональному расходу воздушного потока. Средний коэффициент вариации зернового вороха с ростом α_K также увеличивается, как и потери зерна за системой очистки.

Таблица 3.1 – Теоретические значения коэффициентов вариации толщины слоя зернового вороха на верхнем решете и потерь зерна ($q_B = 2,9 \text{ кг/с}$)

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

Подача зернового вороха также влияет на его распределение на верхнем решете, причём в конце решета, с ростом подачи, коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха вначале увеличивается, а затем снижается, что влияет на коэффициент c , характеризующий условия работы системы очистки, на коэффициент сепарации зерна и потери зерна (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Теоретические значения коэффициентов вариации толщины слоя зернового вороха и потерь зерна ($\alpha_K = 8^\circ$)

$q_B, \text{ кг/с}$	Конец стрясной доски		Конец решета		V_{hCP}	$h_B, \text{ м}$	$P_{рас}, \%$
	Вид распределения	V_{hn}	Вид распределения	V_{hk}			
1,5		0,594		0,474	0,534	0,039	0,64
2,2		0,552		0,559	0,556	0,057	0,69
2,9		0,462		0,519	0,491	0,075	1,25
3,6		0,372		0,473	0,422	0,094	2,66
4,3		0,312		0,396	0,354	0,112	4,95

При подаче хлебной массы в молотилку 6,0 кг/с и установке двух перегородок, зерновой ворох не смещается в сторону уклона при их высоте 0,14 м. При установке трёх перегородок, делящих стрясную доску на четыре дорожки, что соответствует конфигурации верхнего решета зерноуборочного комбайна третье-

го класса, высота перегородок может быть уменьшена до 0,13 м, при которой зерновой ворох не переходит в соседнюю секцию. При предельном угле поперечного крена 12° и подаче хлебной массы в молотилку 6,0 кг/с высота продольных перегородок должна быть больше (рисунок 3.11). Зерновой ворох не перебрасывается в соседнюю секцию при высоте продольных перегородок 0,14 м.

Также проведён анализ распределения зернового вороха для зерноуборочных комбайнов четвёртого класса (подача хлебной массы 7,5 кг/с, ширина молотилки 1200 мм) и пятого класса (подача хлебной массы 9,0 кг/с, ширина молотилки 1500 мм).

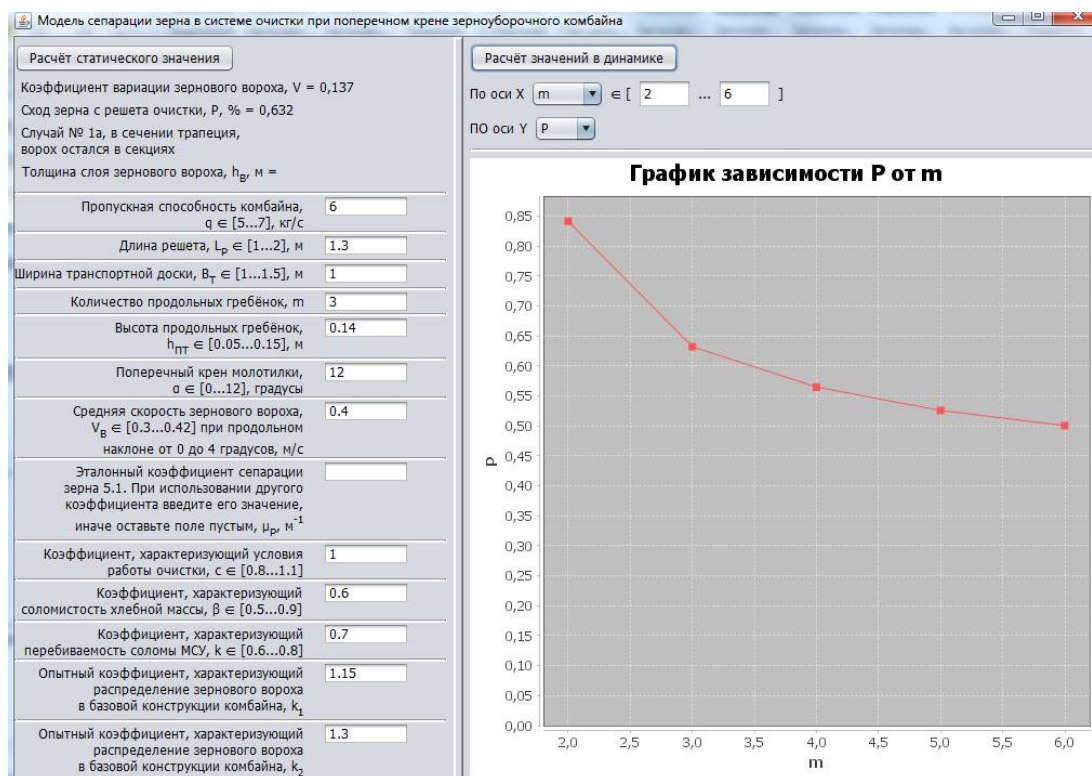


Рисунок 3.11 – Рабочее окно программы с результатами расчёта ($\alpha_K = 12^\circ$)

Теоретически установлено, что количество и высота перегородок, при которых ворох не перебрасывается в соседнюю секцию при поперечном крене комбайна до 12° , равны: для комбайна четвёртого класса – три перегородки высотой 0,17 м; для комбайна пятого класса – пять перегородок высотой 0,16 м.

Применение продольных перегородок (делителей) увеличенной высоты на верхнем решете, предотвращающих перераспределение зернового вороха в зерноуборочном комбайне VECTOR 410, по данным ООО «КЗ Ростсельмаш» приводит к снижению потерь зерна «более чем на 1 % и эффект тем выше, чем больше отклонение от горизонта» [90].

3.6 Экспериментальные исследования работы воздушно-решетной очистки базового комбайна. Проверка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна», в которой установлена воздушно-решетная очистка зерноуборочного комбайна СК-5М «Нива».

Исходный материал – зерновой ворох пшеницы сорта «Омская 9» с влажностью от 10 до 12 % и с содержанием соломистых примесей 30 %. Основные регулировочные параметры системы очистки: частота вращения крыльчатки вентилятора – 600 мин⁻¹; зазор между жалюзи верхнего решета – 13 мм, нижнего решета – 9 мм. Регулировка удлинителя верхнего решета: наклон – второе отверстие; степень открытия жалюзи – четвертое отверстие. На стрясной доске установлены две продольные гребёнки высотой 50 мм.

Выявлено, что с увеличением угла поперечного крена молотилки качественные показатели работы базовой системы очистки ухудшаются, потери зерна увеличиваются (рисунки 3.12, 3.13). Потери зерна превышают установленный уровень (0,5 %) при поперечном крене более 5 ° [47, 100]. При поперечном крене до 10 ° относительные отклонения Δ между теоретическими значениями потерь зерна (см. таблицу 3.1) и экспериментальными, полученными при тех же параметрах, не превышают 10 % (рисунок 3.12).

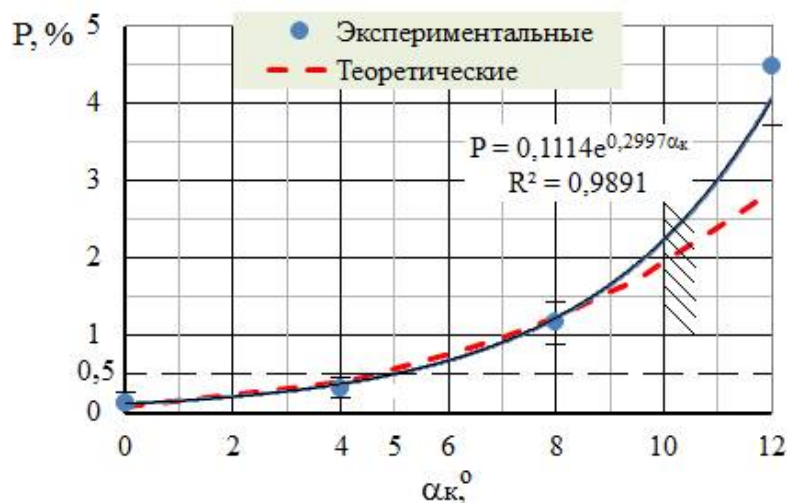


Рисунок 3.12 – Потери зерна за системой очистки базового комбайна в зависимости от α_k ($q_B = 2,9$ кг/с)

Увеличение подачи зернового вороха при поперечном крене молотилки приводит к увеличению потерь зерна. При крене 8 ° и установленном уровне потерь зерна 0,5 % подача равна 1,6 кг/с.

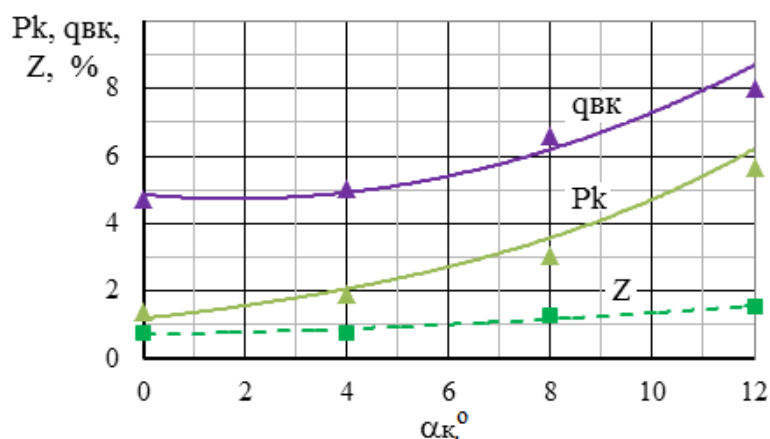


Рисунок 3.13 – Качественные показатели работы системы очистки базового комбайна в зависимости от поперечного крена молотилки ($q_B = 2,9$ кг/с)

Относительное отклонение между экспериментальными и теоретическими значениями (см. таблицу 3.2) потерь зерна менее 10 % (рисунок 3.14).

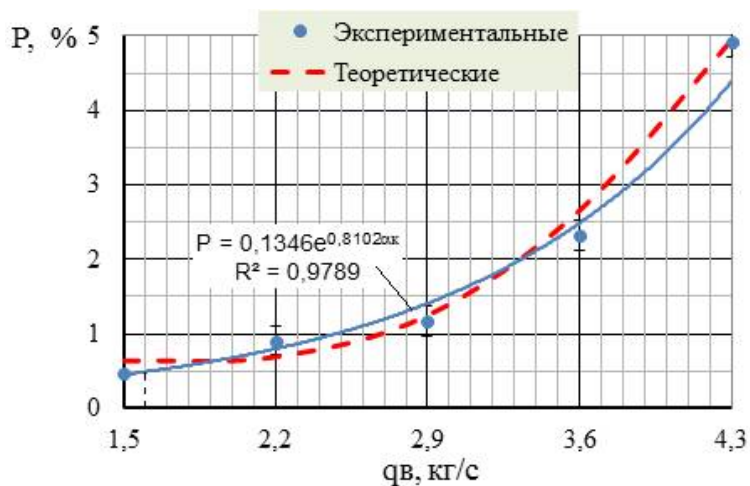


Рисунок 3.14 – Потери зерна за системой очистки базового комбайна в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_k = 8^\circ$)

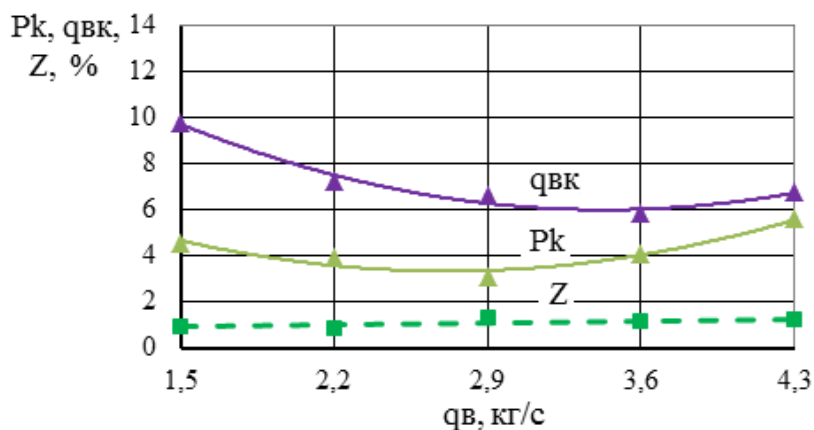


Рисунок 3.15 – Качественные показатели работы системы очистки базового комбайна в зависимости от q_B ($\alpha_k = 8^\circ$)

Ухудшение качественных показателей работы системы очистки при поперечном крене молотилки обусловлено смещением зернового вороха в сторону уклона. На рисунке 3.16 приведено распределение зернового вороха на верхнем решете. При увеличении поперечного крена зерновой ворох смещается в сторону уклона – при увеличении угла от 0 до 10 ° средний коэффициент вариации возрастает с 0,091 до 0,57 [122]. Участки решета, находящиеся у боковых стенок корпуса комбайна (первый и восьмой), находятся в самых неблагоприятных условиях. Так, при горизонтальном положении молотилки на них приходится 10,9 и 11,3 % от всей массы зернового вороха, а при крене 8 ° – соответственно 22,0 и 3,4 %. Зависимость коэффициента вариации вороха от поперечного крена молотилки практически линейная (рисунок 3.17).

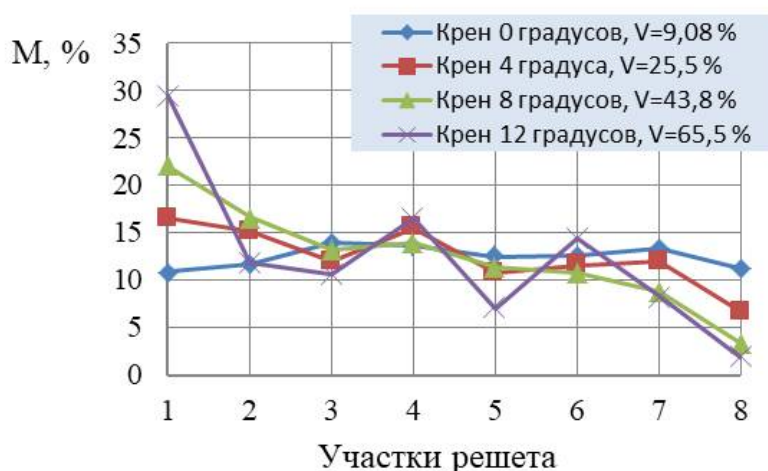


Рисунок 3.16 – Распределение зернового вороха по ширине решета в зависимости от поперечного крена молотилки (коэффициент вариации V – в процентах)

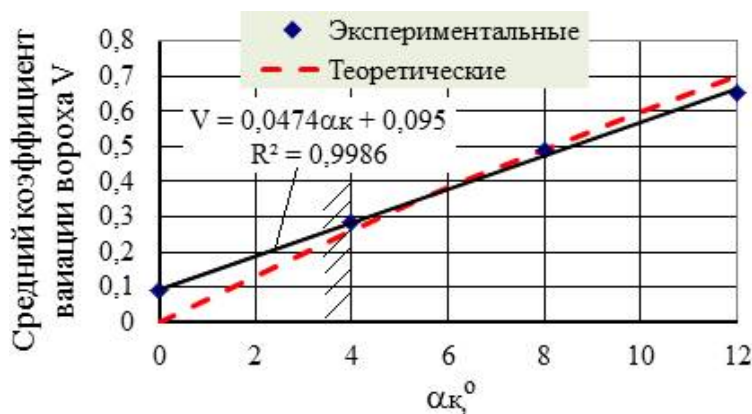


Рисунок 3.17 – Зависимость среднего коэффициента вариации вороха от угла α_k

При угле крена комбайна от 4 до 12 ° относительное отклонение между экспериментальными и теоретическими значениями коэффициента вариации не превышает 8 %.

Установка на стрясной доске зерноуборочного комбайна третьего класса трёх продольных перегородок высотой 130 мм предотвращает перебарывание

зернового вороха в соседние дорожки (секции). Если на верхнем решетке увеличить высоту продольных перегородок до 130 мм, то на всей поверхности грохота коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха постоянен, т.е. $V_h = const$. В этом случае потери зерна не зависят от перераспределения зернового вороха между секциями. Заметим, что неблагоприятными факторами в рассматриваемом варианте являются: неравномерное распределение зернового вороха, поступающего из МСУ и СГВ; большая загрузка крайней нижней секции (по отношению к уклону); смещение вороха внутри секции.

Результаты исследований приведены на рисунке (3.18).

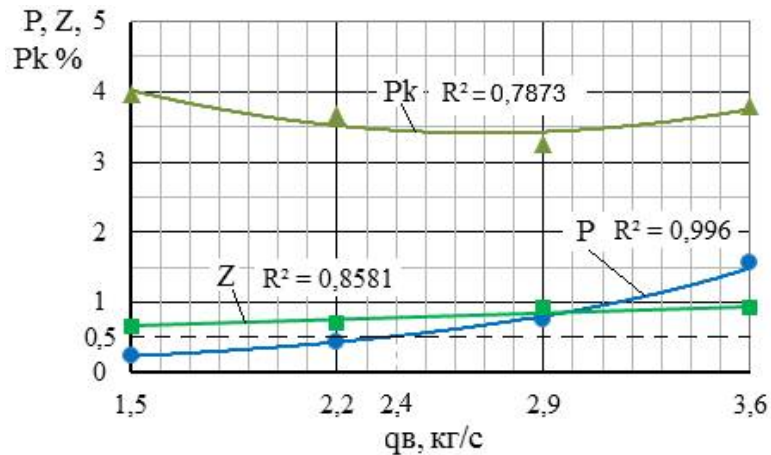


Рисунок 3.18 – Качественные показатели работы ВРО с тремя продольными перегородками на стрясной доске и верхнем решетке высотой 130 мм

Установка трёх продольных перегородок высотой 130 мм на грохоте улучшила качественные показатели работы системы очистки. При подаче зернового вороха 2,9 кг/с потери зерна в сравнении с базовой очисткой снизились в 1,6 раза (до 0,75 %), засоренность бункерного зерна составила 0,92 %, сход зерна в колосовой шнек – 3,27 %. При установленном уровне потерь зерна (0,5 %) подача зернового вороха равна 2,4 кг/с, что выше базовой в 1,5 раза.

Глава 4. ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА ДЛЯ РАБОТЫ НА СКЛОНАХ

4.1 Основные требования к системе очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах

Как было отмечено ранее, известные устройства, обеспечивающие снижение уровня потерь зерна за системой очистки при уборке зерновых культур на склонах, или недостаточно эффективны, или имеют сложную конструкцию, которую невозможно применить без больших изменений в конструкции базового зерноуборочного комбайна. На основе этого вывода и проведённых исследований сформулируем требования к системе очистки зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах:

1) система очистки, усложняющая конструкцию зерноуборочного комбайна, должна повышать эффективность уборки зерновых культур как на склонах, так и на равнине;

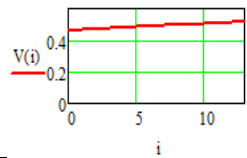
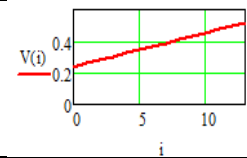
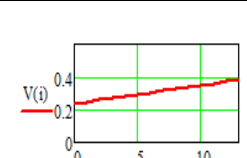
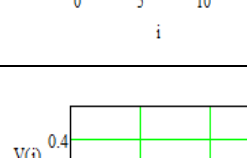
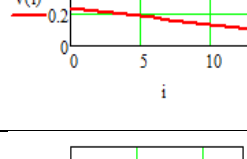
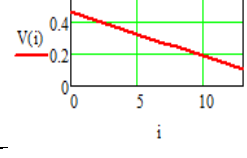
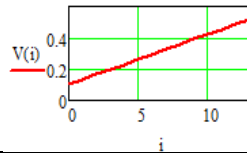
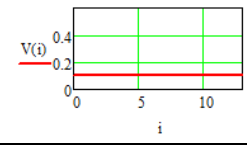
2) устройство, применяемое для адаптации работы системы очистки зерноуборочного комбайна на склонах, не должно значительно усложнять базовую конструкцию комбайна, увеличивать его массу и стоимость; иметь возможность установки в базовую конструкцию в виде дополнительной опции;

3) в рамках агротребований к молотилке зерноуборочных комбайнов по ГОСТ 28301-2015 «Комбайны зерноуборочные. Методы испытаний» при нормированном отношении зерна к соломе 1:1,5 (уровень потерь зерна 1,5 %, дробление зерна – 2,0 %, засоренность бункерного зерна – 2,0 %), установим допустимый уровень потерь зерна за системой очистки – 0,5 %.

Выполним по разработанной модели сепарации анализ технологических операций, обеспечивающих снижение потерь зерна за системой очистки при работе зерноуборочного комбайна на склонах. Для последующего сравнения полученных результатов с экспериментальными данными анализ выполним для зерноуборочного комбайна третьего класса. Угол поперечного крена молотилки комбайна – 8°. Параметры базовой очистки: $q_z=100\%$; $V_{hn}=0,462$; $V_{hk}=0,519$; теоретические потери зерна $P_{pac}=1,25\%$. Коэффициенты вариации толщины слоя зернового вороха систем очистки, выполняющих исследуемые технологические операции, приняты по работе [47]. Минимальный коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха принят равным 0,1.

Как видно из таблицы 4.1, перспективными технологическими операциями, обеспечивающими снижение потерь зерна при работе комбайна с поперечным креном молотилки, являются: предварительная сепарация зернового вороха; снижение неравномерности подачи зернового вороха на верхнее решето; стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете; выравнивание зернового вороха в начале и на поверхности верхнего решета. Наибольший эффект может быть достигнут при совмещении перечисленных технологических операций.

Таблица 4.1 – Варианты технологий сепарации зернового вороха, обеспечивающих снижение потерь зерна при поперечном крене молотилки

Технологические операции	Исходные данные				График изменения коэффициента вариации в сечениях по длине решета	$P_{рас}, \%$ / снижение потерь
	$q_z, \%$	V_{hn}	V_{hk}	$V_{hx} / X_m, \text{м}$		
Предварительная сепарация	40	0,46	0,52	—		0,50 / 2,5
Предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето	40	0,24	0,52	—		0,29 / 4,3
Предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето, стабилизация распределения на верхнем решете	40	0,24	0,38	—		0,21 / 6,0
Предварительная сепарация, снижение неравномерности подачи на верхнее решето, выравнивание на верхнем решете	40	0,24	0,10	—		0,09 / 13,9
Выравнивание к концу верхнего решета	100	0,46	0,10	—		0,44 / 2,8
Выравнивание перед верхним решетом	100	0,10	0,52	—		0,50 / 2,5
Выравнивание перед верхним решетом и стабилизация распределения на верхнем решете	100	0,10	0,10	—		0,15 / 8,3
Выравнивание в передней части решета и стабилизация распределения на верхнем решете	100	0,46	0,10	0,1 / 0,4		0,23 / 5,4

4.2 Предварительная сепарация зернового вороха в решётно-винтовом сепараторе

Винтовые транспортёры, установленные вместо стрясной доски, обеспечивают равномерную подачу зернового вороха на верхнее решето вне зависимости от продольных наклонов молотилки. Однако отсутствие подготовки зернового вороха к разделению (сегрегации зерна) снижает эффективность работы системы очистки. Для устранения указанного недостатка разработана схема очистки с устройством предварительной сепарации зернового вороха, выполненного в виде решётно-винтового сепаратора (рисунок 4.1). Система очистки защищена а.с. № 1701165 СССР (авторы С.Ф. Сороченко, В.Ф. Семенов, С.В. Терехин и др.) и патентом № 2002401 РФ (авторы С.Ф. Сороченко и В.Ф. Семенов).

