

На правах рукописи



Попов Иван Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ
ВОРОХА ПОДСОЛНЕЧНИКА ПРИ УБОРКЕ
ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕШЕТА
С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Саратов 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова».

Научный руководитель: **Старцев Александр Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Труфляк Евгений Владимирович,**
доктор технических наук,
профессор кафедры «Процессы и машины
в агробизнесе»
ФГБОУ ВПО «Кубанский ГАУ»

Солнцев Вячеслав Николаевич,
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры «Сельскохозяйственные
машины»
ФГБОУ ВПО «Воронежский ГАУ»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия»**

Защита диссертации состоится 26 декабря 2014 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» по адресу: 410056, г Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» и на сайте [www. sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзывы направлять учёному секретарю диссертационного совета по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1. E-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан _____ 2014 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Чекмарев Василий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для снижения себестоимости производства маслосемян подсолнечника необходимо повысить рентабельность технологии его возделывания, уборки и переработки за счёт сокращения материальных и энергетических затрат на технологические процессы.

При уборке подсолнечника следует учитывать некоторые особенности его физико-механических свойств, отличных от зерновых культур, геометрические параметры семян, варьирующие по длине от 5 до 25 мм и ширине от 2 до 7 мм, позволяющие разделить их по сортам и гибридам.

Завершающим звеном в технологическом процессе уборки подсолнечника является очистка. Стоимость тонны сдаваемых семян прямо пропорциональна содержанию сорных примесей в ворохе, разделяемом на классы. Для достижения требуемого качества маслосемян по степени чистоты не более 2,5 % содержания сорных примесей сельхозпроизводитель должен осуществлять доочистку собранного урожая на зерноочистительных стационарных пунктах.

Для повышения качества очистки вороха подсолнечника следует использовать в воздушно-решётной очистке зерноуборочного комбайна дополнительные решёта с регулируемым отверстиями, размеры которых могут изменяться в соответствии с формой семянки. Данные решёта оснащены гофрами, способствующими более равномерному распределению вороха и ориентирующими движение семян в регулируемые отверстия.

Разработка новых решёт для очистки вороха подсолнечника, позволяющих снизить содержание сорных примесей в проходе и уменьшить количество семян в сходе с решёт, – важная задача, имеющая большое хозяйственное значение.

Степень разработанности темы исследования. Составлена классификация решёт, используемых как в ВРО, так и в стационарных зерноочистительных машинах. Разработана конструктивно-технологическая схема очистки вороха подсолнечника решетом с регулируемым отверстиями, теоретически обоснованы закономерности, характеризующие влияние параметров решета на сорность вороха в проходе и количество семян в сходе, уточнены геометриче-

ские размеры семян подсолнечника, проведена экспериментальная проверка работы решета с регулируемыми отверстиями.

Цель работы – повышение качества очистки вороха подсолнечника в зерноуборочном комбайне за счёт разработки решета с регулируемыми отверстиями.

Задачи исследования:

- провести анализ существующих схем воздушно-решётной очистки и конструкций решёт, выявить недостатки в их работе применительно к очистке вороха подсолнечника, определить перспективные направления, повышающие качество очистки;
- обосновать конструктивно-технологическую схему очистки вороха подсолнечника, теоретически исследовать технологический процесс очистки решето с регулируемыми отверстиями и определить его конструктивные и режимные параметры;
- выполнить экспериментальные исследования процесса очистки вороха подсолнечника различных сортов решето с регулируемыми отверстиями, уточнить физико-механические свойства вороха подсолнечника;
- дать технико-экономическую оценку эффективности работы комбайна с ВРО, оснащённой решето с регулируемыми отверстиями.

Научная новизна диссертации заключается в усовершенствовании технологического процесса очистки вороха подсолнечника применением решета с регулируемыми отверстиями и гофрами, теоретическим обоснованием зависимостей содержания сорных примесей в проходе вороха через решето и семян в сходе от его конструктивных и режимных параметров.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основе исследований разработан технологический процесс очистки вороха подсолнечника, снижающий содержание сорных примесей в проходе через решето и количество семян в сходе.

Предложены математические выражения для определения:

- вероятности просеивания семян через регулируемые отверстия;
- содержания сорных примесей в проходе вороха подсолнечника через решето с регулируемыми отверстиями;
- размеров гофр решета с регулируемыми отверстиями и расстояния ме-

жду ними.

Выведен коэффициент смещения отверстий τ при просеивании через них вороха подсолнечника различных сортов.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и совершенствовании решёт для очистки вороха подсолнечника. Применение предлагаемого решета с регулируемыми отверстиями позволит снизить содержание сорных примесей в проходе до 2,3 % от всей массы вороха подсолнечника, подаваемого на решето.