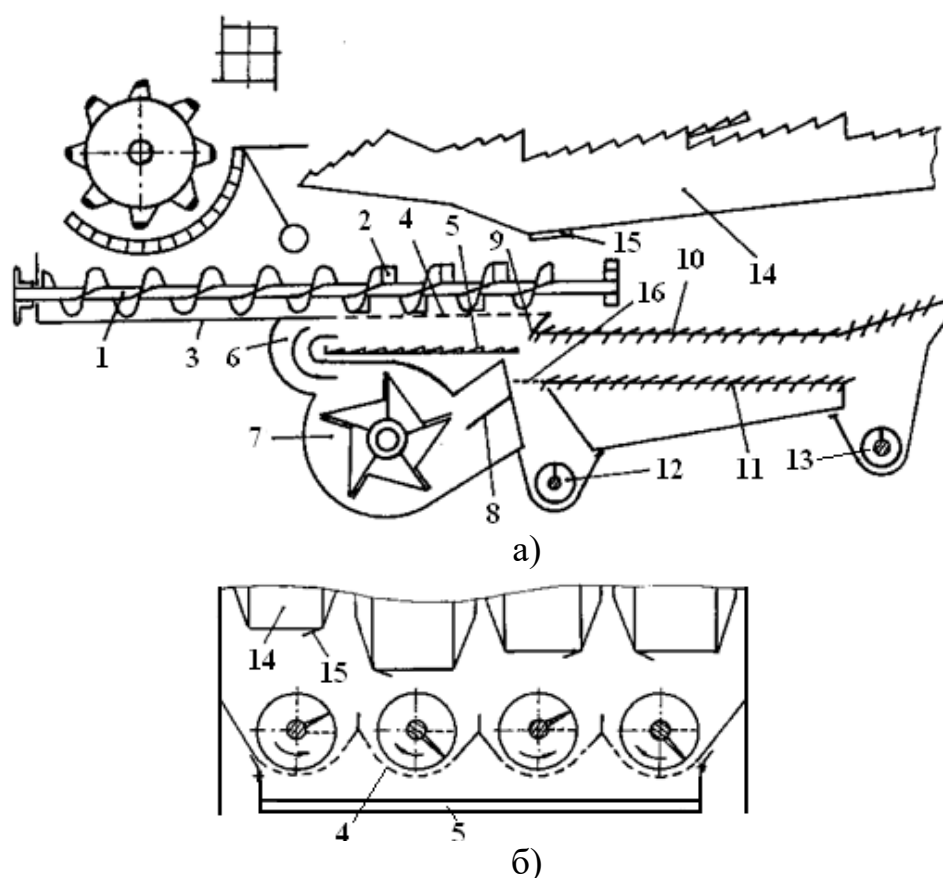


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема молотилки зерноуборочного комбайна с решётно-винтовым сепаратором (а – продольное сечение; б – поперечное сечение): 1 – шнек; 2 – лопатка; 3 – днище; 4 – цилиндрическое решето; 5 – укороченная стрясная доска; 6 – дополнительный патрубок вентилятора; 7 – вентилятор; 8 – направитель воздуха; 9 – эластичный экран; 10, 11 – верхнее и нижнее решета; 12, 13 – зерновой и колосовой шнеки; 14 – клавиша соломотряса; 15 – скатная пластина; 16 – надставка

Решётно-винтовой сепаратор установлен вместо стрясной доски и содержит винтовые транспортёры, состоящие из шнеков 1, с жестко установленными на них лопатками 2, и днища 3 с решетом 4 в задней части, причём лопатки 2 установлены над решетом 4.

Шнеки 2 установлены поочередно с правой и левой навивками винтовых поверхностей. Под решетом 4 установлена укороченная стрясная доска 5. Вентилятор 6 снабжён дополнительным патрубком 7 и направителем воздуха 8, установленным в основном патрубке. В воздушной камере, ограниченной решетом 4 и укороченной стрясной доской 5, в задней части установлен эластичный экран 9, предназначенный для направления воздушного потока через отверстия решета 4. В окнах клавиш соломотряса установлены скатные пластины 15. Нижнее решето 11 снабжено надставкой 16.

В предлагаемой системе очистки предварительная сепарация зернового вороха, поступающего с молотильно-сепарирующего устройства, происходит за счет воздействия воздушного потока и лопаток 2. В месте поступления зернового вороха со дна клавиш соломотряса на клавишах установлены скатные пластины 15, направляющие зерновой ворох на свободную часть решета 4, причём на шнеках в этом месте лопатки не установлены.

Нижнее решето предлагаемой системы очистки, по сравнению с базовой конструкцией, в силу компоновочного решения более загружено зерновым ворохом. Поэтому в основном патрубке вентилятора установлен направитель 8, распределяющий воздушный поток между верхним 10 и нижним 11 решетами очистки.

Для определения параметров системы очистки были проведены теоретические и экспериментальные исследования решётно-винтового сепаратора (РВС) и всей системы очистки [118]. Определены параметры РВС для зерноуборочного комбайна третьего класса: количество шнеков диаметром и шагом 0,15 м решётно-винтовой сепаратор целесообразно выполнить из четырёх шнеков; частота вращения шнеков 330 мин⁻¹; диаметр отверстий решета 12 мм; ширина лопаток 60 мм; шаг лопаток 100 мм; скорость воздушного потока на решетке 3,7 м/с. Обоснована конструкция двухрукавного центробежного вентилятора. Регулировочные параметры предложенной очистки при содержании соломистых примесей в бункерном зерне 2 %: частота вращения вентилятора 660 мин⁻¹; отношение расстояния от дна патрубка до направителя к высоте патрубка вентилятора 0,3; зазоры между жалюзи верхнего решета 12,5 мм, нижнего – 9,5 мм.

Проведённые лабораторные и лабораторно-полевые испытания [87, 118, 123] системы очистки с решётно-винтовым сепаратором показали преимущество предложенной очистки в сравнении с эталонной (системой очистки зерноуборочного комбайна третьего класса СК-5М «Нива») при работе на равнине: пропускная способность экспериментальной очистки при уровне потерь зерна 0,5 % выше эталонной в 1,27 раза; при приведённой подаче хлебной массы 5,0 кг/с потери свободным зерном и недомолотом за эталонной очисткой составили 0,41 %, а за экспериментальной – 0,22 %; потери свободным зерном в полове у серийной очистки выше, чем у экспериментальной при подаче 3 кг/с в 4,8 раза; при подаче 5,5 кг/с в 3,4 раза; при подаче 6,5 кг/с в 2 раза.

Также проведены лабораторные испытания системы очистки с решётно-винтовым сепаратором при поперечном крене молотилки 8 °, которые показали, что предварительное разделение зернового вороха в решётно-винтовом сепара-

торе способствует снижению потерь зерна. Потери зерна составили 0,82 %, а содержание примесей в бункерном зерне – 1,87 %. При снижении подачи зернового вороха потери зерна также уменьшаются, а пропускная способность экспериментальной очистки составила 2,39 кг/с, т.е. в 1,48 раза выше эталонной [118].

Установка в решётно-винтовой сепаратор гребёнок вместо лопаток (рисунок 4.2, а) позволит повысить эффективность разделения зернового вороха. По патенту № 2038739 РФ (авторы С.Ф. Сороченко и В.Ф. Семенов) элементы гребёнки выполнены криволинейными, вогнутой частью обращенной в сторону вращения шнека (рисунок 4.2, б), причём форма гребёнки обеспечивает равномерное перемещение зернового вороха при сходе с гребёнки. Такое исполнение перемешивающих устройств обеспечивает проход зерна сквозь гребёнку и его поступление на решето сепаратора, а солоmistая часть вороха сходит позже с гребёнки, т.е. происходит предварительное разделение зернового вороха. В устройстве по патенту № 2101909 РФ (автор С.Ф. Сороченко) элементы гребёнок выполнены в виде ступенек, направленных от оси шнека к периферии в сторону, противоположную вращению шнека, с возможностью встряхивания вороха при его перемещении по гребёнке, что обеспечивает повышение эффективности работы сепаратора (рисунок 4.2, в).

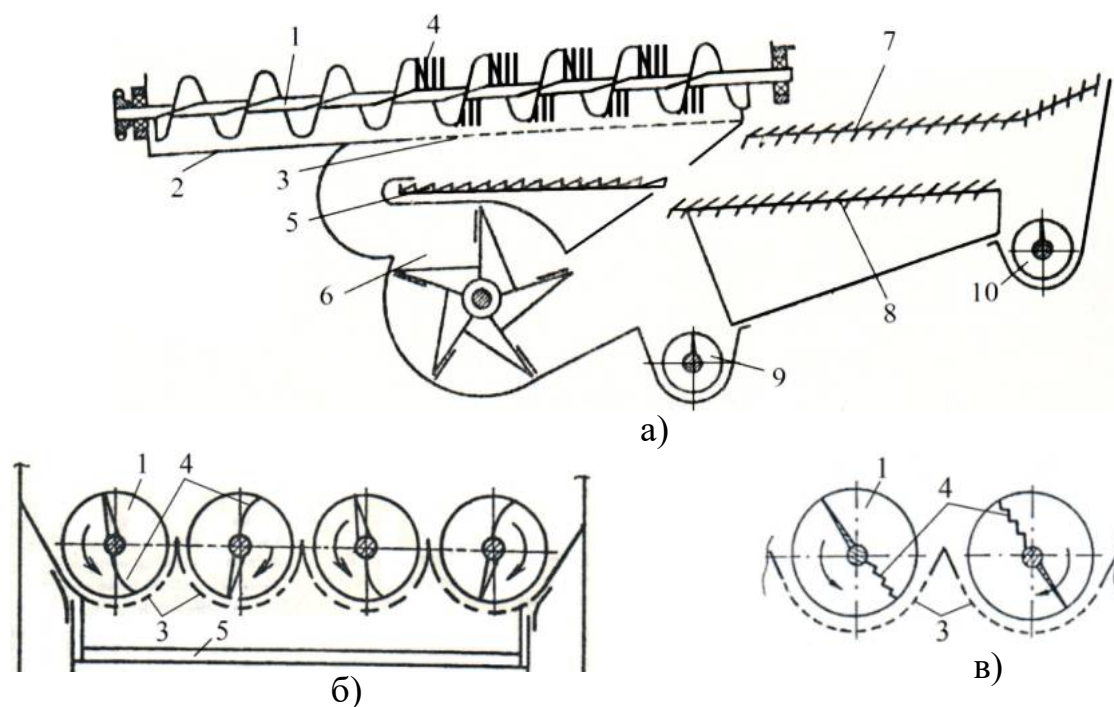


Рисунок 4.2 – Схема системы очистки с решётно-винтовым сепаратором с гребёнками (а – продольное сечение; б – поперечное сечение сепаратора по патенту № 2038739; в – поперечное сечение сепаратора по патенту № 2101909): 1 – шнек; 2 – днище; 3 – цилиндрическое решето; 4 – гребёнка; 5 – укороченная стрясная доска; 6 – вентилятор; 7, 8 – верхнее и нижнее решета; 9, 10 – зерновой и колосовой шнеки

Шаг элементов гребёнки определён из условия прохода зерна сквозь гребёнку. Так как наибольшую длину имеют зерна овса (длина до 18,6 мм), то ис-

ходя из предположения, что зерновка пройдёт через гребёнку при отсутствии касания с двумя соседними элементами, шаг элементов гребёнки установили равным 20 мм, при диаметре элемента 5 мм расстояние между соседними элементами равно 15 мм.

Вероятность прохода компонентов зернового вороха сквозь гребёнку равна

$$P_{ПП} = 1 - P_{2+n}, \quad (4.1)$$

где P_{2+n} – вероятность пересечения частицы длиной $2l$ двух и более параллельных прямых с шагом $2a_1$, равная по С.А. Алфёрову [14]

$$P_{2+n} = \frac{2 \cdot l}{\pi \cdot a_1} \cdot \left(\frac{a_1}{l} \cdot \left(\arcsin \frac{a_1}{l} - \arcsin \frac{2a_1}{l} + \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{l^2}} - \sqrt{1 - \frac{4a_1^2}{l^2}} \right), \quad (4.2)$$

причём при $a_1 \leq l \leq 2a_1$

$$P_2 = \frac{2 \cdot l}{\pi \cdot a_1} \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{a_1^2}{l^2}} - \frac{a_1}{l} \cdot \arccos \frac{a_1}{l} \right). \quad (4.3)$$

Расчёты показали, что при выбранном шаге элементов гребёнки семена зерновых культур (пшеницы, ржи, ячменя, овса) будут проходить сквозь гребёнку, а соломистые частицы, имеющие длину от 20 до 100 мм, будут сходиться с гребёнки, что интенсифицирует сепарацию зерна в решётно-винтовом сепараторе (рисунок 4.3).

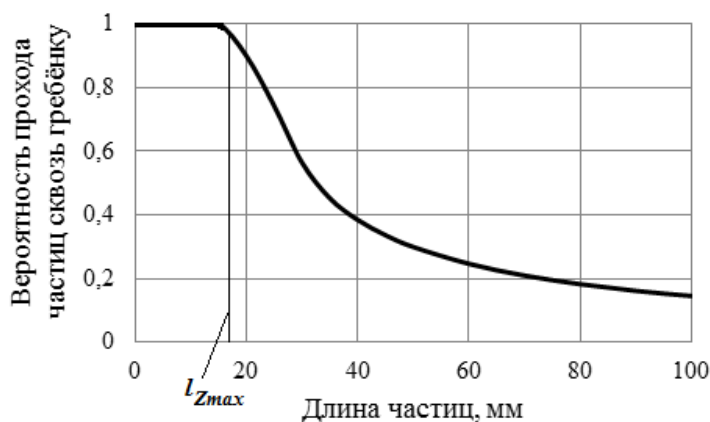


Рисунок 4.3 – Разделение компонентов зернового вороха на гребёнке (l_{ZMAX} – максимальная длина семян зерновых культур)

Определим влияние продольных наклонов зерноуборочного комбайна (движение вверх или вниз по склону) на скорость зернового вороха, перемещаемого шнеком по решетке сепаратора.

Осевая скорость зернового вороха V_{XS} , перемещаемого шнеком, зависит от угловой скорости вращения шнека ω_0 , радиуса шнека R_S , угла подъёма винтовой поверхности шнека α_B и угла ε_S между вектором абсолютной скорости вороха и осью шнека (по А.М. Григорьеву [27])

$$V_{XS} = \frac{\omega_0 \cdot R_S \cdot \sin \alpha_B \cdot \cos \varepsilon_S}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}. \quad (4.4)$$

Уравнение движения частицы по решетке сепаратора имеет вид [118]

$$\varepsilon_S = \arcsin \left[\frac{\left(\frac{U_o^2}{U_S^2} \sin \gamma \cdot \sin \nu_S + \sin \delta \cdot \operatorname{tg}(\alpha_B + \varphi_B) - \frac{U_o^2}{U_S^2} \cos \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha_B + \varphi_B) - \right.}{f_{\text{ПП}} \cdot (\cos \nu_S \cdot \cos \delta + \omega_{as}^2 \cdot \frac{R_S}{g} - \frac{U_o^2}{U_S^2} \cdot \sin \gamma \cdot \cos \nu)} \right. \\ \left. - \frac{\sin \nu_S \cdot \cos \delta}{\cos(\alpha_B + \varphi_B)} \right] + \alpha_B + \varphi_B, \quad (4.5)$$

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

Параметры движения зернового вороха в зависимости (4.5) определены по формулам:

- угловая скорость абсолютного движения частицы [27]

$$\omega_{as} = \frac{\omega_0 \cdot \sin \alpha_B \cdot \sin \varepsilon_S}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}; \quad (4.6)$$

- относительная скорость частицы вороха в воздушном потоке [118]

$$U_o = U - \frac{\omega_0 \cdot R_S \cdot \sin \alpha_B \cdot \cos \varepsilon_S \cdot \cos \gamma}{\cos(\alpha_B - \varepsilon_S)}. \quad (4.7)$$

Расчёт осевой составляющей абсолютной скорости частицы при $\nu_S = 0^\circ$ проведён при параметрах, значения которых обоснованы в работе [118]: $U = 3,7 \text{ м/с}$; $\gamma = 10^\circ$; $R_S = 0,075 \text{ м}$; шаг винтовой поверхности $S_S = 0,15 \text{ м}$. Параметры зернового вороха: $U_S = 5,0 \text{ м/с}$; коэффициент трения вороха о спираль шнека $f_B = 0,4$; $f_{\text{ПП}} = 0,81$. Расчёт проведён в программе Mathcad при различной частоте вращения шнека и углах продольного наклона комбайна в интервале до 10° при движении комбайна вниз и вверх по склону (рисунок 4.4). Значения осевой скорости зернового вороха при движении комбайна вверх или вниз по склону отличаются от значения скорости при отсутствии продольного наклона меньше в сравнении с движением зернового вороха по жалюзийному решетку. При рекомендуемой частоте вращения шнека 330 мин^{-1} при движении комбайна вверх по склону изменение угла продольного наклона от 0 до 10° приводит к увеличению скорости зернового вороха с $0,72$ до $0,76 \text{ м/с}$, т. е. на $5,6 \%$ (на жалюзийных решетках при тех же условиях скорость увеличивается на $16,3 \%$), а при движении вниз по склону – уменьшается до $0,68 \text{ м/с}$, т. е. на $5,6 \%$ (на жалюзийных решётках скорость уменьшается на $4,7 \%$).

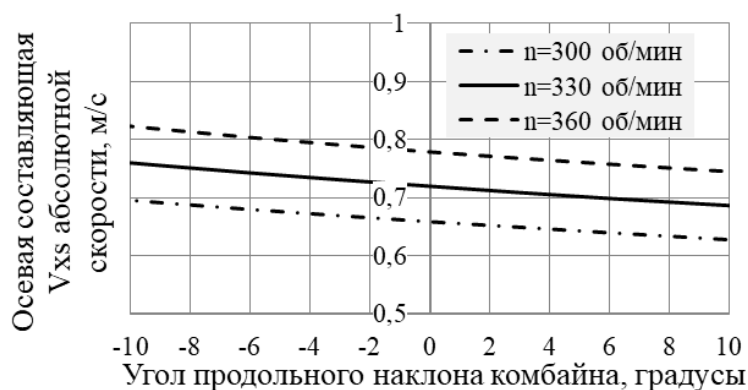


Рисунок 4.4 – Результаты расчёта осевой составляющей абсолютной скорости частицы (отрицательные значения угла продольного наклона – движение комбайна вверх по склону, положительные – вниз)

Таким образом, применение решётно-винтового сепаратора в конструкции зерноуборочного комбайна способствует равномерной по времени подаче зернового вороха в систему очистки при уборке зерновых культур при движении зерноуборочного комбайна вверх по склону.

Рассмотрим распределение зернового вороха, поступающего на верхнее решето системы очистки с решета сепаратора. Как было отмечено ранее, скатные пластины 15 (см. рисунок 4.1), установленные на клавишах соломотряса, направляют зерновой ворох на незанятую ворохом часть решета, причём на шнеках в этом месте перемешивающие устройства не установлены. Под действием винтовой поверхности зерновой ворох смещается в сторону вращения шнека на угол ν_S . Расчётный коэффициент вариации зернового вороха при сходе с решета РВС при поперечном кренемолотилки 8° и подаче $2,9$ кг/с равен $0,237$ [47], но на верхнем решете зерновой ворох смещается в сторону уклона. Расчётный коэффициент вариации толщины слоя зернового вороха в конце верхнего решета равен $0,519$, что приводит к увеличению среднего коэффициента вариации до $0,378$ (меньше, в сравнении с базовой очисткой, в $1,3$ раза).

Экспериментальные исследования работы системы очистки с решётно-винтовым сепаратором проведено на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна с РВС» [118]. Исследования проведены на зерновом ворохе пшеницы сорта «Омская 9» с влажностью $10\text{--}12\%$. Регулировочные параметры очистки: частота вращения крыльчатки вентилятора – 660 мин⁻¹; зазор между жалюзи верхнего решета 13 мм, нижнего – 10 мм; рычаг открытия жалюзи удлинителя установлен в четвёртом отверстии; угол наклона нижнего решета к горизонту – 4° . Результаты исследований приведены на рисунке 4.5.

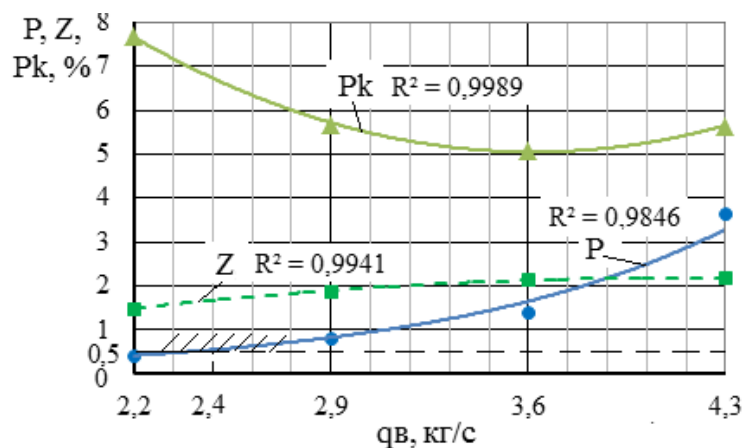


Рисунок 4.5 – Качественные показатели работы системы очистки с РВС в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_K = 8^\circ$)

Предварительная сепарация зернового вороха в РВС способствует снижению потерь зерна при поперечном крене молотилки. Так, при крене 8° потери зерна в исследуемом диапазоне подач зернового вороха ниже в сравнении с базовой очисткой; допустимый уровень потерь зерна (0,5 %) достигнут при подаче зернового вороха 2,4 кг/с, что в 1,5 раза выше базовой. Засоренность бункерного зерна в очистке с РВС была несколько выше, чем в базовой, однако при подаче до 3,0 кг/с не превышала 2 %. В исследуемой системе очистки наблюдается увеличение схода зерна в колосовой шнек в сравнении с базовой очисткой. Повышенный уровень потерь зерна так же, как и в базовой очистке, происходит из-за смещения зернового вороха в сторону уклона на верхнем решете.

Таким образом, в системе очистки с решётно-винтовым сепаратором улучшается распределение зернового вороха, поступающего на верхнее решето. Учитывая, что происходит предварительная сепарация зернового вороха, то совместное действие указанных факторов способствует повышению эффективности работы системы очистки при работе комбайна на склонах с поперечным и продольным наклоном молотилки.

4.3 Стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете

Технологической операцией, позволяющей снизить потери зерна за системой очистки при работе комбайна на склонах, является стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете путём выравнивания решета (или его части) относительно горизонта. Это направление реализовано в конструкции двухсекционного верхнего решета по патенту № 2058710 РФ (авторы С.Ф. Сороченко, В.Ф. Семенов, В.А. Эбель и С.В. Терехин) (рисунок 4.6), в конструкции самоустанавливающегося верхнего решета по патенту № 2095965 РФ (авторы С.Ф. Сороченко и А.М. Фролов) и в очистке с выравниванием решет в двух плоскостях по патенту № 2137349 РФ (авторы С.Ф. Сороченко и А.Н. Антропов).

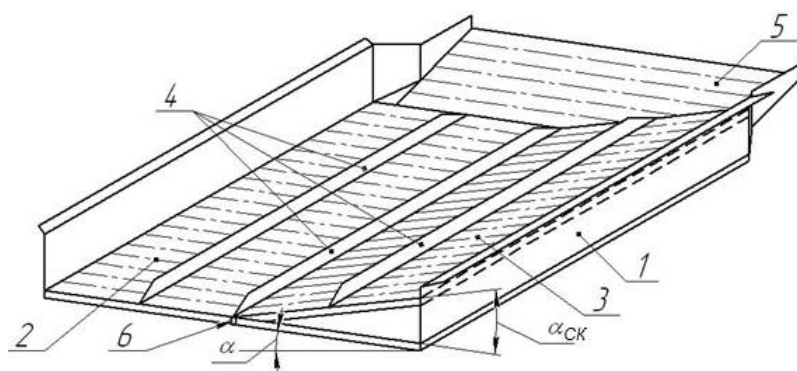


Рисунок 4.6 – Схема верхнего решетчатого стана с двухсекционным решетом: 1 – каркас; 2, 3 – секции решета; 4 – продольные планки; 5 – удлинитель верхнего решета; 6 – шарнир

Предположим, что в начале двухсекционного решета распределение такое же, как в базовой очистке. При $\alpha_K = 8^\circ$, $q_B = 2,9 \text{ кг/с}$ расчётный коэффициент вариации вороха в начале решета $V_{hn} = 0,462$, а при установке нижней секции под углом $\alpha_{СК} = 12^\circ$, предотвращающей смещение зернового вороха в сторону уклона, коэффициент вариации в конце решета $V_{hk} = 0,383$ [47], при этом средний коэффициент равен $V_{hCP} = 0,423$. Таким образом, применение двухсекционного решета незначительно (в 1,16 раза) уменьшает средний коэффициент вариации толщины слоя вороха в сравнении с базовой очисткой – $V_{hCP} = 0,491$. Однако, как отмечено в главе 2, хотя наклон секции решета снижает интенсивность смещения зернового вороха в сторону уклона, но воздушный поток и колебания решета в продольном направлении способствуют указанному смещению, что снижает эффективность работы рассматриваемого решета.

Лабораторные исследования рассматриваемой системы очистки проводили на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна» [47], в которой в верхнем решётном стане вместо штатного верхнего решета установлено экспериментальное двухсекционное решето, причём одна секция установлена относительно каркаса под углом $\alpha_{СК} = 12^\circ$ (см. рисунок 4.6). Исходный материал – зерновой ворох пшеницы «Алтайская 50» с содержанием соломистой фракции 30 %, влажностью зерна – 11,2 %, влажностью соломистой фракции 10–12 %. Опыты проведены при подаче зернового вороха на очистку 2,9 кг/с. Для проверки возможности работы зерноуборочного комбайна на полях с уклоном до 10° , секция решета, расположенная ниже по отношению к уклону, установлена под углом $\alpha_{СК} = 12^\circ$, что предотвращает сгуживание зернового вороха у боковой стенки верхнего стана. Регулировочные параметры экспериментальной системы очистки – частота вращения крыльчатки вентилятора – 600 мин^{-1} , зазор между жалюзи верхнего решета – 13 мм, нижнего – 10 мм. Стрясная доска оставлена без изменений относительно базовой конструкции (две продольные гребенки высотой 50 мм). Результаты исследований представлены на рисунке 4.7.

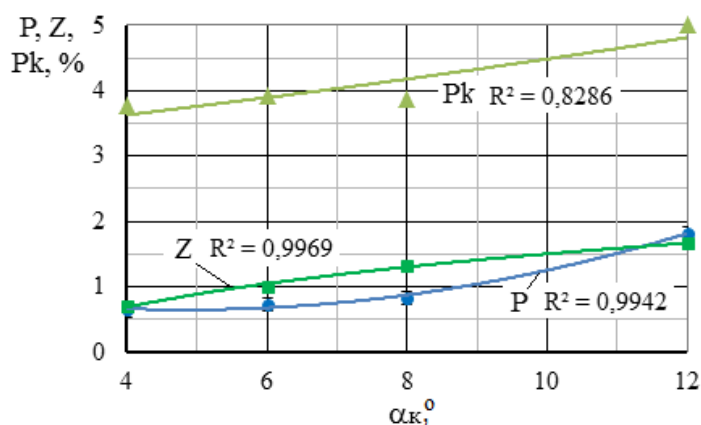


Рисунок 4.7 – Качественные показатели работы системы очистки с двухсекционным решетом в зависимости от α_k ($q_B = 2,9$ кг/с)

Выявлено, что установка двухсекционного решета не позволила существенно улучшить качественные показатели работы очистки [47, 101]. При поперечном крене молотилки 4° потери зерна в сравнении с базовой очисткой увеличились с 0,30 до 0,64 %. Сход зерна в колосовой шнек отличался несущественно от базовой очистки; только при крене 12° наблюдалось увеличение этого показателя. Однако при $\alpha_k = 8^\circ$ потери зерна в сравнении с базовой очисткой снизились с 1,17 % до 0,83 %, а при 12° – с 4,16 до 1,82 %, т. е. работа системы очистки улучшилась. Отклонение между теоретическим значением потерь зерна (0,92 %, см. таблицу 4.2) и средним экспериментальным значением (0,83 %, $\sigma_P = 0,02$ %) равно $\Delta = 10,8$ %.

При крене $\alpha_k = 6,5^\circ$ потери зерна в сравниваемых очистках имеют практически одинаковые значения, поэтому при использовании двухсекционного решета поворот секции необходимо производить при крене молотилки свыше указанного значения.

Установка на стрясной доске трёх продольных перегородок высотой 130 мм улучшила равномерность распределения зернового вороха, поступающего на верхнее решето, и в сочетании с двухсекционным решетом качественные показатели работы системы очистки, рисунок 4.8 [47, 57, 101].

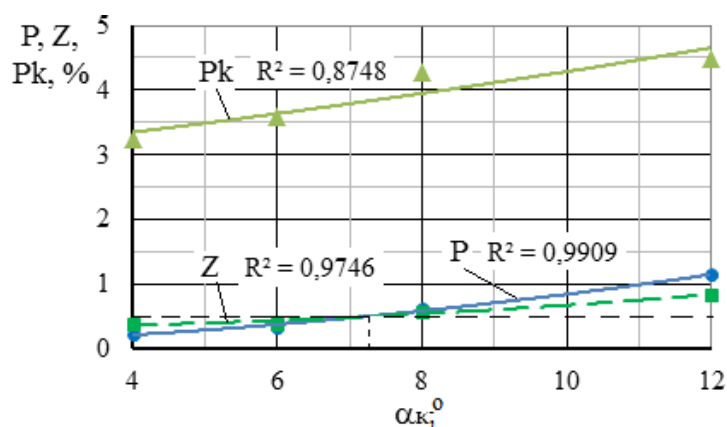


Рисунок 4.8 – Качественные показатели работы системы очистки с двухсекционным решетом и тремя продольными перегородками высотой 130 мм на стрясной доске в зависимости от α_k ($q_B = 2,9$ кг/с)

Поворот секции с образованием желоба целесообразно производить при поперечном крене молотилки 5° , при этом потери зерна не превышают $0,5\%$ при наклоне до 7° , а засоренность бункерного зерна – менее 1% . Заметим, что потери зерна при крене 12° снижаются более чем в $3,6$ раза в сравнении с базовой очисткой.

При крене $\alpha_K = 8^\circ$ и подаче зернового вороха от $2,2$ до $2,9$ кг/с потери зерна снижаются до $0,6\%$, но всё равно превышают принятый уровень $0,5\%$ (рисунок 4.9). В сравнении с базовой очисткой при подаче $2,9$ кг/с потери зерна снижаются в $1,9$ раза, при подаче $3,6$ кг/с – в $3,7$ раза.

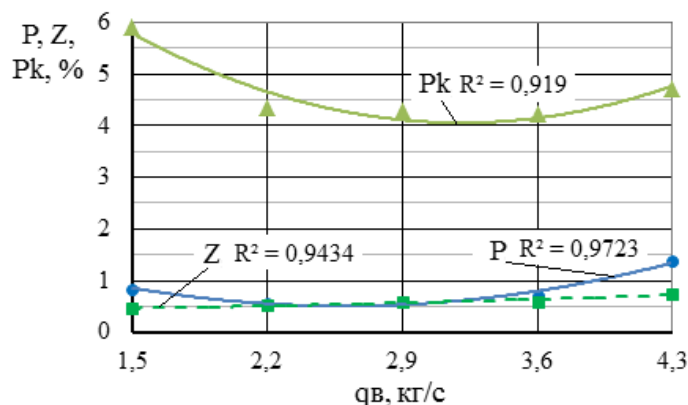


Рисунок 4.9 – Качественные показатели работы системы очистки с двухсекционным решетом и тремя продольными перегородками высотой 130 мм на стрясной доске в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_K = 8^\circ$)

Стабилизация распределения зернового вороха также достигается на самоустанавливающемся верхнем решете по патенту № 2095965 РФ (авторы С.Ф. Сороченко и А.М. Фролов) (рисунок 4.10).

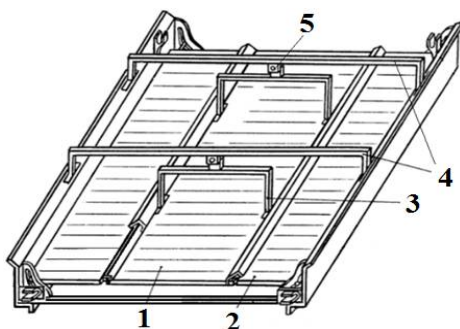


Рисунок 4.10 – Очистка с самоустанавливающимся решетом по патенту № 2095965 :
 1 – средняя секция решета; 2 – крайняя секция решета; 3 – подвеска;
 4 – поперечные балки; 5 – шарнир с компенсирующим механизмом

Применение самоустанавливающегося решета, крайнее положение которого в поперечном сечении ограничено наклоном его поверхности относительно молотилки, также не может значительно снизить коэффициент вариации вороха к концу решета из-за воздушного потока и колебаний решета, направления которых в предлагаемой конструкции не изменяются относительно продольной оси молотилки. Поэтому предположим, что в рассматриваемой конструкции

коэффициент вариации по всему решету имеет постоянное значение, равное значению коэффициента вариации в начале верхнего решета, т.е. 0,462 (ниже, чем в базовой очистке, в 1,06 раза).

Экспериментальные исследования работы системы очистки с верхним самоустанавливающимся решетом проведены на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна» [47]. Исходный материал – зерновой ворох пшеницы «Алтайская 50» с содержанием солоистой фракции 30 %, влажностью компонентов зернового вороха от 10 до 12 %. Предельный угол самоустанавливающегося решета относительно каркаса решётного стана – 6 °. Регулировочные параметры системы очистки: частота вращения крыльчатки вентилятора равна 640 мин⁻¹, зазор между жалюзи верхнего решета – 12 мм, нижнего – 9 мм.

При изменении поперечного крена от 0 до 12 ° качественные показатели работы системы очистки в сравнении с базовой улучшились (потери зерна изменялись от 0,19 до 1,91 %; засоренность бункерного зерна – от 1,46 до 1,36 %; сход зерна в колосовой шнек – от 4,4 до 9,07 %) [55], однако остались на довольно высоком уровне. Причина – смещение зернового вороха на стрясной доске и неравномерная подача зернового вороха на решето. Поэтому для повышения равномерности подачи зернового вороха увеличена высота продольных перегородок, установленных на стрясной доске, с 50 до 130 мм. Результаты исследований представлены на рисунках 4.11 и 4.12.

При увеличении поперечного крена молотилки от 0 до 12 ° потери зерна не превышали 0,25 %, при этом засоренность бункерного зерна так же, как и в базовой очистке, не превышала 2 %. При поперечном крене молотилки 8 ° пропускная способность системы очистки (при уровне потерь зерна 0,5 %) достигла 3,6 кг/с, что выше базовой в 2,25 раза [121].

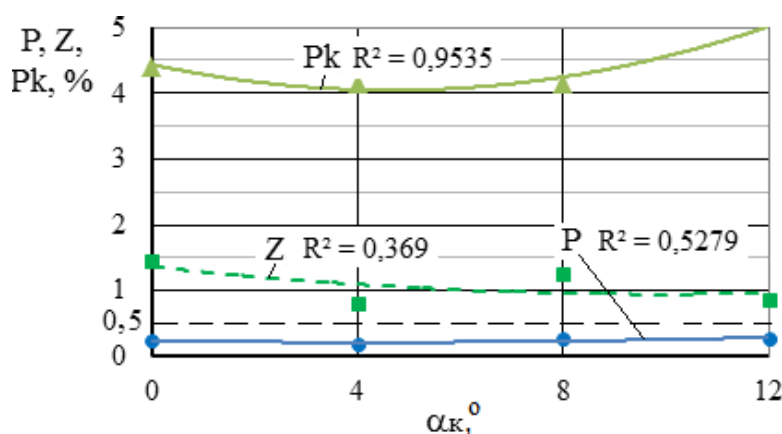


Рисунок 4.11 – Качественные показатели работы системы очистки с самоустанавливающимся решетом в зависимости от поперечного крена молотилки ($q_B = 2,9$ кг/с)

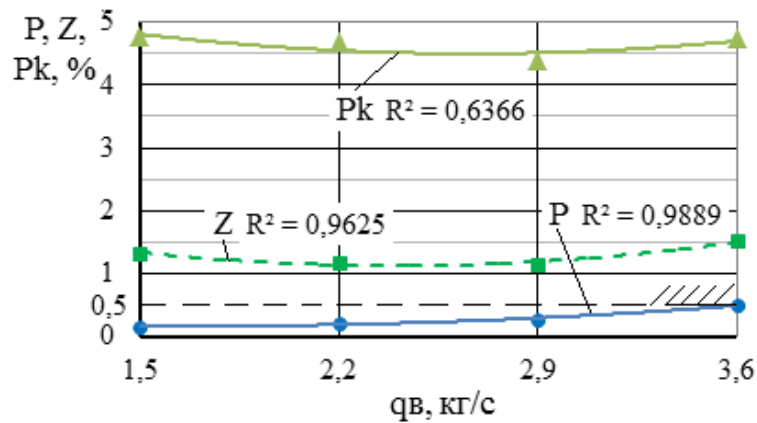


Рисунок 4.12 – График зависимости качественных показателей работы системы очистки с самоустанавливающимся решетом в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_K = 8^\circ$)

Выравнивание всей поверхности решета относительно линии горизонта достигается в устройстве по патенту № 2137349 РФ (рисунок 4.13). Применение предлагаемого устройства несколько усложняет конструкцию комбайна, и для эффективной работы системы очистки необходима установка перед решетом выравнивателей вороха. На движение зернового вороха по решету так же, как и в предыдущих случаях, оказывают влияние направление воздушного потока и направление колебаний решета. Поэтому для рассматриваемой очистки большое значение имеет распределение зернового вороха в начале решета. Можно предположить, что и в этом случае коэффициент вариации толщины зернового вороха постоянен по всей длине решета, т.е. средний коэффициент равен 0,462.

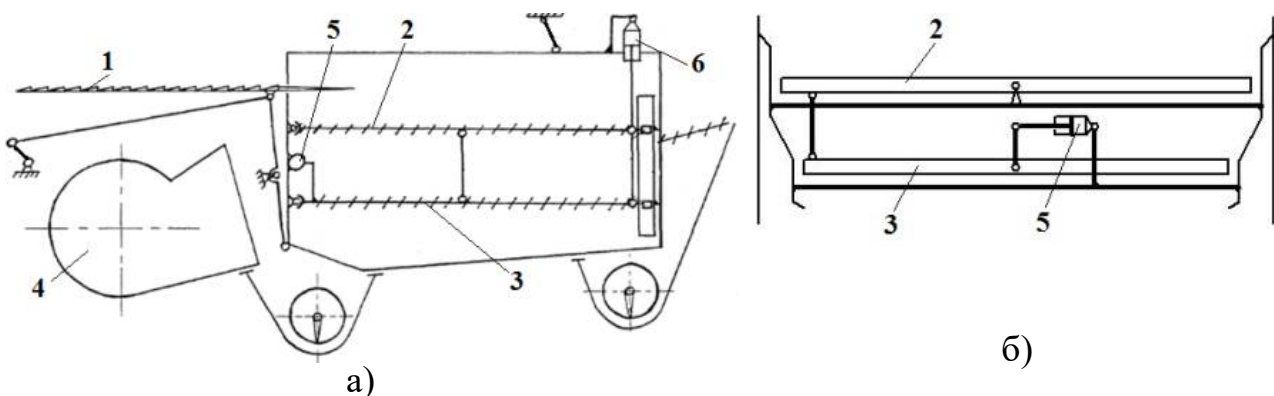


Рисунок 4.13 – Очистка с выравниванием решёт в поперечной и продольной плоскостях по патенту РФ № 2137349: а – продольное сечение; б – поперечное сечение; 1 – стрясная доска; 2 – верхнее решето; 3 – нижнее решето; 4 – вентилятор; 5 – гидроцилиндр поперечного выравнивания решёт; 6 – гидроцилиндр продольного выравнивания решёт

Таким образом, применение устройств, выравнивающих верхнее решето (или его часть) относительно горизонта, несколько снижает неравномерность распределения зернового вороха на верхнем решете, однако неравномерная его подача не позволяет достичь значительного повышения эффективности работы системы очистки при поперечном крене молотилки.

Как было отмечено ранее, увеличение высоты и количества продольных перегородок, установленных на стрясной доске, способствует улучшению распределения зернового вороха, поступающего на верхнее решето, что целесообразно применять для предлагаемых технических решений. Установка на стрясной доске двух продольных перегородок высотой 130 мм исключает перераспределение зернового вороха между секциями, при этом необходимо учитывать большую загрузку нижней секции (по отношению к уклону). Коэффициент вариации вороха в начале решета (при $\alpha_K = 8^\circ$ и $q_B = 2,9 \text{ кг/с}$) снизился до $V_{hn} = 0,223$. При установке трёх перегородок высотой 130 мм с учётом большей загрузки нижней секции коэффициент вариации зернового вороха в конце решета равен $V_{hk} = 0,243$.

Предварительная сепарация зернового вороха, снижение неравномерности подачи на верхнее решето и стабилизация распределения зернового вороха на верхнем решете происходят в комбинированных системах очистки с РВС, и с двухсекционным верхним решетом, и с РВС, и самоустанавливающимся верхним решетом. При установленных параметрах РВС (диаметр отверстий решета 12 мм, ширина лопаток 60 мм, скорость воздушного потока 3,7 м/с) сход зерна с решета сепаратора не превышает 10,0 %. Таким образом, на начало верхнего решета, учитывая зерно, поступающее с соломотряса, поступает около 40 % от всего зерна, поступающего на очистку. В таблице 4.2 приведены результаты расчёта коэффициентов вариации толщины слоя зернового вороха и потерь зерна для рассматриваемых схем очисток. Потери зерна рассчитаны по модели сепарации (формула 3.45).

Таблица 4.2 – Результаты расчёта

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

Экспериментальные исследования работы комбинированной системы очистки с решётно-винтовым сепаратором и двухсекционным решетом проведено на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна с РВС» [118], в которой вместо верхнего решета установлено двухсекционное решето. Секция, расположенная ниже по отношению к уклону, установлена под углом 12° относительно каркаса решётного стана. Исследования проведены на зерновом ворохе пшеницы сорта «Омская 9» с влажностью 10–12 % и содержанием соломистых примесей 30 %. Регулировочные параметры очистки с РВС:

частота вращения крыльчатки вентилятора – 660 мин^{-1} ; зазор между жалюзи верхнего решета 13 мм, нижнего – 10 мм; рычаг открытия жалюзи удлинителя установлен в четвёртом отверстии; угол наклона нижнего решета к горизонту – 4° . Результаты исследований приведены на рисунке 4.14 [47, 101].

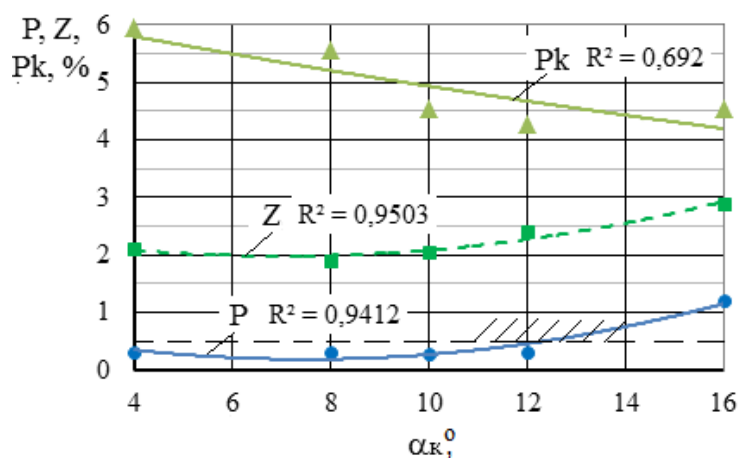


Рисунок 4.14 – Качественные показатели работы комбинированной системы очистки с РВС и двухсекционным решетом в зависимости от поперечного крена молотилки ($q_B = 2,9 \text{ кг/с}$)

В комбинированной системе очистки предварительная сепарация зернового вороха, отсутствие его смещения в сторону уклона на решётах винтового сепаратора, а также стабилизация распределения зернового вороха на двухсекционном решете привели к значительному снижению потерь зерна в сравнении с базовой очисткой – потери зерна не превысили 0,5 % при поперечном крене молотилки до 12° . Подача зернового вороха при установленном уровне потерь зерна в исследуемой системе очистки при крене молотилки до 12° превышает $2,9 \text{ кг/с}$. Засоренность бункерного зерна в комбинированной очистке была несколько выше, чем в базовой, однако при крене до 10° засоренность бункерного зерна находилась на уровне, определяемом агротребованиями – 2,0 %.