Методология и методы исследования. В методологии исследований использован системный подход, позволяющий раскрыть целостность объекта исследований и взаимообусловленность связей между размерами регулируемых отверстий, геометрическими размерами семян, параметрами ВРО, размерами гофр решета с регулируемыми отверстиями и содержанием сорных примесей в проходе и семян в сходе. Теоретические исследования проведены методом математического анализа с использованием известных законов и методов механики в сочетании с математикой. Экспериментальные исследования выполнены методом полного факторного эксперимента с применением теории вероятностей и математической статистики. Для обработки результатов экспериментальных исследований использованы статистические методы.

Научные положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованный технологический процесс очистки вороха подсолнечника;
- конструктивно-технологическая схема воздушно-решётной очистки вороха подсолнечника решетом с регулируемыми отверстиями;
- математические выражения для определения вероятности просеивания семян через регулируемые отверстия;
- аналитические зависимости содержания сорных примесей в проходе вороха подсолнечника и семян в сходе от конструктивных и режимных параметров решета с регулируемыми отверстиями.

Степень достоверности и апробация результатов. Теоретические исследования подтверждены экспериментальными опытами с доверительной вероятностью 0,945. Результаты исследований доложены и одобрены:

- на научно-технических конференциях Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова (Саратов, 2008–2014 гг.);
- на конкурсе научных проектов молодых учёных «Инновационная наука – молодой взгляд в будущее» (Саратов, 2009 г.);
- на Всероссийской молодёжной выставке-конкурсе прикладных исследований, изобретений и инноваций (Саратов, 2009 г.);
- на Всероссийской выставке-конкурсе «Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций» (Саратов, 2013 г.).

Аналитические выражения, полученные при исследованиях, могут быть использованы в конструкторских бюро и организациях, занимающихся проектированием и производством ВРО зерноуборочных комбайнов и стационарных зерноочистительных машин. Опытный образец решета с регулируемые отверстиями испытан и внедрён в ИП «Глава К(Ф)Х Заикин Е.Б.» Балашовского района Саратовской области.

Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах. Общий объём публикаций – 2,53 печ. л., из которых 1,72 печ. л. принадлежит лично соискателю, в том числе 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Изложена на 263 страницах, содержит 53 рисунка, 4 таблицы, 14 приложений. Список литературы включает 136 наименований, в том числе 11 – на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Состояние вопроса. Цель и задачи исследований»** рассмотрены технологические схемы работы решёт, проведен анализ их конструкций, определены основные недостатки при использовании их на очистке вороха подсолнечника, составлена классификация решёт. Анализ показал, что в настоящее время в зерноуборочных комбайнах используют ВРО, состоящие из двух и более решёт, преимущественно жалюзийных. Наиболее предпочтительны для очистки вороха подсолнечника решёта с отверстиями, соответствующими форме семян. Для повышения очистки вороха подсолнечника следует учитывать разнообразие сортов подсолнечника и отличительные особенности геометрических характеристик семян. При этом необходима регулировка проходных отверстий решёт и равномерное распределение вороха подсолнечника по всей поверхности решета.

Исследованиями процесса очистки зернового вороха занимались учёные: С.А. Алферов, И.Ф. Василенко, И.А. Горбачёв, В.В. Гортинский, В.И. Горшенин, В.П. Горячкин, Э.В. Жалнин, Н.И. Клёнин, В.А. Кубышев, Н.П. Ларюшин, М.Н. Летошнев, Н.В. Михеев, И.И. Наконечный, А.И. Русанов, А.И. Ряднов, Л.Т. Свиридов, Г.Ф. Серый, В.И. Славкин, А.П. Тарасенко, Г.Д. Терсков, В.Н. Тимощенко, А.Н. Цепляев, М.Н. Чаткин, А.И. Чепурной, В.Д. Шеповалов, С.С. Ямпиров и др.

Во второй главе **«Теоретическое обоснование процесса просеивания вороха подсолнечника решетом с регулируемыми отверстиями»** приведена и обоснована технологическая схема очистки вороха подсолнечника решетом с регулируемыми отверстиями (рисунок 1). Прошедший через две ступени очистки ворох подсолнечника поступает на решето б с регулируемыми отверстиями и гофрами, разделяющими их на ряды. При этом за счёт возвратно-поступательного движения решета гофры разделяют ворох равномерно по всей поверхности и ориентируют движение семян к центрам отверстий, а также способствуют перемещению оставшихся сорных примесей и мелких семян по поверхности решета и их последующему выдуванию.

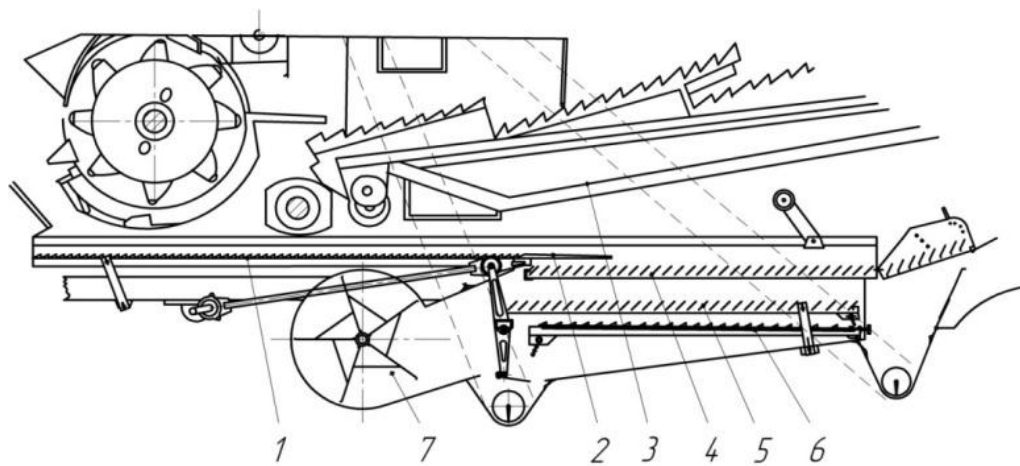


Рисунок 1 – Расположение решета с регулируемыми отверстиями:

- 1 – скатная доска; 2 – пальцевая гребёнка; 3 – клавиши соломотряса;
 4 – верхний решётный стан; 5 – нижний решётный стан;
 6 – решето с регулируемыми отверстиями; 7 – вентилятор

Решето с регулируемыми отверстиями представляет собой раму 1 (рисунок 2), оснащённую направляющими 2, кронштейнами 3 для крепления к боковине нижнего решётного стана. В направляющих неподвижно установлено верхнее решето 4 с отверстиями, ряды которых разделены поперечными перегородками – гофрами 5, а также подвижное нижнее решето 6. Механизм регулировки решета представляет собой Г-образную пластину 7, закреплённую в торцевой части подвижного решета 6 регулировочной гайкой 8.

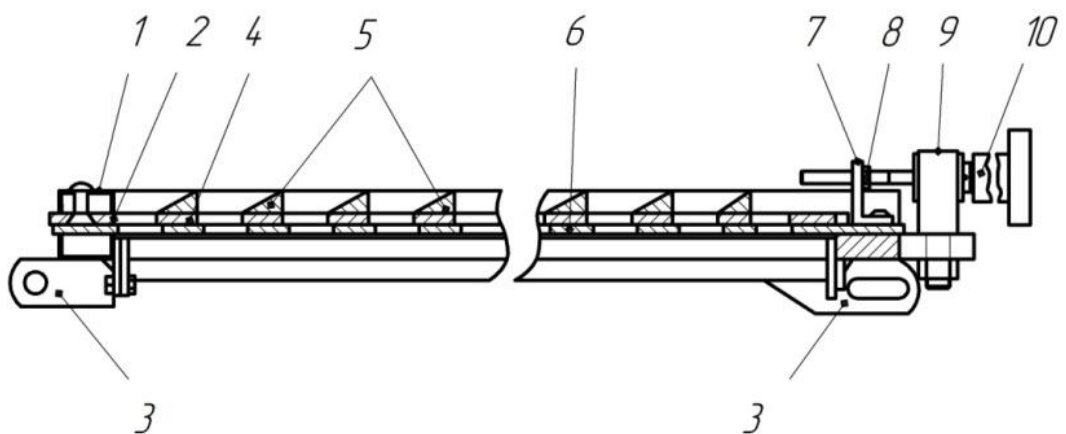


Рисунок 2 – Решето с регулируемыми отверстиями:

- 1 – рама решета; 2 – направляющие; 3 – кронштейны крепления;
 4 – верхнее неподвижное решето; 5 – гофры; 6 – нижнее подвижное решето;
 7 – Г-образная пластина; 8 – регулировочная гайка;
 9 – опора регулировочного винта; 10 – регулировочный винт

На раме 1 посредством болтового соединения закреплена опора 9 регулировочного винта 10, сопряженного с Г-образной пластиной 7 регулировочной гайкой, что позволяет перемещать нижнее подвижное решето 6 относительно верхнего 4, в результате чего образуются регулируемые отверстия (рисунок 3).