Исследование работы комбинированной системы очистки с РВС и самоустанавливающимся верхним решетом проведено на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна с РВС» [118], в которой вместо верхнего решета установлено самоустанавливающееся решето. Исследования проведены на зерновом ворохе пшеницы сорта «Омская 9» с влажностью 10–12 % и содержанием солоmistых примесей 30 %. Входные параметры: угол крена молотилки 8° ; влажность вороха – 10–12 %; содержание солоmistой фракции в ворохе – 30 %; конструктивные параметры РВС – шаг лопаток – 100 мм; ширина лопаток – 60 мм; частота вращения шнеков – 330 мин^{-1} , диаметр отверстий решета – 12 мм. Регулировочные параметры исследуемой очистки определены методом планирования эксперимента: частота вращения крыльчатки вентилятора – 690 мин^{-1} ; зазоры между жалюзи верхнего решета – 13,5 мм, нижнего решета – 9 мм.

Результаты исследований представлены на рисунке 4.15 [110]. Засоренность бункерного зерна в экспериментальной очистке увеличилась относительно базовой очистки, но не превысила уровня, определяемого агротребованиями – 2 %.

С увеличением подачи зернового вороха потери зерна увеличиваются, однако не превышают 0,5 %. Подача зернового вороха при установленном уровне потерь зерна равна 3,9 кг/с (значение получено интерполированием).

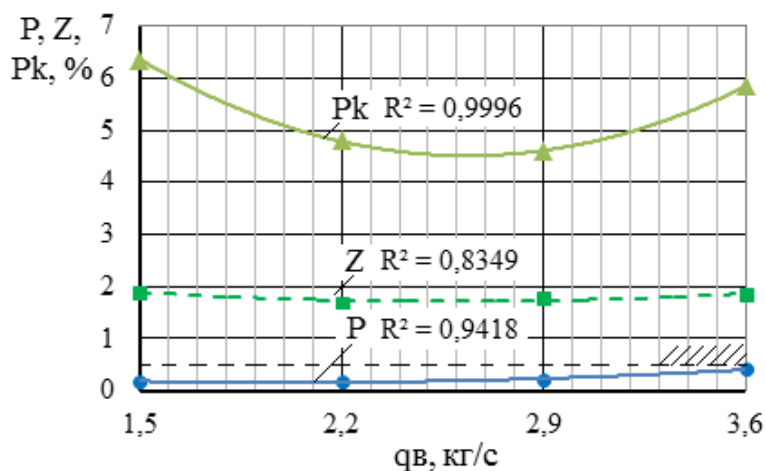


Рисунок 4.15 – Качественные показатели работы комбинированной системы очистки с PBC и самоустанавливающимся решетом в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_K = 8^\circ$)

4.4 Выравнивание толщины слоя зернового вороха дополнительными колебаниями решета в поперечном направлении

Выравнивание толщины слоя зернового вороха обеспечивается колебаниями решета в поперечном направлении (при движении к концу решета – движение в сторону, противоположную уклону). Для определения требуемой скорости зернового вороха в поперечном направлении по верхнему решету, совершающему продольные и поперечные колебания, в работе [111] рассмотрено перемещение элементарного слоя вороха, контактирующего с поверхностью решета. Однако вследствие хаотичного расположения компонентов зернового вороха целесообразно рассматривать изменение поперечного сечения вороха за счёт перемещения порции зернового вороха за один период колебаний решета. Указанная порция зависит от поперечного крена молотилки, направления перемещения зернового вороха относительно продольной оси молотилки, ширины решета, толщины зернового вороха. Исходя из этого, преобразуя зависимость (3.6), определим требуемый угол направления перемещения зернового вороха относительно оси X

$$\varepsilon_T = \arctg \left[\frac{B^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{8 \cdot h_B \cdot X_P} \right]. \quad (4.8)$$

Результаты расчёта для зерноуборочного комбайна при ширине решета $B=1,1$ м, длине решета $L_P=1,0$ м (без удлинителя верхнего решета), принятой толщине слоя зернового вороха, контактирующего с поверхностью решета

$h_B = 0,035 м$, приведены в таблице 4.3. Амплитуда колебаний решета в поперечном направлении, обеспечивающая перемещение слоя зернового вороха, контактирующего с решетом под заданным углом, определена по аппроксимирующим уравнениям, приведённым на рисунке 2.20.

Таблица 4.3 – Результаты расчёта

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

Допустим, что за счёт применения инерционного выравнивателя к концу решета достигается полное выравнивание толщины слоя, т.е. $V_{hn} = 0,462$ и $V_{hk} = 0$.

Потери зерна, рассчитанные по модели сепарации (3.45), равны 0,32 %.

Выравнивание толщины зернового вороха дополнительными колебаниями решета в поперечном направлении с амплитудой r_{II} при неизменяемых колебаниях решета в продольном направлении (амплитуда колебаний r постоянна) реализовано в устройствах по патентам РФ № 2134503 (авторы С.Ф. Сороченко, И.В. Киреев, А.Ю. Кулаков) и № 2177683 (авторы С.Ф. Сороченко и В.А. Дрюк).

Инерционный выравниватель зернового вороха по патенту № 2177683 состоит из верхнего решетчатого стана, включающего решето 1 , установленное в каркасе 2 с возможностью перемещений в поперечном направлении, и приводного вала 3 (рисунок 4.16). Изменение направления и амплитуды поперечных колебаний осуществляется гидроцилиндром двустороннего действия 4 , который закреплён на приводном валу, шатуна 5 , двуплечего рычага 6 и тяги 7 , шарнирно соединённой с решетом 1 .

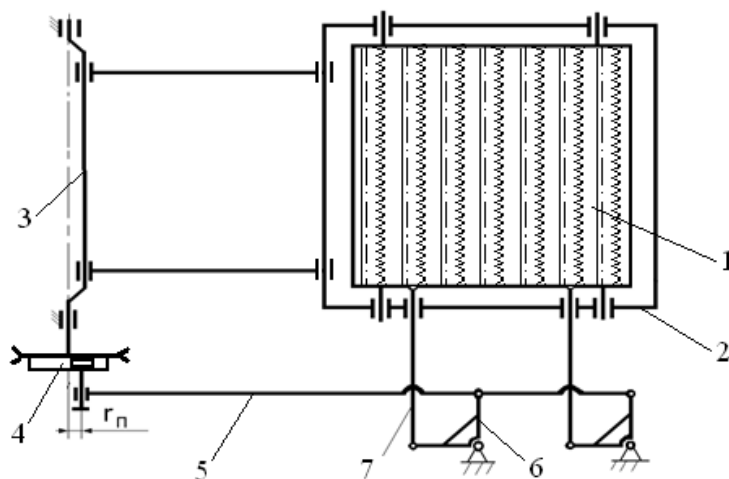


Рисунок 4.16 – Схема инерционного выравнивателя зернового вороха по патенту № 2177683 (расшифровка позиций в тексте)

Синхронизация продольных колебаний решетчатого стана и поперечных колебаний решета осуществляется так, что при перемещении решётчатого стана от переднего положения к заднему решето перемещается в поперечном направ-

лении в сторону, противоположную уклону. Это приводит к распределению зернового вороха по всей поверхности решета.

Выравнивание толщины слоя зернового вороха в решетном стане по патенту № 2134503 достигается также перемещением решета *1* относительно каркаса *2* в поперечном направлении (рисунок 4.17). Указанное перемещение достигается двумя гидроцилиндрами *3* и *4* двустороннего действия, один из которых установлен перпендикулярно боковине каркаса и соединён с ней и решето, а другой установлен вдоль боковины и соединён с ней и стенкой молотилки, причём гидроцилиндры связаны между собой посредством трубопроводов *5* и гидрораспределителя *6*. При поперечном крене молотилки от датчика уклона и управляющего устройства (на рисунке не показаны) сигнал передаётся на шток гидрораспределителя *6*, который посредством трубопроводов соединяет рабочие полости гидроцилиндра *3* с рабочими полостями гидроцилиндра *4*. Причём при крене молотилки вправо полость «с» гидроцилиндра *3* соединяется с полостью «е» гидроцилиндра *4*, а при крене влево – полость «с» соединяется с полостью «д». Указанное соединение полостей гидроцилиндров способствует перемещению решета в поперечном направлении вверх по склону при движении решетного стана назад. Для перераспределения рабочей жидкости между полостями гидроцилиндров в переходных режимах служат предохранительные клапаны *7*. Амплитуда поперечных колебаний в данной конструкции зависит от диаметров и ходов штоков гидроцилиндров *3* и *4*.

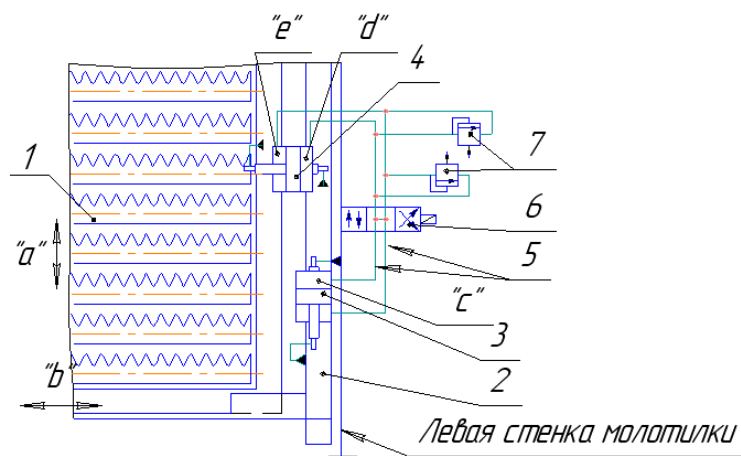


Рисунок 4.17 – Схема инерционного выравнивателя зернового вороха по патенту № 2134503
 (а – колебания решётного стана в продольном направлении;
 б – колебания решета в поперечном направлении; расшифровка позиций в тексте)

Экспериментальные исследования работы системы очистки с инерционным выравнивателем проведены на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна» [47], в которую установлено экспериментальное верхнее решето по патенту № 2177683. Исследования проведены на зерновом ворохе пшеницы сорта «Алтайская 50» с влажностью 10–12 % и содержанием соломистых примесей 30 %.

Результаты экспериментальных исследований системы очистки с инерционным выравнивателем зернового вороха за счёт дополнительных колебаний решета в поперечном направлении изложены в работах [33, 34, 95, 122]. Выявлено, что за счёт колебаний решета в поперечном направлении зерновой ворох разравнивается по решету. На рисунке 4.18 представлены графики распределения зернового вороха, находящегося на решете, совершающем, кроме продольных, поперечные колебания с амплитудой 25 мм.

Распределение зернового вороха в конце решета улучшилось – коэффициент вариации вороха в этой части равен 0,142 и сопоставим с коэффициентом вариации вороха на равнине (0,091).

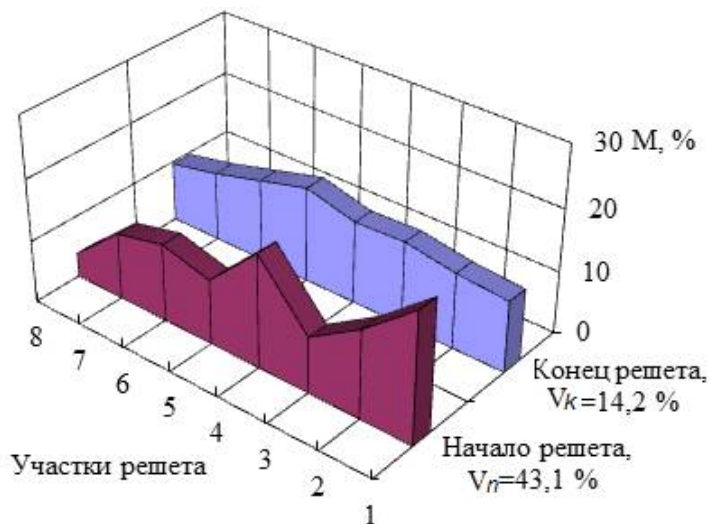


Рисунок 4.18 – Распределение зернового вороха на верхнем решете с инерционным выравнивателем ($\alpha_k=8^\circ$, $r_{II}=25$ мм, коэффициенты вариации массы вороха приведены в процентах) [122]

С увеличением амплитуды колебаний решета в поперечном направлении коэффициент вариации вороха в конце решета и средний коэффициент вариации снижаются практически по линейной зависимости (рисунок 4.19).

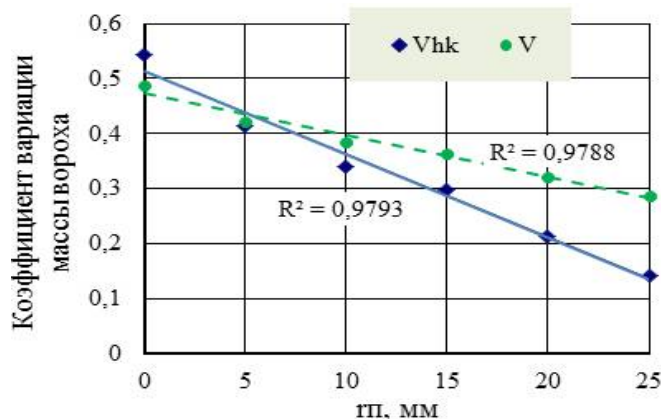


Рисунок 4.19 – Коэффициенты вариации вороха в конце решета V_k и средний V в зависимости от r_{II} [95]

Для оценки качественных показателей работы очистки воспользуемся регрессионной математической моделью, полученной В.А. Дрюком, описывающей зависимость потерь зерна за очисткой P от подачи вороха на очистку q_B (от 2,2 до 3,6 кг/с), угла поперечного наклона комбайна (от 4 до 12 °) и амплитуды колебаний решета в поперечном направлении (от 0 до 20 мм) [33, 34]:

$$P = 4,18 + 0,134 \cdot q_B^2 + 0,080 \cdot \alpha_K^2 + 0,003 \cdot r_{II}^2 - 1,283 \cdot q_B - 1,078 \cdot \alpha_K + 0,007 \cdot r_{II} + 0,173 \cdot q_B \cdot \alpha_K - 0,018 \cdot \alpha_K \cdot r_{II}. \quad (4.9)$$

Выполним расчёт потерь зерна по регрессионной модели (4.9) и математической модели сепарации (3.45) при $q_B = 2,9$ кг/с; $\alpha_K = 8^\circ$. Экспериментальные коэффициенты вариации массы зернового вороха приведены в таблице 4.4. Получена хорошая сходимость результатов, полученных по математической модели сепарации зернового вороха и регрессионной модели. Потери зерна снижены по сравнению с базовой очисткой (1,17 %) в 2,1 раза.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта потерь зерна за системой очистки с инерционным выравнивателем вороха

$r_{II}, \text{ мм}$	V_n	V_k	$P_{рас}$ (по модели сепарации)	$P_{рас}$ (по регрессионному уравнению)	$\Delta, \%$
15	0,431	0,298	0,69	0,71	2,8
20	0,431	0,214	0,55	0,55	0,0

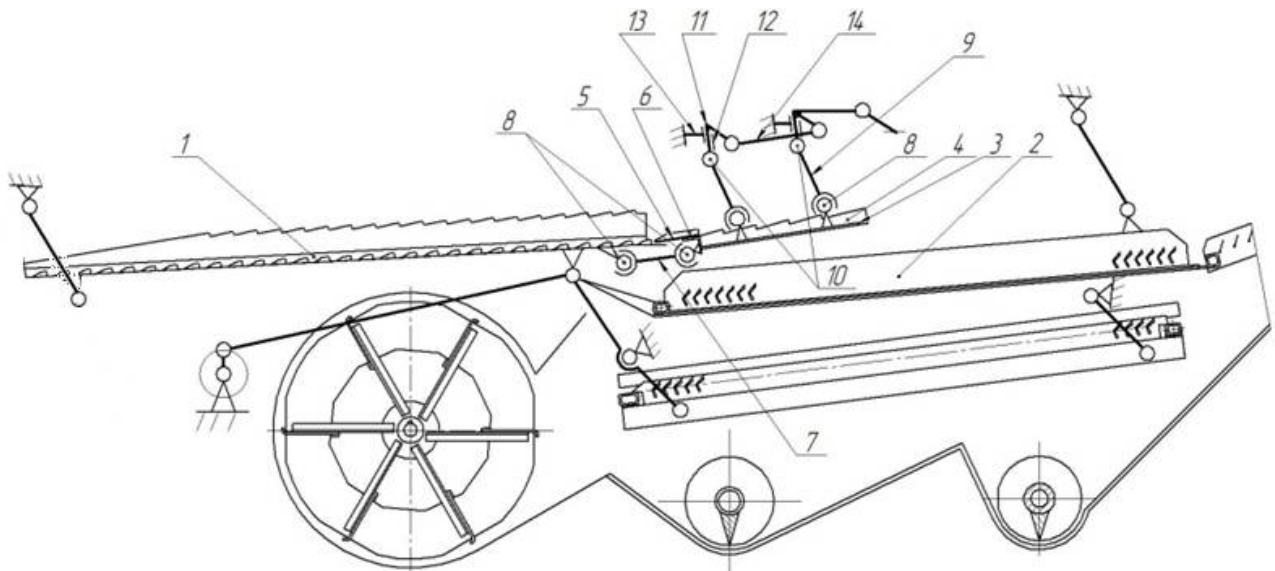
При равномерной подаче зернового вороха на верхнее решето и подаче зернового вороха 2,9 кг/с потери зерна составили 0,12 % [33, 34], что ниже по сравнению с базовой очисткой (1,17 %) в 9,8 раза.

4.5 Выравнивание толщины слоя зернового вороха путём изменения направления колебаний решета в горизонтальной плоскости

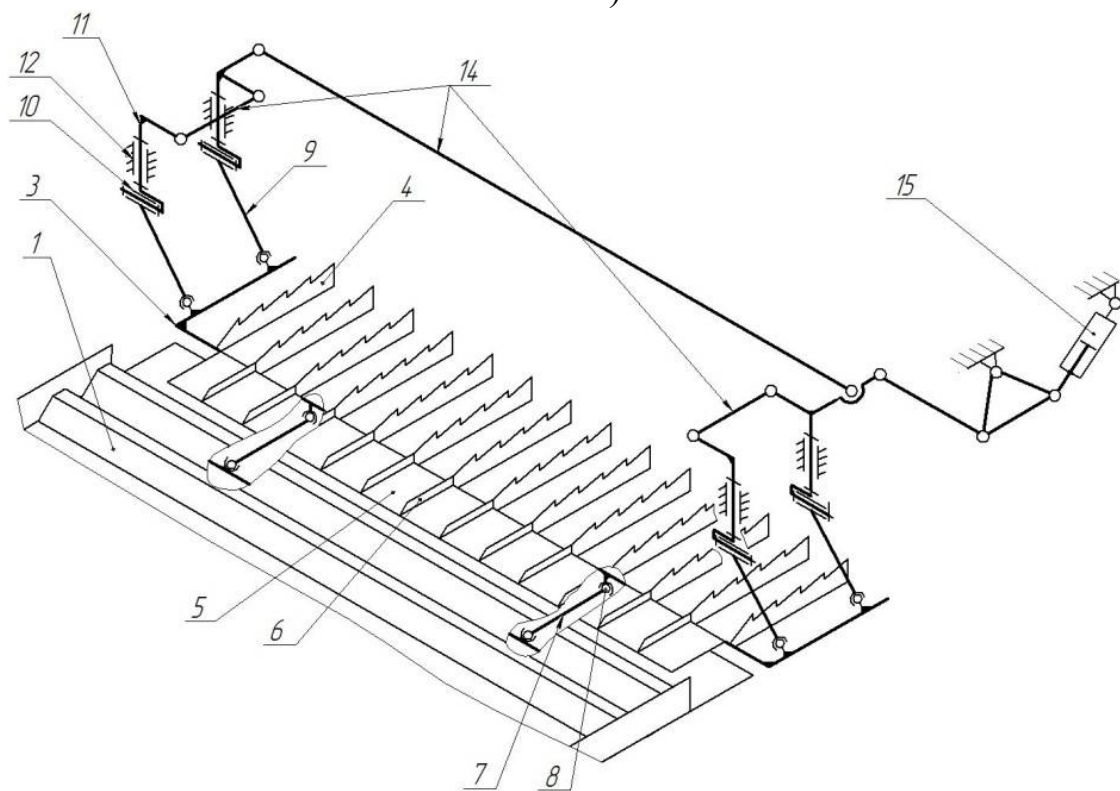
Выравнивание толщины слоя зернового вороха также можно обеспечить изменением направления колебаний решета в горизонтальной плоскости, при этом появляется поперечная составляющая колебаний, а амплитуда колебаний решета в продольном направлении уменьшается. Изменение направления колебаний решета применено в устройствах по патентам Российской Федерации № 2073411 (авторы С.Ф. Сороченко, А.М. Фролов, В.Ф. Семенов и А.Г. Колесников), № 2275787 (С.Ф. Сороченко и А.В. Рязанов) и № 2343686 (С.Ф. Сороченко, В.А. Дрюк и А.В. Рязанов).

При уменьшении продольной составляющей колебаний снижается скорость зернового вороха по решету в продольном направлении, поэтому рассматриваемый способ целесообразно использовать для выравнивания зернового вороха перед его поступлением на верхнее решето. Как было отмечено в первой главе, на пальцевой решётке 3 (см. рисунок 1.3) стрясной доски происходит выделение части зерна, а остальной зерновой ворох идёт сходом с решётки и поступает на верхнее решето. Таким образом, придав поперечные колебания

пальцевой решётке, не нарушая технологического процесса сепарации зерна, можно выравнивать толщину зернового вороха, поступающего на верхнее решето. Устройство, устанавливаемое вместо пальцевой решётки и предназначенное для выравнивания толщины зернового вороха, названо адаптером для склонов (полезная модель № 111964 РФ, авторы С.Ф. Сороченко и А.В. Рязанов). Для обеспечения устойчивого движения зернового вороха по поверхности адаптера вместо пальцев установлены продольные гребёнки с соломозацепами (рисунок 4.20).



а)



б)

Рисунок 4.20 – Схема системы очистки с адаптером (расшифровка позиций в тексте)

Адаптер для склонов включает решето, состоящее из рамы 3, к которой жёстко присоединены продольные гребёнки 4 и пластина 5 с планками 6. Пластина располагается над стрясной доской, а продольные гребёнки – над верхним решетом. Рама соединена со стрясной доской шатунами 7 и шаровыми шарнирами 8, а с молотилкой комбайна – подвесками 9, соединёнными одними концами через шаровые шарниры 8 с рамой, а другими – цилиндрическими шарнирами 10 с нижними частями поворотных рычагов 11. Поворотные рычаги соединены цилиндрическими шарнирами 12 с кронштейнами 13, установленными на молотилке, а между собой соединены тягами 14. Один поворотный рычаг соединён с устройством для изменения направления колебаний решета, которое может быть выполнено с гидравлическим (показан на рисунке 4.20) или электрическим приводом.

Колебательное движение раме 3 передаётся шатунами 7 от стрясной доски 1. При работе зерноуборочного комбайна с поперечным креном от датчика крена передаётся сигнал на устройство для изменения направления колебаний, поворотные рычаги 11 поворачиваются, что приводит к изменению направления колебаний решета. Для перемещения зернового вороха в поперечном направлении он должен отрываться от гребёнок решета, т.е. должна быть фаза полёта.