Изменяя размеры отверстий, можно добиться соответствия их размерам семянки подсолнечника определенного сорта или гибрида.

Площадь S_0 регулируемого отверстия

$$S_0 = R^2 \arcsin\left(\frac{l\sqrt{4R^2 - l^2}}{2R^2}\right) - \frac{l\sqrt{4R^2 - l^2}}{2}, \text{ м}^2. \quad (1)$$

Площадь продольного сечения эллипсоида (семянки) определяют согласно рисунку 4 по формуле

$$S_s = \pi ab, \text{ м}^2. \quad (2)$$

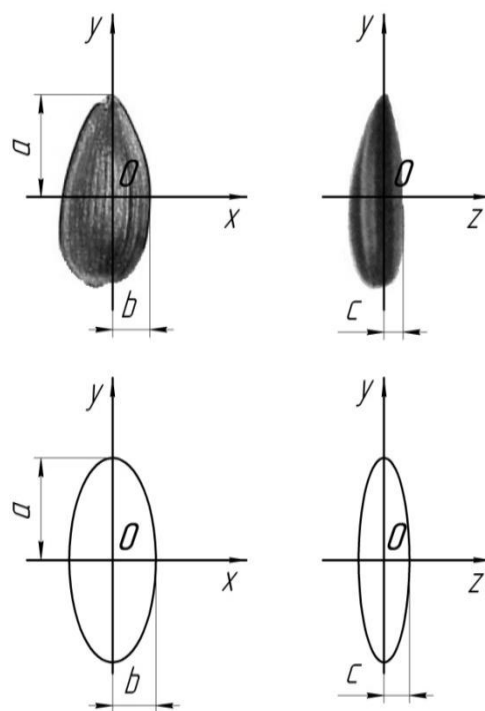
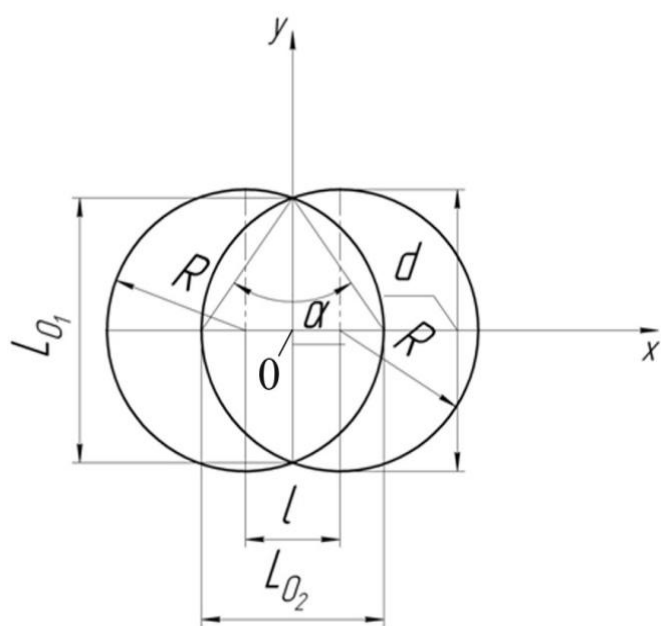


Рисунок 3 – Геометрические размеры регулируемого отверстия: R – радиус отверстия, м; l – длина смещения центров отверстия, м; d – диаметр отверстия, м; α – центральный угол окружности, рад; L_{01} – длина регулируемого отверстия по вертикали, м; L_{02} – длина регулируемого отверстия по горизонтали, м

Рисунок 4 – Геометрические размеры семянки

$$P = \frac{S_2}{S_0} = \frac{\pi ab}{R^2 \arcsin\left(\frac{l\sqrt{4R^2 - l^2}}{2R^2}\right) - \frac{l\sqrt{4R^2 - l^2}}{2}}. \quad (3)$$

Для эллипсоида с длиной a , шириной b и толщиной c вероятность просеивания P через регулируемое отверстие