Для изменения направления колебаний решета адаптера при поперечном крене молотилки комбайна вправо или влево целесообразно применять электрической привод с использованием винтового механизма, шагового двигателя, датчика крена, датчиков положения и контроллера.

Амплитуда колебаний решета в поперечном направлении должна обеспечивать выравнивание толщины зернового вороха к концу решета адаптера. Требуемое направление перемещения зернового вороха (угол ε_T) определим по зависимости (4.8), приняв ширину решета 0,9 м, длину решета адаптера 0,4 м, длину надставки 0,1 м. Угол ν и амплитуду колебаний решета адаптера в поперечном направлении, обеспечивающих перемещение слоя вороха под заданным углом, определены по графику, приведённому на рисунке 2.29. Результаты расчёта сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5

$\alpha_K, ^\circ$	$\varepsilon_T, ^\circ$	$\nu, ^\circ$	$A_Y, \text{мм}$
6	16,9	28,1	15
8	22,1	36,8	18
10	27,0	44,9	21

Предположим, зерновой ворох, сходящий с решета адаптера (на удалении 0,4 м от начала верхнего решета), распределён по ширине верхнего решета так же, как в базовой конструкции, а в дальнейшем за счёт продольных перегородок, установленных на верхнем решете, распределение вороха сохраняется, т.е. $V_{hn} = 0,462$, $V_{hx} = 0,091$, $V_{hk} = 0,091$. Потери зерна, рассчитанные для указанных параметров по модели сепарации (формула 3.44), составили 0,21 %.

Экспериментальные исследования системы очистки с адаптером для склонов проведены на лабораторной установке «Система очистки зерноуборочного комбайна с адаптером для склонов» [124]. Исследования проведены на зерновом ворохе пшеницы сорта «Алтайская 98» с влажностью 10–12 %.

Определён шаг гребёнок адаптера, влияющий на загрузку верхнего решета зерновым ворохом. Исследования проведены при горизонтальном положении молотилки и отсутствии поперечных колебаний решета адаптера. Шаг гребёнок, при котором наблюдались минимальные потери зерна, равен 75 мм, а минимальные сход зерна и сход вороха в колосовой шнек – при шаге 50 мм (рисунок 4.21) [9, 124].

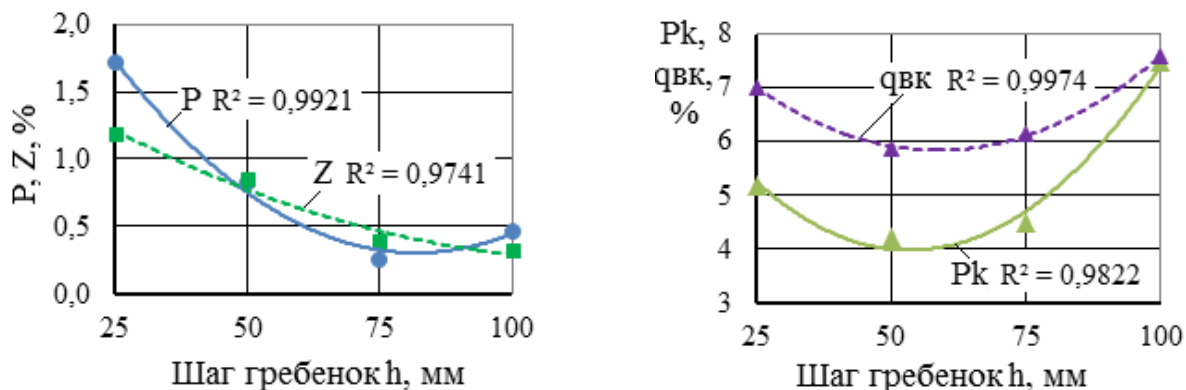


Рисунок 4.21 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером для склонов в зависимости от шага гребёнок ($\alpha_k = 0^\circ$, $q_B = 2,9$ кг/с, $C = 30\%$, $A_Y = 0$ мм)

Применение адаптера для склонов интенсифицирует сепарацию зерна при горизонтальном положении молотилки. При подаче зернового вороха 3,6 кг/с потери зерна в сравнении с базовой очисткой снизились с 0,5 до 0,42 %, обеспечивая увеличение пропускной способности системы очистки (при уровне потерь зерна – 0,5 %) с 3,6 до 3,9 кг/с, т. е. в 1,08 раза (рисунок 4.22).

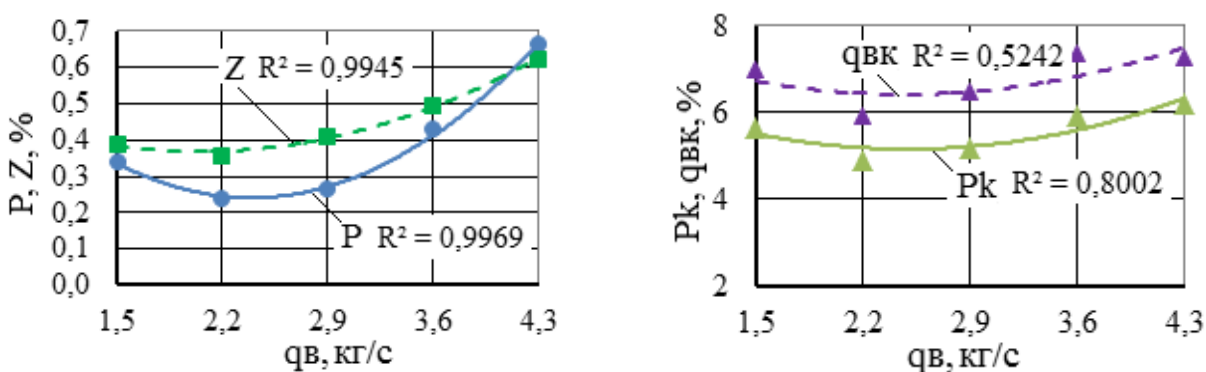


Рисунок 4.22 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером для склонов в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_k = 0^\circ$, $C = 30\%$, $h = 75$ мм, $A_Y = 0$ мм)

С увеличением содержания солоmistых примесей в зерновом ворохе качественные показатели системы очистки с адаптером ухудшаются (рисунок 4.23), причём потери зерна в рассматриваемом диапазоне увеличиваются по линейной зависимости.

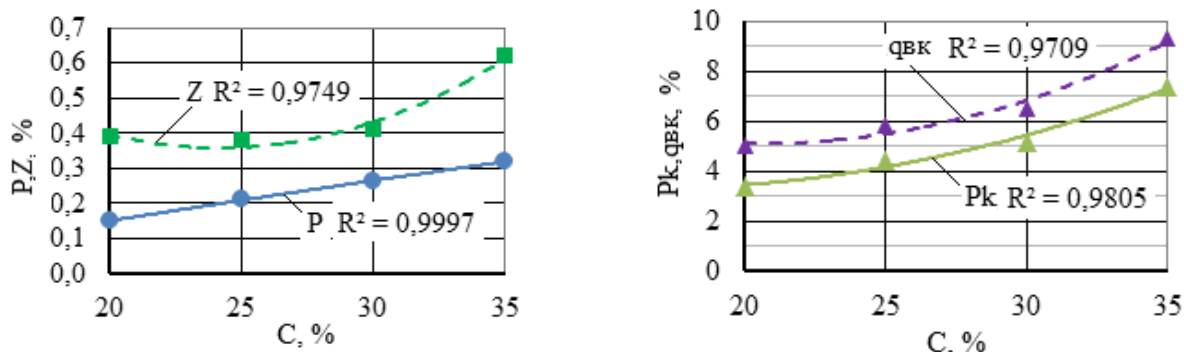


Рисунок 4.23 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером для склонов в зависимости от содержания солоистой фракции ($\alpha_k = 0^\circ$, $q_B = 2,9$ кг/с, $A_Y = 0$ мм)

При поперечном крене молотилки 8° при увеличении амплитуды колебаний решета в поперечном направлении потери зерна и засоренность бункерного зерна снижаются, а сход зерна и вороха в колосовой шнек практически остаются на одном уровне, рисунок 4.24.

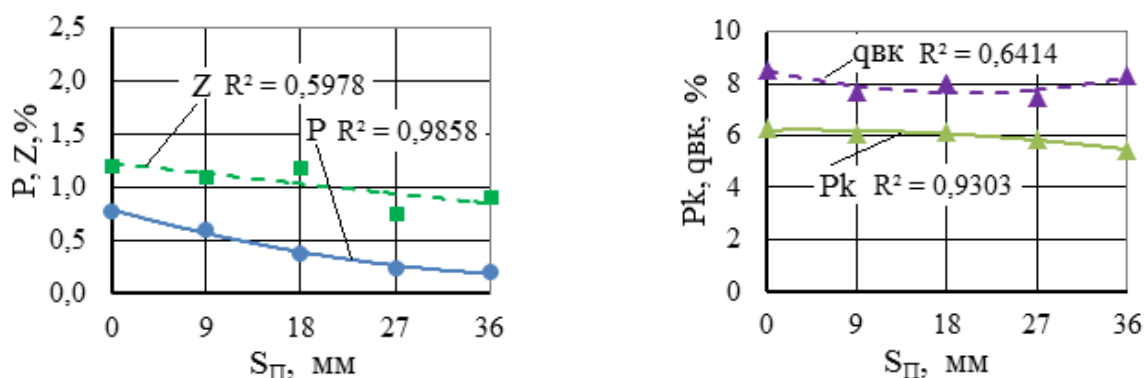


Рисунок 4.24 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером для склонов в зависимости от размаха колебаний решета в поперечном направлении ($\alpha_k = 8^\circ$, $q_B = 2,9$ кг/с, $C = 30$ %)

Минимальные потери зерна (0,21 %) наблюдались при размахе колебаний решета $S_{II} = 2A_Y = 36$ мм ($A_Y = 18$ мм, $A_X = 24$ мм, $\nu = 36,9^\circ$). Дальнейшее увеличение данного показателя невозможно из-за конструктивных особенностей верхнего решетчатого стана комбайна.

Определение рациональных параметров колебаний решета адаптера проводили с помощью метода планирования эксперимента. Основываясь на теоретических исследованиях, а также результатах однофакторных и отсеивающих экспериментов, при планировании эксперимента учтены следующие факторы: x_1 – подача зернового вороха (от 2,2 до 3,6 кг/с); x_2 – угол поперечного наклона молотилки (от 4 до 12°); x_3 – размах поперечных колебаний решета адаптера (от 0 до 36 мм). Постоянные параметры: длина решета адаптера – 400 мм; шаг гребёнок – 75 мм; содержание солоистой фракции – 30 %; влажность зернового вороха поддерживалась в интервале от 10 до 12 %.

Выходные параметры (отклики): P – потери зерна, %; Z – засоренность бункерного зерна, %; P_K – сход зерна в колосовой шнек, %.

Эксперименты проводили по композиционному, симметричному трехуровневому плану № 34 [19].

В результате дисперсионного и регрессионного анализов, проведенных по общепринятой методике [19, 21, 69], получена математическая модель, адекватно описывающая сепарацию зерна в системе очистки зерноуборочного комбайна с адаптером (расчётные значения критериев Фишера равны: для параметра $PF_{pP} = 1,26$; для параметра $Z F_{pZ} = 1,75$; для параметра $P_K F_{pZ} = 1,75$ при табличном значении $F_T = 2,2$).

После раскодирования входных параметров получены уравнения (размерность размаха поперечных колебаний – $[S_{II}]=\text{м}$) [124]:

$$P = 1,717 + 0,326 \cdot q_B^2 + 0,006 \cdot \alpha^2 + 462,963 \cdot S_{II}^2 - 1,267 \cdot q_B - 0,101 \cdot \alpha + 29,365 \cdot S_{II} + 0,020 \cdot q_B \cdot \alpha - 20,317 \cdot q_B \cdot S_{II} - 0,722 \cdot \alpha \cdot S_{II}; \quad (4.10)$$

$$Z = 2,325 + 0,322 \cdot q_B^2 - 0,006 \cdot \alpha^2 - 1030,864 \cdot S_{II}^2 - 1,547 \cdot q_B + 0,144 \cdot \alpha + 31,032 \cdot S_{II} - 0,011 \cdot q_B \cdot \alpha - 2,540 \cdot q_B \cdot S_{II} + 1,681 \cdot \alpha \cdot S_{II}; \quad (4.11)$$

$$P_K = -12,596 - 1,410 \cdot q_B^2 - 0,049 \cdot \alpha^2 + 2327,160 \cdot S_{II}^2 + 9,542 \cdot q_B + 0,752 \cdot \alpha - 110,333 \cdot S_{II} + 1,472 \cdot \alpha \cdot S_{II}. \quad (4.12)$$

Максимальные потери зерна в рассматриваемом диапазоне углов поперечного наклона молотилки получены при отсутствии колебаний решета адаптера в поперечном направлении и подаче зернового вороха 3,6 кг/с; минимальные – при максимальном размахе колебаний решета в поперечном направлении – 36 мм (рисунки 4.25, 4.26).

На рисунке 4.25 приведена поверхность отклика при крене молотилки 8° . Минимальные потери зерна в диапазоне от 0,1 до 0,2 % получены при подаче зернового вороха от 2,2 до 3,1 кг/с и размахе колебаний решета адаптера в поперечном направлении от 22 до 36 мм (амплитуда от 11 до 18 мм).

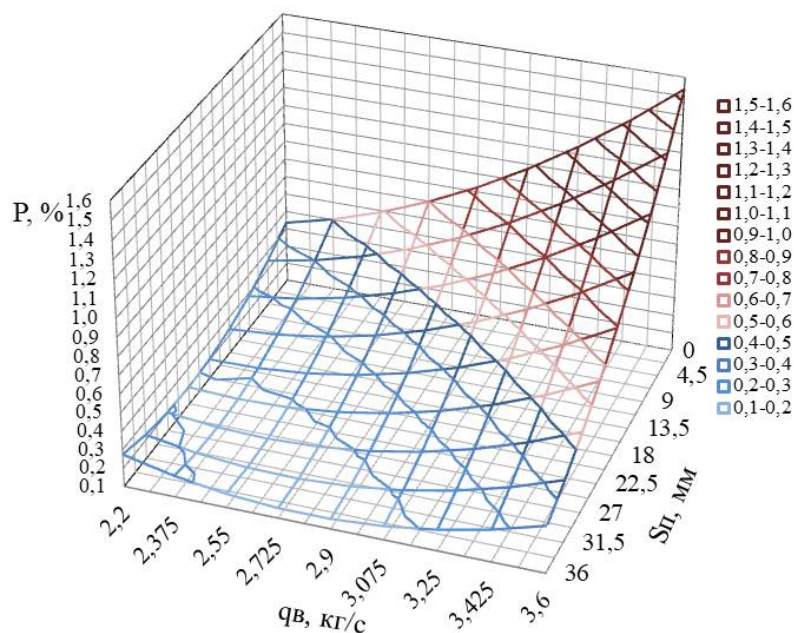


Рисунок 4.25 – Поверхность отклика P (потери зерна) системы очистки с адаптером ($\alpha_K = 8^\circ$)

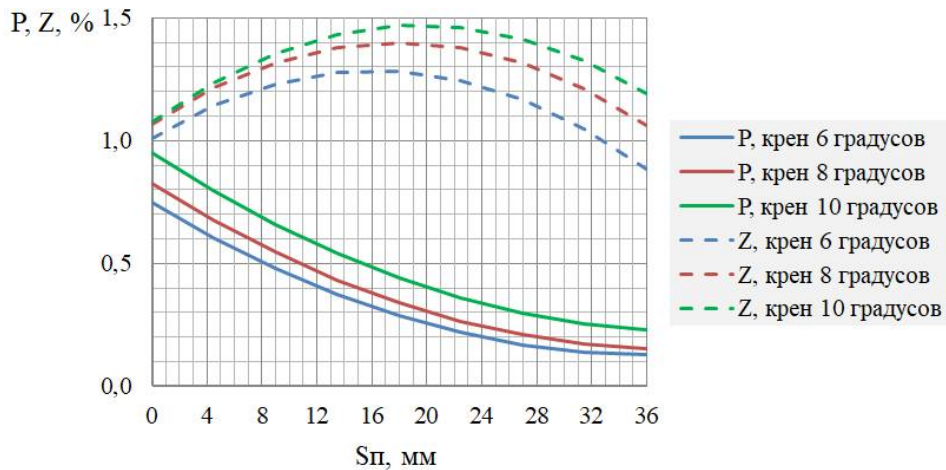


Рисунок 4.26 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером в зависимости от размаха поперечных колебаний решета ($q_B = 2,9 \text{ кг/с}$, $C = 30 \%$)

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

Проведены сравнительные лабораторные испытания системы очистки с адаптером при $\alpha_K = 8^\circ$ и $S_{II} = 36 \text{ мм}$ (рис. 4.27). Потери зерна в очистке с адаптером при подаче зернового вороха 2,9 кг/с составили 0,21 % (в серийной очистке 1,17 %), т. е. уменьшились в 5,6 раза. Относительное отклонение между теоретическим значением потерь зерна (0,23%, см. таблицу 4.1) и средним экспериментальным значением $\Delta = 9,5 \%$. При уровне потерь зерна 0,5 % в сравнении с базовой очисткой подача зернового вороха в систему очистки с адаптером увеличилась с 1,6 кг/с до 3,9 кг/с, т. е. в 2,4 раза.

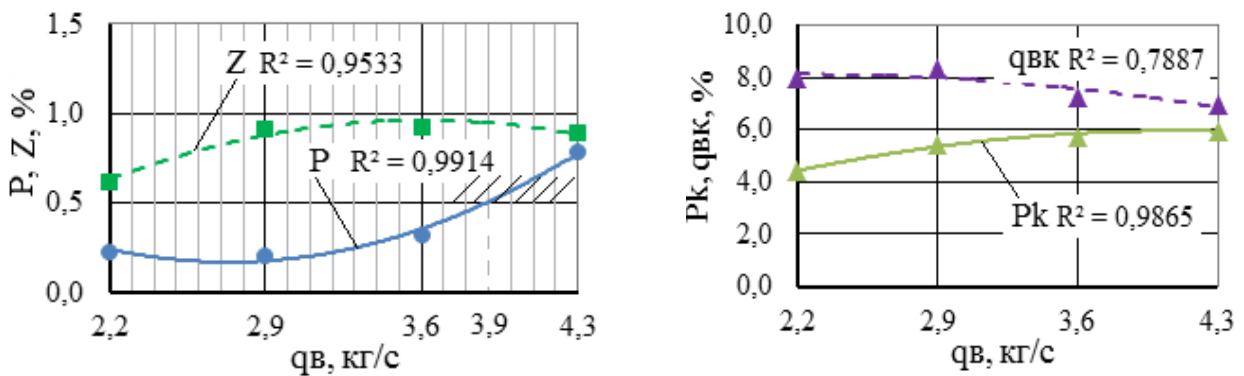


Рисунок 4.27 – Качественные показатели работы системы очистки с адаптером для склонов в зависимости от подачи зернового вороха ($\alpha_K = 8^\circ$, $C = 30 \%$, $W = 10\text{--}12 \%$, $S_{II} = 36 \text{ мм}$)

4.6 Автоматическое регулирование направления и амплитуды колебаний решета в поперечном направлении

Для автоматического регулирования направления и амплитуды колебаний решета в поперечном направлении разработано устройство, представленное на рисунке 4.28 (патент № 2343686 РФ).

Система очистки содержит решетный стан с решетом 1, установленным на каркасе 2, который связан через шаровые шарниры 3 и шатуны 4 с приводным валом 5. Решето установлено на подвесках 6, соединённых посредством шаровых шарниров 3 с каркасом 2, а цилиндрических шарниров 7 – с нижними частями поворотных рычагов 8. Поворотные рычаги соединены с помощью цилиндрических шарниров 7 с кронштейнами 9, установленными на корпусе молотилки, с поперечной 11 и продольными 10 тягами. Под решетом 1 установлены пьезодатчики 12, соединённые проводами 13 с управляющим устройством (контроллером) 14.

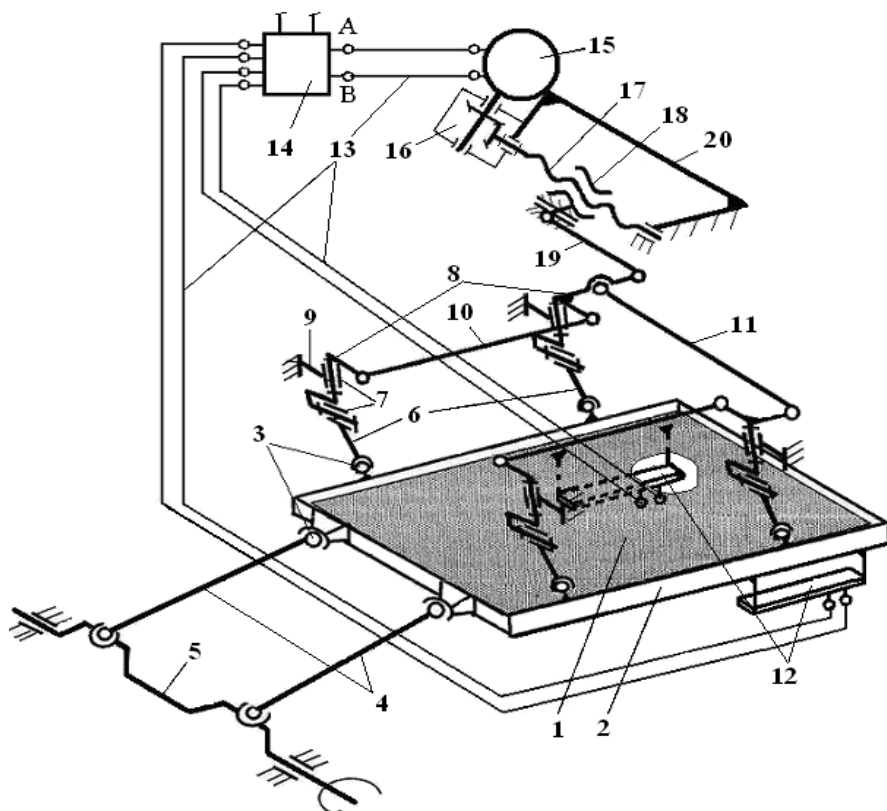


Рисунок 4.28 – Схема устройства для автоматического регулирования направления и амплитуды колебаний решета в поперечном направлении (расшифровка позиций в тексте)

Управляющее устройство соединено с электродвигателем 15 (например, шаговым), который посредством редуктора 16 соединен с винтом 17 винтового механизма. Гайка 18 винтового механизма имеет одну степень свободы и шарнирно соединена посредством тяги 19 с одним из поворотных рычагов 8. Винт 17 винтового механизма установлен с возможностью вращения в кронштейне 20, установленном на корпусе молотилки.

Направление и амплитуда колебаний решета в поперечном направлении в устройстве изменяются с учётом оценки неравномерности распределения зернового вороха, находящегося на верхнем решете. Если у одной из стенок молотилки зерновой поток, прошедший через решето, значительно превышает зерновой поток, прошедший через решето у другой боковой стенки, то это свидетельствует о неравномерном распределении зернового вороха на решете. Изме-

рение этих потоков производится пьезодатчиками 12, импульсные сигналы которых суммируются, усредняются и сравниваются в управляющем устройстве 14. Если сигналы от датчиков отличаются незначительно, меньше чем $\Delta_{ВКЛ}$, то предполагаем, что зерновой ворох распределён на верхнем решете равномерно, а направление и амплитуда поперечных колебаний решета оптимальны при данных условиях. Если сигнал от одного датчика превышает сигнал от другого на величину $\Delta_{ВКЛ}$, то от управляющего устройства подается напряжение на шаговый двигатель. При вращении вала шагового двигателя происходит перемещение гайки винтового механизма, поводка и поворотного механизма, приводящее к изменению направления качания подвесок относительно цилиндрических шарниров поворотных рычагов. Появляются поперечные колебания решетного стана, обеспечивающие перемещение зернового вороха по решету в сторону, противоположную уклону. Амплитуда поперечных колебаний решета будет увеличиваться до тех пор, пока сигналы от пьезодатчиков не станут отличаться друг от друга незначительно (не более величины $\Delta_{ВКЛ}$) или амплитуда колебаний решета не достигнет предельного значения [126].

Определим параметр $\Delta_{ВКЛ}$. Предполагаем, что при минимальном значении параметра зерновой ворох равномерно распределён по ширине верхнего решета, потери зерна также минимальные. При увеличении значения параметра увеличивается неравномерность распределения зернового вороха по поверхности решета, что требует изменения амплитуды или направления колебаний решета в поперечном направлении. На рисунке 4.29 показана зависимость потерь зерна от значения параметра: при $\Delta_{ВКЛ}=10\%$ потери зерна равны 0,3 %; при $\Delta_{ВКЛ}=12\%$ – 0,5 %.

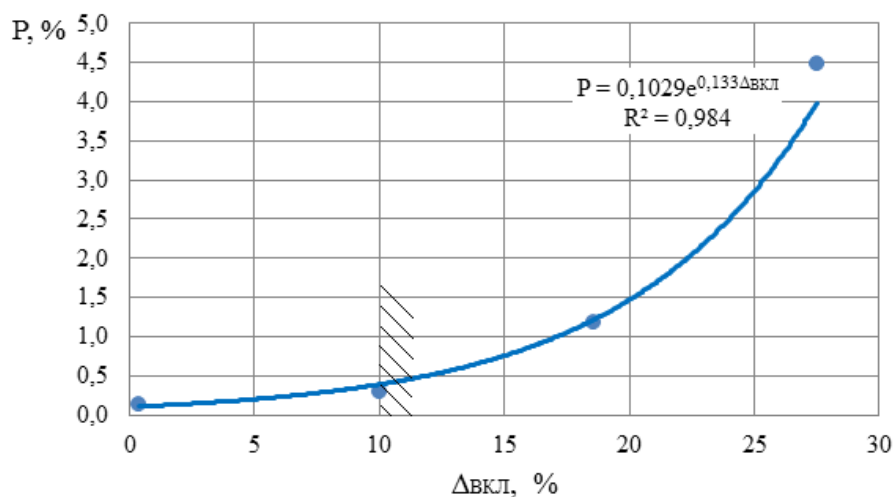


Рисунок 4.29 – Зависимость потерь зерна от параметра $\Delta_{ВКЛ}$

Таким образом, значение параметра целесообразно принять равным 10 %, что обеспечит потери зерна за системой очистки не более 0,3 %.

4.7 Оценка адекватности математической модели сепарации

Адекватность математической модели сепарации зернового вороха (формулы 3.44 и 3.45) подтверждает хорошая сходимость теоретических и экспериментальных значений потерь зерна за базовой и экспериментальными системами очистки, полученных в лабораторных и полевых условиях. Коэффициент корреляции, рассчитанный в программе М. Excel, равен $r_{xy} = 0,97$. Количество сравниваемых значений $n_{xy} = 17$. Данные для расчёта коэффициента корреляции приведены в приложении Б.

Ошибка коэффициента корреляции [21]

$$m_r = \pm \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n_{xy}}} = \pm \frac{1 - 0,97^2}{\sqrt{17}} = 0,014. \quad (4.13)$$

Выполнение условия $r_{xy} = 0,97 > 3 \cdot m_r = 0,042$ подтверждает надежность полученного значения.

Также выполнена проверка адекватности математической модели сепарации зернового вороха сравнением теоретических и экспериментальных значений потерь зерна за базовой и экспериментальными системами очистки, полученных в лабораторных условиях (Приложение Б, опыты с № 1 по № 13). Оценку сходимости результатов проводили по F-критерию.

Проверка однородности дисперсий проведена по общепринятой методике [69]. С увеличением средних значений потерь зерна дисперсии увеличиваются, поэтому для выполнения условия однородности дисперсий проведены преобразования вида $P_1 = \sqrt{P - 0,1}$.

Результаты проверки однородности дисперсий (количество повторений опытов равно трём): степень свободы $f_{p1} = 2$; степень свободы $f_{p2} = 26$; дисперсия ошибки эксперимента $\sigma_p^2 = 0,0583$; дисперсия ошибки эксперимента после преобразований $\sigma_{\sqrt{P-0,1}}^2 = 0,01084$; расчётное значение критерия Кохрена $G_p = 0,220$; табличное значение $G_{0,05} = 0,223$ при уровне значимости 0,05. Гипотеза однородности дисперсий при уровне значимости 0,05 подтверждена.

Расчёт дисперсии неадекватности σ_{LF}^2 математической модели и F-критерия проводили по общепринятой методике [69]. Количество изменяемых факторов равно трём – подача зернового вороха q_B , угол наклона молотилки α_K и конструктивная схема системы очистки. Результаты расчёта: при степени свободы $f_{p1} = 9$ и $f_{p2} = 26$ дисперсия неадекватности математической модели $\sigma_{LF}^2 = 0,02114$; расчётное значение критерия $F_{рас} = 1,95$; табличное значение критерия $F_{0,05} = 2,27$ для уровня значимости 0,05. Таким образом, расчётное значение F-критерия меньше табличного при уровне значимости 0,05 и гипотеза об адекватности модели сепарации зернового вороха подтверждена.

Глава 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

5.1 Конкуренентоспособность предлагаемых систем очистки

Выполним, основываясь на результатах лабораторных исследований, сравнительный анализ разработанных очисток зерноуборочного комбайна [103]:

- с решетно-винтовым сепаратором (1 схема);
- с двухсекционным верхним решетом (2 схема);
- с самоустанавливающимся верхним решетом (3 схема);
- комбинированной очистки с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом (4 схема);
- с инерционным выравнивателем зернового вороха на верхнем решете (5 схема);
- с адаптером для склонов (6 схема).

Особенности конструкций и настроек очисток:

- в базовой очистке на стрясной доске установлены две продольные гребёнки (перегородки) высотой 50 мм;
- в базовой очистке с перегородками установлены три продольные перегородки высотой 130 мм на стрясной доске и увеличены до 130 мм продольные перегородки на верхнем решете;
- параметры системы очистки с решётно-винтовым сепаратором (1 схема): количество шнеков – 4 шт.; частота вращения шнеков – 330 мин^{-1} ; положение направителя воздуха в патрубке вентилятора (доля нижней части) – 0,3; продольный угол наклона нижнего решета к горизонту – 4° ;
- в системе очистки с двухсекционным верхним решетом (2 схема): на стрясной доске установлены три перегородки высотой 130 мм; секция, расположенная ниже, установлена под углом 12° ;
- предельный угол установки самоустанавливающегося верхнего решета (3 схема) относительно решётного стана равен 6° ; на стрясной доске установлены две продольные перегородки высотой 130 мм;
- в системе очистки с инерционным выравнивателем вороха (5 схема) амплитуда поперечных колебаний решета равна 20 мм;
- параметры системы очистки с адаптером (6 схема): длина решета адаптера – 400 мм, шаг гребёнок – 75 мм; амплитуда колебаний решета адаптера в поперечном направлении – 18 мм.

Общие регулировочные параметры очисток приведены в таблице 5.1.

Сравнение работы очисток с базовой очисткой проведены по потерям зерна при поперечном наклоне лабораторной установки на угол 8° (рисунок 5.1). Содержание соломистых примесей в сравниваемых очистках не превышало 2 %.

Таблица 5.1 – Регулировочные параметры очисток

Наименование параметра, размерность	Схемы очисток						
	Базовая (базовая с перегородками)	1	2	3	4	5	6
Зазор между жалюзи решёт, мм верхнего нижнего	13	13	13	12	13	12	15
	9	10	10	9	9	9	10
Частота вращения вентилятора, мин ⁻¹	600	660	600	640	690	600	630

Оценка разработанных очисток выполнена с помощью интегрального показателя конкурентоспособности машины k_M в соответствии с ГОСТ Р 53057-2008 «Машины сельскохозяйственные. Методы оценки конкурентоспособности» [103, 113].

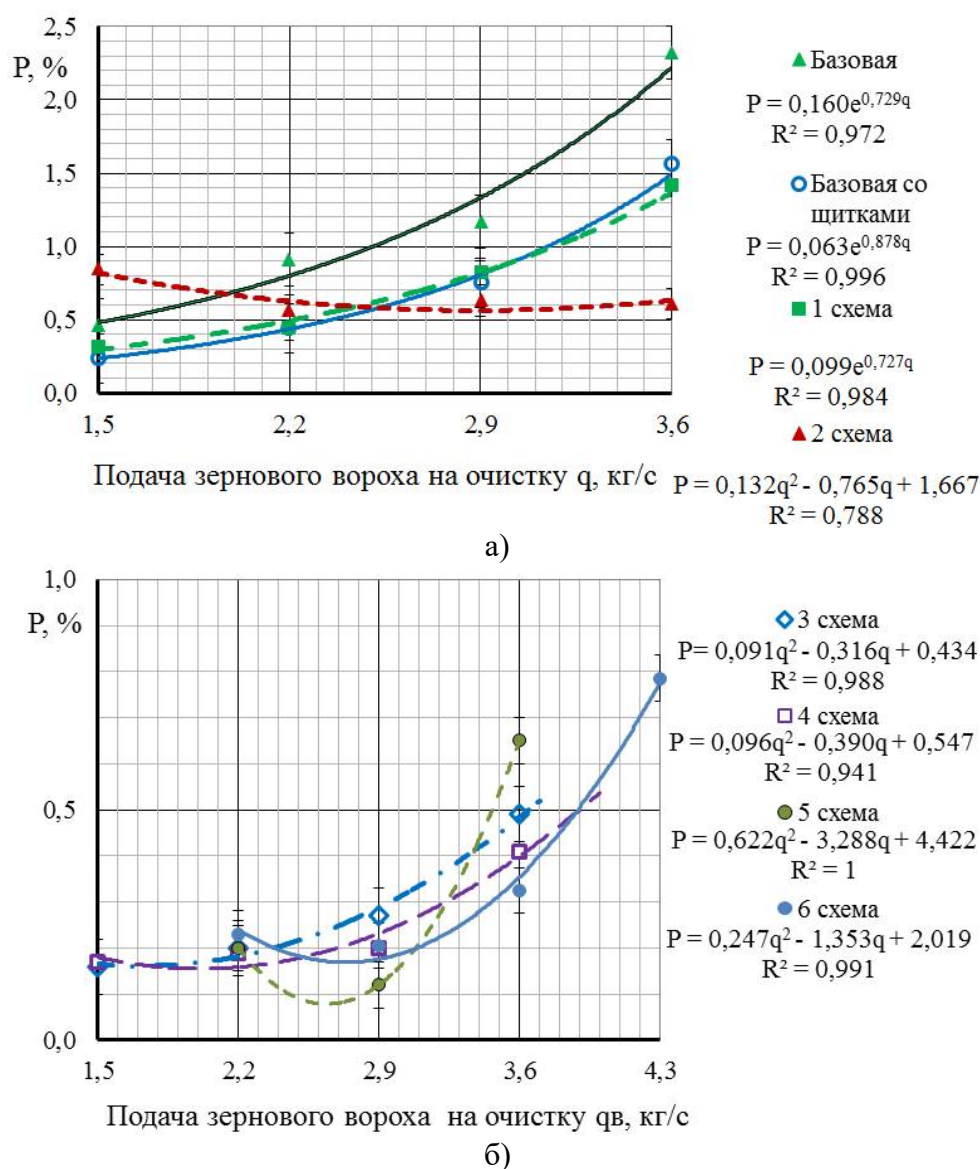


Рисунок 5.1 – Результаты сравнительных лабораторных исследований очисток

При оценке очисток учтены факторные коэффициенты цены k_1 и производительности k_3 конкурирующей машины

$$k_M = k_1 \cdot \gamma_1 + k_3 \cdot \gamma_3, \quad (5.1)$$

где γ_1, γ_3 – значения удельных весов факторных коэффициентов значимости.

Значения удельных весов приняты: $\gamma_1 = 0,5$, $\gamma_3 = 0,5$.

Приняв цену машин прямо пропорционально их массе, коэффициент k_1 равен

$$k_1 = \frac{B_B}{B_K} = \frac{M_B}{M_K}, \quad (5.2)$$

где B_B, B_K – цена базовой и конкурирующей машины соответственно; M_B, M_K – масса базовой и конкурирующей машины соответственно.

Коэффициент k_3

$$k_3 = \frac{q_{BK}}{q_{BB}}, \quad (5.3)$$

где q_{BB}, q_{BK} – подача зернового вороха в базовой и исследуемой очистках соответственно при принятом уровне потерь зерна (0,5 %).

Массы комбайнов с разработанными очистками рассчитаны по массе зерноуборочного комбайна СК-5М «Нива» и массе опытных образцов очисток. Результаты расчёта сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчёта интегрального показателя конкурентоспособности предлагаемых технических решений

Схема очистки	Масса комбайна, кг	Подача, кг/с	k_1	k_3	k_M
Базовая	7320,0	1,55	1	1	-
Базовая со щитками	7329,0	2,35	0,998	1,516	1,26
1	7445,5	2,2	0,983	1,419	1,20
2	7335,3	0	0,998	0	-
3	7326,2	3,6	0,999	2,323	1,66
4	7460,8	3,9	0,981	2,516	1,75
5	7359,0	3,45	0,995	2,226	1,61
6	7353,3*	3,9	0,996	2,516	1,76

Примечание – масса комбайна с адаптером рассчитана с учётом массы приводного механизма

По ГОСТ Р 53057-2008 значение показателя свыше 1,3 свидетельствует о высоком уровне конкурентоспособности машины, таким образом, наиболее конкурентоспособные схемы очисток – комбинированная очистка с решётно-винтовым сепаратором и самоустанавливающимся верхним решетом (4 схема; показатель конкурентоспособности равен 1,75) и очистка с адаптером для склонов (6 схема; 1,76).

5.2 Сравнительные лабораторно-полевые испытания системы очистки с решётно-винтовым сепаратором

Очистка с решётно-винтовым сепаратором испытана в хозяйстве «Санниковский» Алтайского края [123] и на Алтайской машиноиспытательной станции [87]. Испытания проведены на зерноуборочном комбайне третьего класса СК-5М, в котором вместо серийной очистки установлена очистка с решётно-винтовым сепаратором.

Решётно-винтовой сепаратор состоит из четырёх шнеков *1* и волнообразного днища *2* с перфорированной зоной *3*, над которой на шнеках установлены радиальные лопатки *4*, а по наружной кромке шнеков закреплена эластичная лента (рисунок 5.2). Шнеки поочередно имели левую и правую навивку винтовых поверхностей. Под перфорированной зоной днища расположена укороченная стрясная доска *5*, которая в передней части установлена на подвесках, а в задней – шарнирно связана с верхним решетом и двуплечим рычагом привода очистки.

Под стрясной доской установлен вентилятор *6*, опущенный на 40 мм по сравнению с серийной очисткой, и имеющий дополнительный выходной канал *7*, направляющий воздушный поток под перфорированную зону днища. В дополнительном канале, повторяя его конфигурацию, установлена перегородка *8*. В основном воздушном канале установлен воздухонаправительный щиток *9*, положение которого регулируется и позволяет изменять направление воздушного потока, поступающего на очистку. За стрясной доской под днищем шнекового транспортёра установлен отражательный щиток *10*, имеющий эластичную часть, которая помещена между передней планкой верхнего решета и толкателями *11*, жестко установленными на стрясной доске.

Нижнее решето *12* в передней части удлинено относительно серийного на 7 см и установлено в нижнее регулировочное отверстие. Шнеки приводились от верхнего вала наклонной камеры (с левой стороны) посредством двух цепных передач и конического редуктора (рисунок 5.3). Техническая характеристика экспериментальной очистки приведена в таблице 5.3.

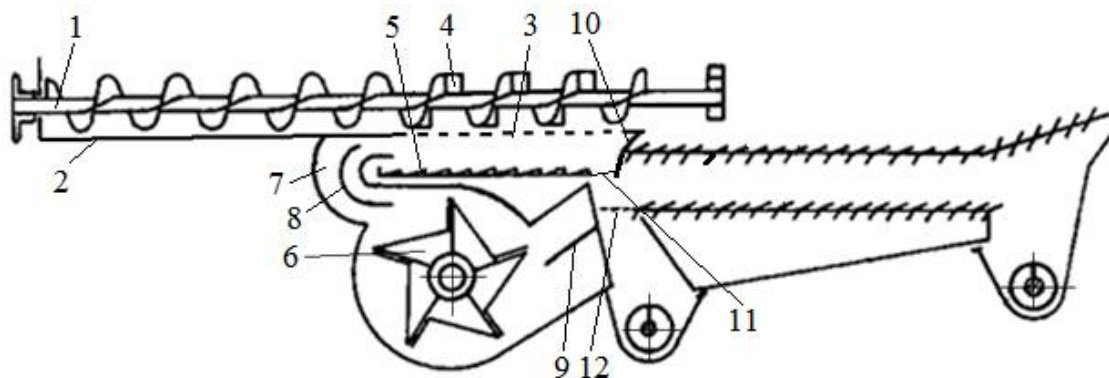


Рисунок 5.2 – Схема экспериментальной очистки с решётно-винтовым сепаратором (расшифровка позиций в тексте)

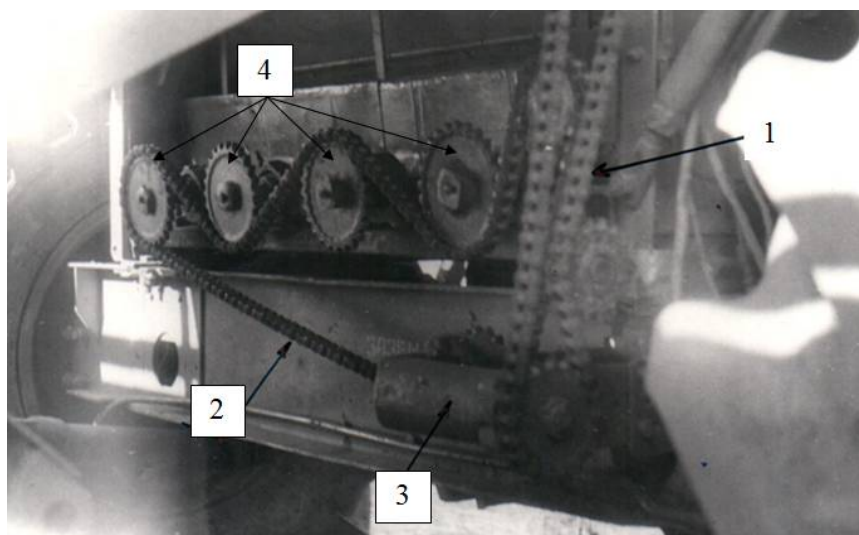


Рисунок 5.3 – Привод шнеков: 1,2 – цепь; 3 – конический редуктор; 4 – звёздочки

Таблица 5.3 – Техническая характеристика очистки с решётно-винтовым сепаратором

Наименование параметра	Значение
Число шнеков, шт	4
Шаг винтовой поверхности шнеков, мм	150
Диаметр шнеков, мм	150
Частота вращения шнеков, мин ⁻¹	330
Длина винтовой поверхности шнеков, мм	2000
Шаг установок лопаток, мм	100
Число лопаток на одном шнеке, шт	8
Ширина лопаток, мм	60
Ширина перфорированной зоны днища (по дугам), мм	880
Длина перфорированной зоны днища, мм	900
Диаметр отверстий перфорированного днища, мм	12
Частота вращения вентилятора, об/мин	от 530 до 850
Дополнительная масса комбайна, кг	125,5

Условия полевых испытаний: культура – яровая пшеница, сорт «Омская 9»; урожайность – 23,7 ц/га; коэффициент вариации урожайности – 15,47 %; отношение массы зерна к массе соломы над фактической высотой среза – 1:0,87; масса 1000 семян – 17,19 г; влажность зерна – 11,4 %; влажность соломы – 9,5 %; тип валка – одинарный; масса одного метра валка от 6,8 до 7,5 кг; расстояние между валками – 9,35–9,0 м; засоренность культуры над фактической высотой среза – от 4,3 до 12,5 %; высота среза (высота стерни) – 17,5 см; ширина захвата жатки – 10,51–10,54 м.

Испытаниями установлено:

- дробление и содержание сорной примеси в бункерном зерне находится в одних пределах как на испытываемом, так и на сравниваемом комбайне;
- показатели потерь зерна за очисткой по испытываемому комбайну ниже, чем у сравниваемого, при оптимальной загрузке в 3,4 раза (рисунок 5.4).

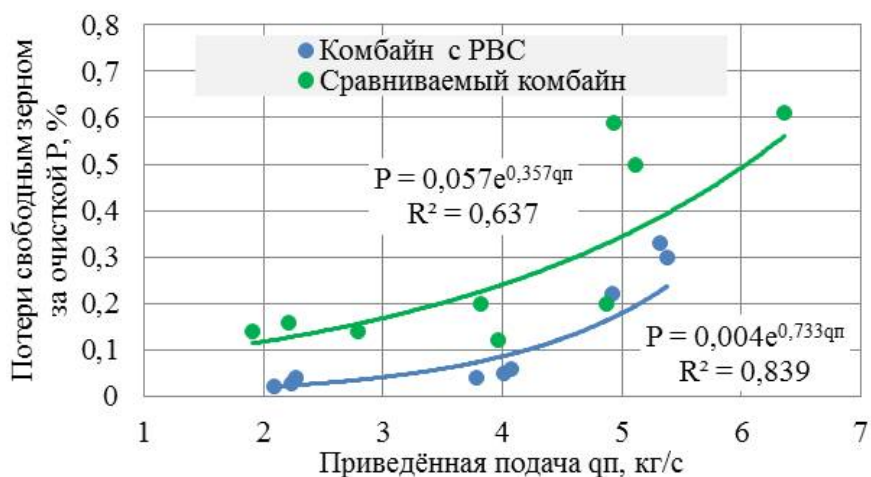


Рисунок 5.4 – Графики зависимости потерь свободным зерном за системой очистки от приведённой подачи хлебной массы

5.3 Сравнительные лабораторно-полевые испытания системы очистки с адаптером для склонов

Полевые испытания адаптера очистки проведены в фермерском хозяйстве Калманского района Алтайского края [94, 107]. Испытания проведены на зерноуборочном комбайне «Енисей 1200-1» (рисунок 5.5).

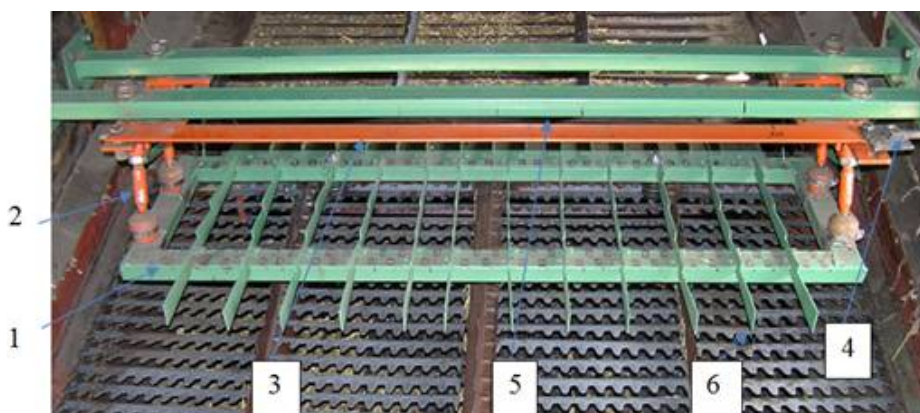


Рисунок 5.5 – Адаптер системы очистки, установленный в зерноуборочный комбайн «Енисей 1200-1»: 1 – рама решета; 2 – подвеска; 3 – поперечная тяга; 4 – тяга механизма изменения амплитуды и направлений колебаний решета; 5 – поперечная балка; 6 – гребенка решета

Таблица 5.4 – Краткая техническая характеристика адаптера

Наименование параметра	Значение
Длина решета адаптера, мм	400
Шаг гребёнок решета, мм	75
Амплитуда колебаний решета адаптера (мм):	
- в поперечном направлении	от 0 до 18
- в продольном направлении	от 0 до 24

Условия испытаний: культура – яровая пшеница; сорт «Алтайская 98»; урожайность – 13,2 ц/га; коэффициент вариации урожайности – 13,02 %; отношение массы зерна к массе соломы над фактической высотой среза – 1:1,27; масса 1000 семян – 22,3 г; влажность зерна – 12,6 %; влажность соломы – 10,4 %; тип валка – одинарный; масса одного метра валка – 1,9 кг; высота среза (высота стерни) – 18 см; ширина захвата жатки – 6,0 м.

Среднее содержание соломистой фракции в зерновом ворохе при проведении полевых испытаний $C = 53\%$ ($\sigma_C = 4,5\%$).

Испытания проведены при движении комбайна преимущественно вверх по склону с одновременным креном вправо. В таблице 5.5 представлены значения статистических параметров, характеризующих уклон поля α_M – поперечный уклон; δ_M – продольный уклон. Испытания проведены на одном комбайне в следующих комплектациях и настройках: 1 – серийная очистка; 2 – очистка с адаптером, $A_Y = 0$ мм; 3 – очистка с адаптером, $A_Y = 15$ мм (рисунок 5.6).

Таблица 5.5 – Характеристика поля, градусы

Параметр	Базовая очистка		Очистка с адаптером, $A_Y = 0$ мм		Очистка с адаптером, $A_Y = 15$ мм	
	α_M	δ_M	α_M	δ_M	α_M	δ_M
Среднее значение	5,1	2,6	5,1	1,5	5,3	1,7
Среднеквадратичное отклонение	0,8	1,1	0,9	1,7	0,8	1,5
Максимальное значение	6,0	4,1	7,3	4,0	6,2	4,1
Минимальное значение	4,0	0,8	3,6	-2,4 *	4,0	-2,1 *

Примечание. Знак «минус» – движение комбайна вниз по склону



Рисунок 5.6 – Результаты сравнительных полевых испытаний зерноуборочного комбайна с адаптером очистки для склонов

Испытаниями выявлено, что дробление и содержание сорной примеси в бункерном зерне находились в одних пределах как на испытываемом, так и на сравниваемом комбайне. Использование адаптера очистки в зерноуборочном комбайне позволило значительно снизить потери зерна в сравнении с базовой конструкцией. Так, при подаче зернового вороха на очистку 2,0 кг/с и амплитуде поперечных колебаний решета 15 мм потери зерна снизились с 4,5 до 0,73 %, а при подаче зернового вороха 2,5 кг/с – с 8,10 до 1,24%, т.е. более чем в 6 раз. Установленный уровень потерь зерна (0,5 %) за системой очистки с адаптером для склонов достигнут при подаче зернового вороха на очистку 1,64 кг/с. При этой же подаче зернового вороха потери зерна за системой очистки сравниваемого комбайна составили 4,0 %.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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

2. Разработанные математические модели движения зернового вороха по решету в условиях работы комбайна на склонах позволили определить:

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

- возможность сохранения условий для прохода зерна и схода соломистых примесей, находящихся на жалюзи решета, путём изменения угла открытия жалюзи при изменении продольного наклона молотилки (предложение реализовано в системе компенсации продольного уклона 4D зерноуборочного комбайна TORUM 785 ООО «КЗ Ростсельмаш»): при движении комбайна вверх по склону – увеличением зазора; при движении вниз – уменьшением зазора;

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

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

3. Разработанная математическая модель сепарации зернового вороха на верхнем решете системы очистки в условиях работы комбайна на склонах,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сравнительными лабораторно-полевыми испытаниями системы очистки с адаптером для склонов установлено, что потери зерна при оптимальной загрузке ниже, чем у сравниваемого, более чем в 6 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулвалеев, Р. Р. Влияние рельефа на режим увлажнения почвы и урожайность яровой пшеницы и ячменя / Р. Р. Абдулвалеев, В. Б. Троц // *Зерновое хозяйство России*. – 2015. – № 3. – [Электронный ресурс]. – URL : [http://www.zhros.ru/num39\(3\)_2015/15Abdu.html](http://www.zhros.ru/num39(3)_2015/15Abdu.html).
2. Авдеев, Н. Е. Теоретическое и экспериментальное исследование работы клавишных соломотрясов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Е. Авдеев. – Москва, 1961. – 16 с.
3. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий: метод. руководство / Под ред. В. И. Кирюшина и А. Л. Иванова. – Москва, 2005. – 784 с.
4. Алферов, С. А. Воздушно-решетные очистки зерноуборочных комбайнов / С. А. Алфёров. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 160 с.
5. Анисимов, В. А. Исследование и обоснование параметров двухпоточной очистки к двухбарабанному комбайну: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Анисимов. – Кировобад, 1978. – 22 с.
6. Бабаев, М. М. Обоснование параметров пневмоцентробежного сепаратора двухпоточной очистки зерноуборочного комбайна: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / М. М. Бабаев. – Москва, 1988. – 16 с.
7. Баев, В. В. Обоснование параметров молотилки зерноуборочного комбайна методом имитационного моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Баев. – Краснодар, 1986. – 24 с.
8. Барашев, С. М. Исследование технологического процесса работы зерноочистки с пространственным решетом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. М. Барашев. – Ростов-на-Дону, 1971. – 23 с.
9. Барсуков, А. С. Адаптер системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / А. С. Барсуков, В. С. Паршуков, А. В. Рязанов, С. Ф. Сороченко // 57 науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та, посвященная 200-летию транспортного образования в России. Ч. 1 ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 95–96.
10. Бекаров, А. Д. Параметры и режимы работы конвейерной очистки зерноуборочного комбайна для районов повышенного увлажнения : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Д. Бекаров. – Ленинград–Пушкин, 1987. – 16 с.
11. Белашев, С. В. Система очистки зерноуборочного комбайна для работы на пологих склонах / С. В. Белашев, В. А. Дрюк, С. Ф. Сороченко // 57-ая науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та. Автотракторный факультет. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – С. 78.
12. Белинский, А. В. Некоторые проблемы обоснования параметров систем динамического выравнивания слоя вороха при боковых кренах зерноуборочного комбайна / А. В. Белинский // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2009. – Т. 4. – № 3 (13). – С. 143–146.

13. Белов, М. И. Математическая модель движения частицы по решетке очистки / М. И. Белов, В. Н. Романенко, В. И. Славкин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 8. – С. 33–36.
14. Бердышев, В. Е. Влияние неравномерности подачи вороха на качество работы очистки зерноуборочного комбайна / В. Е. Бердышев // Земледельческая механика : сб. науч. трудов МИИСП. – Москва, 1980. – С. 78–82.
15. Бердышев, В. Е. Влияние типа устройства, транспортирующего мелкий ворох, на потери зерна очисткой аксиально-роторного зерноуборочного комбайна / В. Е. Бердышев, С. Г. Ломакин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2017. – № 7. – С. 186–190.
16. Бердышев, В. Е. Обоснование параметров транспортёрно-колебательной очистки зерноуборочного комбайна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Бердышев Виктор Егорович. – Москва, 1983. – 16 с.
17. Биэниек, Е. Влияние наклона местности на потери зерна, собираемого комбайном, оснащённым двухплоскостным ситом / Е. Биэниек // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2007. – № 10. – С. 102–105.
18. Блинов, Д. А. Обоснование закономерностей взаимодействия соломистого вороха со струйным воздушным потоком : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Блинов Денис Александрович. – Ростов-на-Дону, 2004. – 19 с.
19. Бродский, В. З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова и др. – Москва : Металлургия, 1982. – 752 с.
20. Василенко, И. Ф. Зерновые комбайны СССР и зарубежных стран / И. Ф. Василенко, Н. Е., Авдеев, А. Ф. Морозов и др. – Москва : Госиздат, 1958. – 295 с.
21. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – Москва : Колос, 1973. – 199 с.
22. Гаевая, Э. А. Продуктивность севооборотов на эрозионноопасных склонах Ростовской области / Э. А. Гаевая, И. В. Сафонова // Зерновое хозяйство России. – 2014. – № 3. – [Электронный ресурс]. – URL : [http://www.zhros.ru/nim33\(3\)2014/14Gaev.html](http://www.zhros.ru/nim33(3)2014/14Gaev.html).
23. Гольтяпин, В. Я. Анализ пропускной способности зерноуборочных комбайнов / В. Я. Гольтяпин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2002. – № 12. – С. 17–22.
24. Гольтяпин, В. Я. Технологические и технические решения совершенствования уборки зерновых культур / В. Я. Гольтяпин / Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 7. – С. 48–52.
25. Горбачев, И. В. Результаты испытаний пневмоцентробежного сепаратора зернового вороха / И. В. Горбачев, М. М. Бабаев, А. В. Сиротин // Сб. науч. трудов / Совершенствование технологий и технических средств для уборки и послеуборочной обработки зерновых культур. – Челябинск, 1983. – С. 76–80.
26. Горячкин, А. М. Сепарация зернового вороха в двухпоточной очистке комбайна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Горячкин Антон Михайлович. – Москва, 2002. – 22 с.

27. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – Москва : Машиностроение, 1972. – 81 с.

28. Гришкевич, П. Н. Основные параметры и режимы работы дополнительного грохота для обогащения вороха перед очисткой зерноуборочных комбайнов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Гришкевич Петр Николаевич. – Ленинград–Пушкин, 1981. – 19 с.

29. Гурьев, Е. А. Исследование возможностей интенсификации технологического процесса очистки зерноуборочного комбайна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Гурьев Евгений Алексеевич. – Омск, 1974. – 25 с.

30. Давыдов, А. М. Очистка зернокомбайна с самоустанавливающимся решетом и решётно-винтовым сепаратором для работы на склонах / А. М. Давыдов, Е. Е. Костоглодов, С. Ф. Сороченко // 59-ая науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та, посвященная 60-летию Автотракторного факультета АлтГТУ. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2001. – С. 99–100.

31. Долгов, И. А. Влияние условий уборки на конструкцию зерноуборочного комбайна / И. А. Долгов, В. И. Иванцов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. – № 6. – С. 27–29.

32. Дрюк, В. А. Математическое моделирование движения зернового вороха с динамическим разравниванием по решетку системы очистки зернокомбайна / В. А. Дрюк, С. Ф. Сороченко // Вестник ДГТУ. – 2008. – Т. 8. – № 2. – С. 113–119.

33. Дрюк, В. А. Определение качественных показателей работы очистки зернокомбайна с приспособлением для склонов / В. А. Дрюк, М. А. Петров, М. Д. Лустов, С. Ф. Сороченко // 61-я науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава. Ч. 6. Автотракторный факультет; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – С. 3–4. [Электронный ресурс]. – URL : <http://edu.secna.ru/media/f/6atf.pdf>.

34. Дрюк, В. А. Параметры выравнивателя вороха на решетках очистки зерноуборочного комбайна : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Дрюк Виктор Андреевич. – Барнаул, 2006. – 27 с.

35. Дымченко, Н. Д. Повышение пропускной способности органов очистки зерноуборочных комбайнов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Д. Дымченко. – Челябинск, 1965. – 21 с.

36. Ермольев, Ю. И. Моделирование процесса функционирования центробежных вентиляторов в воздушно-решётной очистке зерноуборочного комбайна / Ю. И. Ермольев, Д. К. Муратов // Вестник Донского. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 11. – № 8 – 1 (59). – С. 1238–1246.

37. Ермольев, Ю. И. Рациональная подсистема операций и технических средств для интенсификации процесса сепарации мелкозернового вороха в зерноуборочном комбайне / Ю. И. Ермольев, Д. К. Муратов / Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 11. – № 8. – 2 (59). – С. 1372–1375.

38. Жалнин, Э. В. О гармоничности конструкции зерноуборочных комбайнов / Э. В. Жалнин // Техника в сельском хозяйстве. – 2011. – № 1. – С. 17–21.

39. Жалнин, Э. В. О переводе физических зерноуборочных комбайнов в эталонные / Э. В. Жалнин, М. Ш. Жилкибаев, В. С. Пьянов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 6. – С. 37–40.

40. Жалнин, Э. В. Обоснование параметров двухпоточной моноблочной очистки к зерноуборочному комбайну / Э. В. Жалнин, В. А. Анисимов // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – № 6. – С. 17–19.

41. Жалнин, Э. В. Определение интервалов возможных режимов движения материала по решетку зерноуборочного комбайна при наличии поперечного крена / Э. В. Жалнин, А. А. Соловейчик, Д. И. Уркинбаев. – Москва : НТБ ВИМ, 1993. – Вып. 88. – С. 12–15.

42. Жалнин, Э. В. Перспективные принципы совершенствования зерноуборочных комбайнов / Э. В. Жалнин // Тракторы и сельхозмашины. – 1986. – № 9. – С. 24–29.

43. Занько, Н. Д. Влияние условий и режимов эксплуатации на качество работы зерноуборочного комбайна / Н. Д. Занько, Н. М. Осипов // Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1998. – № 7. – С. 25–26.

44. Занько, Н. Д. Функциональная схема молотилки зерноуборочного комбайна / Н. Д. Занько // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 1. – С. 35–38.

45. Злочевский, В. Л. Сортирование зерновых материалов воздушным потоком / В. Л. Злочевский, В. П. Зайцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – № 1. – С. 22–26.

46. Зубков, В. И. Исследование сепарации грубого вороха / В. И. Зубков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 7. – С. 10–14.

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

48. Канеев, И. И. Интенсификация процесса разделения зернового вороха на очистке комбайна с переменным режимом работы верхнего решета : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. И. Канеев. – Ростов-на-Дону, 1987. – 17 с.

49. Киреев, И. В. Система очистки зернокомбайна с изменённой кинематикой верхнего решета для работы на склонах / И. В. Киреев, С. В. Белашев, С. Ф. Сороченко // 56-я науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та, посвященная 270-летию со дня рождения И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 66.

50. Кленин, Н. И. Исследования вымолота и сепарации зерна : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Кленин Николай Иванович. – Москва, 1977. – 32 с.

51. Конвейеры : справочник / Под общ.ред. Ю. А. Пертена. – Москва : Машиностроение, 1984. – 367 с.

52. Косилов, Н. И. Исследование ветро-решетной очистки зерноуборочного комбайна при двухфазном обмолоте автореф. дис. ... канд. техн. наук / Косилов Николай Иванович. – Челябинск, 1968. – 31 с.

53. Косилов, Н. И. О целесообразности применения устройств для выравнивания и дозирования зернового вороха при его разделении / Н. И. Косилов, М. Р. Думанский // Совершенствование технологий и технических средств для уборки и послеуборочной обработки зерновых культур: сб. науч. трудов ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1983. – С. 57–62.

54. Котов, А. В. Совершенствование системы очистки зерноуборочного комбайна при уборке зерновых на склонах / А. А. Котов, В. П. Чаус // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2010. – № 2 (41). – С. 3–10.

55. Краснощёков, Е. И. Исследование системы очистки зернокомбайна с самоустанавливающимся верхним решетом / Е. И. Краснощёков, К. В. Стародубов, С. Ф. Сороченко // 57-ая науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та. Автотракторный факультет. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1999. – С. 79.

56. Кузин, Г. А. Исследование процесса сепарации грубого вороха в роторных соломотрясах с активными решетками: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. А. Кузин. – Ростов-на-Дону, 1968. – 26 с.

57. Кулаков, А. Ю. Очистка зерноуборочного комбайна с выравниваем решета для работы на склонах / А. Ю. Кулаков, Е. И. Краснощёков, С. Ф. Сороченко // 56-я науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава техн. ун-та, посвященная 270-летию со дня рождения И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. – С. 66–67.

58. Лапшин, И. П. Повышение эффективности сепарирующих систем в послеуборочной обработке зерна круговыми и импульсными возбуждениями рабочих органов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Лапшин Игорь Петрович. – Челябинск, 2003. – 44 с.

59. Летошнев, М. Н. Основы теории клавишных соломотрясов / М. Н. Летошнев // Сб. науч.-техн. работ ЛСХИ. – Ленинград : Изд-во ЛСХИ, 1948. – № 5.

60. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины / М. Н. Летошнев. – Москва : Изд-во Печатный двор, 1949. – 856 с.

61. Логинов, Л. Н. Новый зерноуборочный комбайн «Кедр 1200» / Л. Н. Логинов, В. П. Гаврилов // Тракторы и сельхозмашины. – 1993. – № 3. – С. 1–5.

62. Ломакин, С. Г. Влияние наклона решёт на показатели работы очистки / С. Г. Ломакин, В. Е. Бердышев // Механическая технология с.-х. работ : сб. науч. тр. МИИСП. – Москва, 1983. – С. 109.

63. Ломакин, С. Г. Формирование парка зерноуборочных комбайнов с учётом условий уборки / С. Г. Ломакин, В. Е. Бердышев // Вестник Московского госуд. агроинженерного ун-та им. В.П. Горячкина. – 2016. – № 5 (75). – С. 7–11.

64. Максимчук, В. К. Исследование влияния неравномерности загрузки молотилки комбайна по ширине на качественные показатели работы зернового комбайна: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Максимчук Виктор Кондратьевич. – Омск, 1972. – 26 с.

65. Мартыненко, Д. С. Повышение эффективности системы очистки зерноуборочного комбайна путем применения рекуперативного привода решет и

транспортной доски : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Мартыненко Дмитрий Сергеевич. – Тюмень, 2015. – 22 с.

66. Махметов, Б. Исследование сепарации зерна битерным сепаратором грубого вороха : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Махметов Борис. – М., 1979.

67. Машанов, В. И. Обоснование конструктивных параметров и исследование режимов работы очистки двухбарабанного комбайна : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В. И. Машанов. – Челябинск, 1975. – 25 с.

68. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов и др. – М. : Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование. – Т. IV. – 16 / И. П. Ксенович, Т. П. Варламов, Н. Н. Колчин и др.; Под ред. И. П. Ксеновича. – 1998. – 720 с.

69. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Роцин. – Ленинград : Колос, 1980. – 168 с.

70. Микая, Т. Б. Ветрорешётная очистка аксиально-роторного зерноуборочного комбайна / Т. В. Микая // Тракторы и сельхозмашины. – 1990. – № 11. – С. 17–19.

71. Мильман, Б. М. Изыскание и исследование способов и средств улучшения работы очистки зерноуборочных комбайнов в условиях Северо-Запада : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Мильман Борис Моисеевич. – Уфа, 1974. – 26 с.

72. Муратов, Д. К. Относительное перемещение компонентов зернового материала по лепесткам жалюзи жалюзийного решета / Д. К. Муратов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – Т. 12. – № 7 (68). – С. 115–119.

73. Наземные тягово-транспортные системы. Энциклопедия / Ред. совет: И. П. Ксенович (пред.) и др. – М. : Машиностроение. Наземные тягово-транспортные системы / И. П. Ксенович, В. А. Гоберман, Л. А. Гоберман ; под ред. И. П. Ксеновича. – 2003. – Т. 2. – 878 с.

74. РФ в 2022 г. увеличит площади под пшеницей почти до 30 млн га (дата публикации 31.01.2022) / Интерфакс [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.interfax.ru/russia/819409> (дата обращения 16.06.2022).

75. Нелюбов, А. И. Аэродинамика тракта очистки зерноуборочного комбайна / А. И. Нелюбов, Е. Ф. Ветров, А. Ф. Поляков и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 6. – С. 34–39.

76. Нестеров, Г. А. Сравнительная оценка работы опытных зерновых комбайнов СКР-5, РКД, СК-3М / Г. А. Нестеров // Труды ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1967. – Вып. 27. – С. 175–185.

77. Оробинский, В. И. Влияние режимов работы очистки зерноуборочных комбайнов на потери зерна / В. И. Оробинский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 2. – С. 6–7.

78. Оробинский, В. И. Изучение циркуляционных процессов в молотилке зерноуборочного комбайна / В. И. Оробинский, А. П. Тарасенко, А. М. Ги-

евский // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2011. – № 2 (29). – С. 37–41.

79. Оробинский, В. И. К вопросу повышения эффективности работы очистки зерноуборочного комбайна / В. И. Оробинский, В. П. Шацкий, А. С. Корнев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2013. – № 4 (39). – С. 70–73.

80. Особов, В. И. Зерноуборочные комбайны TUCANO – именно то, что нужно / В. И. Особов // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 5. – С. 20–22.

81. Патрин, В. А. Разработка теории взаимодействия обрабатываемого зерна с рабочими органами зерноочистительных машин с позиции синергетики : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Патрин Василий Александрович. – Новосибирск, 2015. – 39 с.

82. Патрин, В. А. Синергетическая теория взаимодействия зерновой среды с плоскими решетками / В. А. Патрин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 4. – С. 26–29.

83. Пятакин, А. Я. К вопросу о взаимодействии жалюзийного решета с воздушным потоком / А. Я. Пятакин // Тракторы и сельхозмашины. – 1970. – № 8. – С. 25–26.

84. Пирожков, Д. Н. Механико-технологические основы создания кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Пирожков Дмитрий Николаевич. – Барнаул, 2012. – 34 с.

85. Плис, А. И. Mathcad 2000. Математический практикум для экономистов и инженеров : учеб. пособие / А. И. Плис, Н. А. Сливина. – Москва : Финансы и статистика, 2000. – 656 с.

86. Поляков, Г. Н. Классификация и анализ технологии уборки зерновых колосовых культур / Г. Н. Поляков, П. А. Болоев // Вестник ИрГСХА. – 2014. – № 64. – С. 107–113.

87. Протокол № 01-38-91 (900060006) предварительных испытаний опытного образца экспериментальной очистки зерноуборочного комбайна СК-5 «Нива». – Пospelиха, Алтайская зональная машиноиспытательная станция, 1991. – 10 декабря 1991. – 19 с.

88. Родионов, С. С. Оценка ошибки при допущении гармоничности возвратно-поступательного движения стана КШМ / С. С. Родионов, В. Г. Чумаков, С. И. Родионова // Техническое обеспечение технологий производства сельскохозяйственной продукции : материалы I Всеросс. науч.-практ. конференции. – Курган : Изд-во Курганской ГСХА, 2017. – С. 117–120.

89. Романенко, В. Н. Повышение эффективности работы воздушно-решётной очистки зерноуборочного комбайна : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Романенко Василий Николаевич. – Москва, 2010. – 19 с.

90. Зерноуборочные комбайны // Ростсельмаш : [официальный сайт]. – URL : <http://rostselmash.com/products/combine> (дата обращения 02.09.2022).

91. Русанов, А. И. Конструктивно-технологические основы повышения технического уровня и дальнейшего развития зерноуборочных комбайнов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. доклада: 05.20.04 / Русанов Александр Иванович. – Москва, 1991. – 64 с.

92. Русанов, А. И. Основные направления повышения пропускной способности зерноуборочных комбайнов / А. И. Русанов // Тракторы и сельхозмашины. – 1981. – № 4. – С. 21–23.

93. Рязанов, А. В. Адаптер системы очистки для работы зерноуборочного комбайна на склонах / А. В. Рязанов, С. Ф. Сороченко // Ползуновский альманах. – 2009. – № 3. – Т. 2. – С. 65–67.

94. Рязанов, А. В. Результаты полевых испытаний адаптера очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / А. В. Рязанов, С. Ф. Сороченко // 5-я Всероссийская науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» – 2008. – [Электронный ресурс]. – URL : <http://edu.secna.ru/publication/5/release/27/attachment/2/>.

95. Рязанов, А. В. Экспериментальные исследования распределения вороха по решетку зернокомбайна при наличии поперечного крена / А. В. Рязанов, А. С. Колесников, В. А. Дрюк, С. Ф. Сороченко // 61-я науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава ; Ч б. Авто-тракторный факультет ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2003. – С. 10–11 [Электронный ресурс]. – URL : <http://edu.secna.ru/media/f/6atf.pdf>.

96. Сабиев, У. К. Результаты экспериментального исследований факторов, влияющих на работу плоского решета, совершающего поперечные колебания / У. К. Сабиев, И. В. Скусанов, А. Ю. Головин // Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития : сборник материалов Национальной науч.-практ. конференции. – Омск : Изд-во Омского ГАУ, 2017. – С. 112–117.

97. Салеев, Ф. И. Ветрорешетная очистка зерноуборочного комбайна с улучшенной качественной характеристикой центробежного вентилятора : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Салеев Фарид Исмаилович. – Новосибирск, 1983. – 22 с.

98. Самойлов, С. С. Оценка конструкции системы очистки зерноуборочного комбайна, работающего на склонах / С. С. Самойлов, С. Ф. Сороченко // Горизонты образования. Научно-образовательный журнал АлтГТУ. – 2015. – Вып. 17 [Электронный ресурс]. – URL : http://edu.secna.ru/media/f/transport_sistem_tez_2015.pdf.

99. Семенов, В. Ф. Исследование двухпоточной очистки зерноуборочного комбайна / В. Ф. Семенов, Ю. В. Шалагинов, С. В. Терехин, С. Ф. Сороченко // Применение новых технологических решений и средств автоматизации при уборке зерновых культур в Сибири: науч.-техн. бюл. ; ВАСХНИЛ, Сиб. отд-ние, СибИМЭ. – Новосибирск, 1990. – Вып. 5. – С. 29–36.

100. Семенов, В. Ф. Очистка зернокомбайна для работы на пологих склонах / В. Ф. Семенов, С. Ф. Сороченко, А. М. Фролов // Труды Алтайского гос.

техн. ун-та им. И.И. Ползунова ; Вып. 6; Техника и технология зерна и плодов Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1996. – С. 168–174.

101. Семенов, В. Ф. Результаты стендовых испытаний очистки для работы комбайна на склонах / В. Ф. Семенов, С. Ф. Сороченко, А. М. Фролов, В. А. Эбель // Проблемы автоматизации и технологии в машиностроении : тезисы докл. науч.-техн. конференции. – Рубцовск, 1994. – С. 235–237.

102. Серый, Г. Ф. Зерноуборочные комбайны / Г. Ф. Серый, Н. И. Косилов, Ю. Н. Ярмашев, А. И. Русанов. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 248 с.

103. Ситников, А. А. Сравнительный анализ систем очистки косогорного зерноуборочного комбайна / А. А. Ситников, С. Ф. Сороченко, В. А. Дрюк // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31. – № 3. – С. 35–38.

104. Смирнов, Н. А. Анализ основных зависимостей процесса сепарации зерна из слоя соломистого вороха и разработка его статистической модели / Н. А. Смирнов // Технологии комбайновой уборки зерновых культур. – Москва, 1983. – Т. 97. – С. 71–80.

105. Смолинский, С. В. Технические принципы устойчивости работы машинных агрегатов на склоне / С. В. Смолинский // Актуальные направления научных исследований XXI века. – 2015. – Т. 3. – № 9–3 (20–3). – С. 164–168.

106. Соловьев, А. Т. Исследование режимов использования комбайнов в предгорной зоне Алтая : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Т. Соловьев. – Омск, 1967. – 19 с.

107. Сороченко, С. Ф. Адаптер для работы на склонах / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов // Сельский механизатор. – 2010. – № 5. – С. 6.

108. Сороченко, С. Ф. Влияние поперечного крена молотилки зерноуборочного комбайна на неравномерность подачи зернового вороха / С. Ф. Сороченко // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов : сб. статей ; под ред. В. А. Дружинина ; Российская Академия транспорта ; АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 66–78.

109. Сороченко, С. Ф. Исследование движения компонентов зернового вороха по решетку зерноуборочного комбайна при уборке зерновых культур на склонах / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 8 (142). – С. 162–168.

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

111. Сороченко, С. Ф. К определению параметров устройства динамического разравнивания зернового вороха системы очистки зернокомбайна / С. Ф. Сороченко // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов : сб. статей ; под ред. С. А. Коростелева ; Российская Академия транспорта ; АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 81–85.

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

113. Сороченко, С. Ф. Конкурентоспособность зерноуборочных комбайнов, предназначенных для работы на склонах / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 9 (143). – С. 158–164.

114. Сороченко, С. Ф. Математическая модель движения зернового вороха по решету 3D-очистки зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко / Научная жизнь. – 2017. – № 8. – С. 6–14.

115. Сороченко, С. Ф. Математическая модель движения зернового вороха по решету адаптера очистки зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – № 12 (146). – С. 131–138.

116. Сороченко, С. Ф. Математическая модель сепарации зерна в системе очистки косогорного зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 12 (158). – С. 134–140.

117. Сороченко, С. Ф. Модель сепарации зерна в системе очистки при поперечном крене зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко // Ползуновский вестник, 2014. – № 4/2. – С. 64–69.

118. Сороченко, С. Ф. Обоснование параметров решётно-винтового сепаратора в системе очистки зерноуборочного комбайна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Сороченко Сергей Федорович. – Барнаул, 1996. – 210 с.

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

120. Сороченко, С. Ф. Определение приведенного коэффициента трения движения соломистых частиц зернового вороха по решету / С. Ф. Сороченко, В. А. Дрюк, А. Г. Подлеснов // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов : сб. статей ; под ред. В. А. Дружинина ; Российская Академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 62–65.

121. Сороченко, С. Ф. Повышение эффективности работы косогорного зернокомбайна за счет выравнивания системы очистки / С. Ф. Сороченко // Ползуновский альманах. – 2004. – № 4. – С. 140–141.

122. Сороченко, С. Ф. Распределение зернового вороха по решету системы очистки зернокомбайна при наличии поперечного крена / С. Ф. Сороченко, В. А. Дрюк // Совершенствование систем автомобилей, тракторов и агрегатов:

сб. статей, Ч. II ; под ред. А. Л. Новоселова ; Академия транспорта РФ, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 105–109.

123. Сороченко, С. Ф. Результаты лабораторно-полевых испытаний комбайна СК-5М «Нива» с экспериментальной очисткой / С. Ф. Сороченко, В. Ф. Семёнов, С. В. Терёхин // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 1992. – № 3. – С. 129–131.

124. Сороченко, С. Ф. Результаты лабораторных исследований адаптера системы очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С. 282–285.

125. Сороченко, С. Ф. Улучшение качественных параметров работы зернокомбайна, работающего на пологих склонах / С. Ф. Сороченко, В. Ф. Семёнов, А. М. Фролов, А. Ф. Киндсфатер // Совершенствование рабочих органов сельхозмашин и агрегатов : тезисы докл. международ. науч.-техн. конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1994. – С. 36–38.

126. Сороченко, С. Ф. Устройство для равномерного распределения зернового вороха на решетке зерноуборочного комбайна / С. Ф. Сороченко, А. В. Рязанов, В. А. Дрюк // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 179–182.

127. Сравнительные испытания сельскохозяйственной техники : науч. издание / П. И. Бурак и др. ; под общей ред. В. М. Пронина. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 416 с.

128. Тронеv, С. В. Оценка загрузки рабочих органов зерноуборочного комбайна хлебной массой / С. В. Тронеv // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 4–4 (58). – С. 101–104.

129. Тронеv, С. В. Способ обеспечения высокой производительности зерноуборочного комбайна / С. В. Тронеv, О. А. Федорова // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 6. – № 3. – С. 219–223.

130. Турбин, Б. Г. Сельскохозяйственные машины / Б. Г. Турбин, А. Б. Лурье, С. М. Григорьев [и др.]. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 583 с.

131. Ульяненко, М. А. Повышение эффективности работы воздушно-решетной очистки комбайнов семейства «Дон» : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ульяненко Михаил Александрович. – Воронеж, 1991. – 22 с.

132. Уркинбаев, Д. И. Обоснование параметров системы стабилизации горизонтального положения решетчатого стана зерноуборочного комбайна, предназначенного для работы на склонах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Уркинбаев Дуйсенбек Исаевич. – Москва, 1993. – 23 с.

133. Федоренко, И. Я. Анализ поведения сыпучей среды при вибрациях на основе теории аттрактора Лоренца / И. Я. Федоренко // Известия СО АН ССР. Серия технических наук. – Новосибирск : Наука, 1990. – № 3. – С. 112–115.

134. Федоров, В. Ф. Интенсификация процесса работы очистки зерноуборочного комбайна двухфазного обмолота : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В. Ф. Федоров. – Челябинск, 1972. – 25 с.

135. Хавыев, А. А. Повышение эффективности очистки элитных семян пшеницы от низконатурных примесей путем разработки семеочистительной

приставки производительностью 1 т/ч: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Хавыев Алмаз Альбертович. – Санкт-Петербург–Пушкин, 2004. – 8 с.

136. Царев, Ю. А. Статистическая оптимизация основных конструктивных параметров зерноуборочных комбайнов с учетом зональных условий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Царев Юрий Александрович. – Ростов-на-Дону, 2000. – 48 с.

137. Чепурин, Г. Е. Методика выбора типажа техники для уборки зерновых с учётом зональных особенностей / Г. Е. Чепурин // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2015. – № 2 (29). – С. 68–75.

138. Четыркин, В. Н. Безрешетная сепарация соломистого вороха / В. Н. Четыркин, Н. И. Косилов, М. Г. Степичев // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1973. – № 9. – С. 12–15.

139. Шабанова, Л. В. Обоснование и исследование параметров воздушно-решетной очистки применительно к зерноуборочным комбайнам повышенной производительности : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. В. Шабанова. – Ростов-на-Дону, 1981. – 22 с.

140. Шпокас, Л. Исследование работы колосового элеватора СК-5 «Нива» на холмистых полях / Л. Шпокас // Науч. тр. Латвийской с.-х. акад. – Вильнюс : Мокслас, 1980. – Вып. XXVI, 3(82). – С. 24–30.

141. Эйгер, М. И. Обоснование и исследование пальцевой решетки для высокопроизводительной очистки зернового вороха : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. И. Эйгер. – Ростов-на-Дону, 1969. – 22 с.

142. Яшутин, Н. В. Предпосылки и направления совершенствования систем земледелия на Алтае в современных условиях / Н. В. Яшутин, В. И. Бивалькевич // Организация рационального использования и охраны сельскохозяйственных земель Алтайского края в современных условиях : тр. четвертой регион. науч.-практ. конференции. – Барнаул, 2001. – С. 232–240.

143. Boettinger S, Fliege L. Working performance of cleaning units of combine harvesters on sloped fields. Conference: Agricultural Engineering: Land Technik Ageng. – 2011. – № 2124. – P. 63–68.

144. Development of a New Combine Equipped with Screw Type Threshing and Separating Mechanisms / Ichikawa Tomohiko, Sugiyama Takao. «JARQ: Jap. Agr. Res. Quart», 1986. – № 1. – P. 31–37.

145. Ford New Holland TF46. "Agr. Mach. J.", 1987, 41. – № 10, 39.

146. Im Blickpunkt: Mähdrescher. Wacker Peter, Kutzbach Heinz Dieter. "Landtechnik", 1988, 43. – № 1. – P. 27–30.

147. Laverda 3300 AL Hillside combine. «Green Book.Auth. Trac, Agr. and Forest. Equip, and Supplies», 1986, 31. – № 55. – P. 374.

148. Laverda 3350 AL Hillside Combine. «Green Book Auth.Trac., Agr. and Forest. Equip, and Supplies», 1986, 31. – № 55. – P. 374–375.

149. Mähdrescher am Hang / Aschenbrenner Gebhart // Prakt. Landtechn. – 1992, 45. – № 7–8, 10–13.

150. New Holland eyes Harvest 14 // Prof International. Tractors and Farm Machinery, 2013. – № 9. – P. 8.

151. Nuove mietitrebbie autolivellanti della NewHolland // Mach. e mot. agr. – 1994, 52. – № 11. – P. 19.
152. Reduce grain losses // Farmers Weekly. – 1993, 119. – № 11. – P. 53.
153. Sklizece na vystave Agritechnika 91 / Rotschow J. P. // Mech. Zemed. – 1992, 42. – № 2. – P. 51–53.
154. Sklizen zrnin na svazch / Maler // Metod. zavad. vysled. vizk. zemed. praxe. – 1990. – № 15. – P. 1–41.
155. Svahova dostupnost standardnich sklizecich mlaticek. Maler J. «Zemed techn», 1988, – 34. – № 8. – P. 469–479.
156. Untersuchungen zum Einfluss der Hangneigung auf Flächenleistung und Massestrom der Mähdrescher / Herrmann Karl, Jahne Michael //Wiss. Z. M.-Luther-Univ., Halle-Wittenberg. Math.-Naturwiss. R. – 1992, 41. – № 6. – P. 125–131.
157. Uprated models for UK. "Agr. Mach. J.", 1986, 40. – № 6. – P. 34–35.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Программа для ЭВМ

«Математическая модель сепарации зернового вороха»

Исходные данные:

Подача зернового вороха на очистку:	$q_b = 3.6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Номинальная подача зернового вороха на очистку	$q_{b0} = 2.9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Потери зерна при номинальной подаче зернового вороха на горизонтальной поверхности (в %)	$P_o = 0.13$
Содержание соломистой фракции в зерновом ворохе:	$C_o = 0.30$
Эталонное содержание соломистой фракции в зерновом ворохе:	$C_{o0} = 0.30$
Длина верхнего решета с удлинителем	$L_p = 1.3\text{m}$
Ширина верхнего решета	$B_p = 1.1\text{m}$
Скорость зернового вороха	$V_b = 0.42 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Длина элементарного участка	$\Delta X = 0.1\text{m}$
Коэффициент вариации толщины зернового вороха: в начале решета -	$V_{hm} = 0.372$
в конце решета -	$V_{hk} = 0.473$
на удалении X_p (или X_m) от начала решета -	$V_{hx} = 0.0$
Расстояние X_p (или X_m):	$X_p = 0.0\text{m}$
Объемная масса соломистой фракции	$\gamma_c = 25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Расчёт:

Эталонный коэффициент сепарации зерна:	$\mu_{p0} = 5.112 \frac{1}{\text{m}}$
$\mu_{p0} = \frac{-1}{L_p} \cdot \ln\left(\frac{P_o}{100}\right)$	
Эталонная подача соломистой фракции на очистку:	$q_{c0} = 0.87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
$q_{c0} = q_{b0} - C_{o0}$	
Эталонная толщина слоя зернового вороха (по соломистой фракции)	$h_{b0} = 0.075\text{m}$
$h_{b0} = \frac{q_{c0}}{V_b \cdot B_p \cdot \gamma_c}$	
Подача соломистой фракции на очистку:	$q_c = 1.08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
$q_c = q_b - C_o$	
Толщина слоя зернового вороха (по соломистой фракции)	$h_b = 0.094\text{m}$
$h_b = \frac{q_c}{V_b \cdot B_p \cdot \gamma_c}$	

Коэффициент, характеризующий условия работы системы очистки

Коэффициент сепарации зерна: $c := \left(\frac{hb}{hb0}\right)^{\frac{hb0}{hb}}$ $c = 1.19$

$\mu\rho := \mu\rho0 \cdot \left(\frac{hb0}{hb}\right)^c$ $\mu\rho = 3.952 \frac{1}{m}$

Количество рассматриваемых участков по всей длине решета:

$k := \frac{Lp}{\Delta X}$ $k = 13$

Величина изменения коэффициента вариации на участке Δx от начала до конца решета:

$\Delta Vh := \frac{Vhn - Vhk}{k}$ $\Delta Vh = -7.769 \times 10^{-3}$

Количество участков от начала решета до промежуточного сечения (при его наличии):

$z := \frac{Xp}{\Delta X}$ $z = 0$

Величина изменения коэффициента вариации на участке Δx от начала решета до промежуточного сечения:

$\Delta Vh1 := \text{if}\left(z = 0, 0, \frac{Vhn - Vhx}{z}\right)$ $\Delta Vh1 = 0$

Величина изменения коэффициента вариации на участке Δx от промежуточного сечения до конца решета:

$\Delta Vh2 := \text{if}\left(z = 0, 0, \frac{Vhx - Vhk}{k - z}\right)$ $\Delta Vh2 = 0$

Потери зерна за системой очистки:

$P := \text{if}\left[z = 0, 100 \cdot \prod_{i=0}^k \left[\exp\left[-\mu\rho \cdot \Delta X \cdot e^{-(Vhn - \Delta Vh \cdot i)}\right]\right], 100 \cdot \prod_{i=0}^k \left[\exp\left[-\mu\rho \cdot \Delta X \cdot e^{\left[-\text{if}\{i \leq z, Vhn + \Delta Vh1 \cdot (-i), [Vhx + \Delta Vh2 \cdot (z - i)]\right]}\right]\right]\right]$ $P = 2.657$

$i := 0, 1..k$ $V(i) := Vhn - \Delta Vh \cdot i$

$i1 := 0, 1..z$ $V1(i1) := Vhn + \Delta Vh1 \cdot (-i1)$

$i2 := z, z + 1..k$ $V2(i2) := Vhx + \Delta Vh2 \cdot (z - i2)$

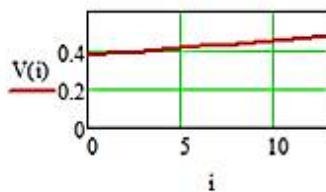


Рисунок Г.1 - График изменения коэффициента вариации толщины зернового вороха по длине решета ($Xp=0$)

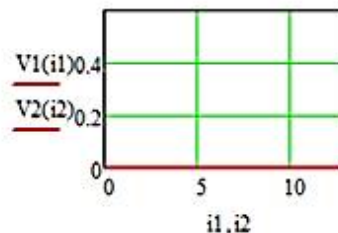


Рисунок Г.2 - График изменения коэффициента вариации толщины зернового вороха по длине решета ($Xp>0$)

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Данные для оценки адекватности
математической модели сепарации зернового вороха**

№ опыта	Схема системы очистки	Исследуемая зависимость, основные параметры	Изменяемый параметр	Экспериментальные потери зерна		P _{рас} , %
				P _{экс} , %	σ _p ² , %	
1	ВРО	$P = f(\alpha_K),$ $q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $C=30 \%$	0°	0,13	0,0004	0,07
2			4°	0,30	0,0182	0,40
3			8°	1,17	0,1260	1,25
4	ВРО	$P = f(q_B),$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $C=30 \%$	1,5 кг/с	0,46	0,0048	0,64
5			2,2 кг/с	0,91	0,0054	0,69
6			3,6 кг/с	2,32	0,1392	2,66
7			4,3 кг/с	4,91	0,4450	4,95
8	ВРО с двухсекционным решетом	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ, C=30 \%$	-	0,83	0,0005	0,92
9	ВРО с тремя продольными перегородками 130 мм на стрясной доске и двухсекционным решетом	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $C=30 \%$	-	0,63	0,0049	0,53
10	ВРО с двумя продольными перегородками 130 мм на стрясной доске и самоустанавливающимся решетом	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $C=30 \%$	-	0,27	0,0017	0,33
11	Очистка с РВС и двухсекционным решетом	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $C=30 \%$	-	0,31	0,0002	0,21
12	Очистка с РВС и самоустанавливающимся решетом	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $C=30 \%$	-	0,20	0,0060	0,14
13	ВРО с адаптером для склонов	$q_B = 2,9 \text{ кг/с},$ $\alpha_K = 8^\circ,$ $r_{\text{п}} = 18 \text{ мм},$ $C=30 \%$	-	0,21	0,0012	0,23
14	ВРО (лабораторно-полевые испытания)	$P = f(q_B),$ $\alpha_M = 5,1^\circ,$ $\sigma_\alpha = 0,8^\circ,$ $C=53 \%, \sigma_C = 4,5 \%$	1,1 кг/с	1,89	-	2,01
15			1,6 кг/с	4,00	-	2,92
16	ВРО с адаптером для склонов (лабораторно-полевые испытания)	$P = f(q_B),$ $\alpha_M = 5,3^\circ,$ $\sigma_\alpha = 0,8^\circ,$ $C=53 \%, \sigma_C = 4,5 \%$	1,1 кг/с	0,28	-	0,51
17			1,6 кг/с	0,50	-	1,07

Научное издание

Сергей Федорович СОРОЧЕНКО

**СИСТЕМА ОЧИСТКИ
ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА
ДЛЯ РАБОТЫ НА СКЛОНАХ**

Монография

Электронное издание

Издано в авторской редакции

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Алтайский
государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

В начало