Геометрические размеры регулируемых отверстий можно охарактеризовать коэффициентом смещения τ , который находят по выражению

$$\tau = \frac{L_{0_1}}{L_{0_2}}.$$

Коэффициент смещения отверстий τ для определенного сорта или гибрида подсолнечника

$$\tau \approx \sqrt[3]{\frac{3\pi ab}{32R^2}}. \quad (4)$$

Процесс просеивания вороха через отверстия рассматриваемого решета описывается основным фундаментальным соотношением между параметрами подачи и прохода вороха и схода семян:

$$q = q_1 + Q_1 = q_2 + Q_2 + q_3 + Q_3, \text{ кг/с}, \quad (5)$$

где q – подача вороха подсолнечника на решето, кг/с; q_1 – содержание семян в ворохе, подаваемом на решето, кг/с; Q_1 – сорные примеси в ворохе, подаваемом на решето, кг/с; q_2 – количество семян, прошедших через решето, кг/с; Q_2 – сорные примеси, прошедшие через решето, кг/с; q_3 – количество семян, сошедших с решета, кг/с; Q_3 – сорные примеси, выдуваемые с решета, кг/с.

Приведём функциональную зависимость всех частных составляющих выражения (5) от общего параметра – подачи вороха q :

$$q_1(q) = q_2(q) + q_3(q); \quad (6)$$

$$Q_1(q) = Q_2(q) + Q_3(q). \quad (7)$$

Предельными (максимальными и минимальными) условиями, независимыми от скорости воздушного потока v_B и коэффициента смещения τ , являются случаи: полного просеивания вороха при минимальной подаче $q = q_{\min}$ и ненормированного схода его при максимальной подаче $q = q_{\max}$. Эти условия описываются соотношениями:

$$q_1(q \rightarrow 0) = q_2(q \rightarrow 0); \quad q_3(q \rightarrow 0) \rightarrow 0. \quad (8)$$

В первом приближении внутри обозначенного диапазона подачи $q_{\min} - q_{\max}$ зависимости приведенных параметров граничных соотношений от подачи q можно считать линейными, что с учётом границ перехода к предельным значениям по формулам (6)–(7) приводит к следующим возможным соотношениям:

$$q_2(q) = q_1 \left\{ \left[\frac{|q - q_{\max}| - |q - q_{\min}|}{2(q_{\max} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = q_1 f_2(q), \text{ кг/с}; \quad (9)$$

$$q_3(q) = q_1 \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\max}|}{2(q_{\max} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = q_1 f_3(q), \text{ кг/с}, \quad (10)$$

где $f_2(q)$, $f_3(q)$ – функциональные множители.

Условия просеивания мелких сорных примесей можно уточнить по соотношениям с аналогичными множителями, зависящими от q :

$$Q_{i_2}(q) = Q_i \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\max}|}{2(q_{\max} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = Q_i f_2(q), \text{ кг/с}; \quad (11)$$

$$Q_{M_3}(q) = Q_M \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\max}|}{2(q_{\max} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = Q_M f_3(q), \text{ кг/с}, \quad (12)$$

где Q_{M_2} – мелкие сорные примеси, прошедшие через решето, кг/с; Q_{M_3} – мелкие сорные примеси, выдуваемые с решета, кг/с.

Условия просеивания крупных сорных примесей уточняли по соотношениям с использованием параметра q_{med} :

$$Q_{\kappa_2}(q) = \delta_p Q_{\kappa} \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\text{med}}|}{2(q_{\text{med}} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = \delta_p Q_{\kappa} f_1(q); \text{ кг/с}; \quad (13)$$

$$Q_{\kappa_3}(q) = Q_{\kappa} - \delta_p Q_{\kappa} \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\text{med}}|}{2(q_{\text{med}} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = Q_{\kappa} [1 - \delta_p f_1(q)], \text{ кг/с}, \quad (14)$$

где Q_{κ_2} – крупные сорные примеси, прошедшие через решето, кг/с; Q_{κ_3} – крупные сорные примеси, выдуваемые с решета, кг/с; δ_p – величина, характеризующая увеличение схода при большей подаче, кг/с, δ_p – 6–7 %; q_{med} – величина, характеризующая интенсивность просеивания вороха подсолнечника при увеличении q и δ_p , кг/с.

Промежуточный диапазон величины подачи q от 1,5 до 3 кг/с является рабочим и соответствует диапазону подачи вороха подсолнечника на решето.

При некотором среднем значении скорости воздушного потока v_B происходит блокировка просеивания мелких сорных примесей Q_M , что приводит к предельным условиям:

$$Q_M(v_B \rightarrow \infty) = Q_{M_3}(v_B \rightarrow \infty); \quad (15)$$

$$Q_{i_2}(v_{\hat{a}} \rightarrow \infty) \rightarrow 0. \quad (16)$$

Теоретические зависимости сорности в проходе и сходе вороха подсолнечника от скорости воздушного потока v_B строятся на основании соотношений (11), (12). Для их упрощения введём замену:

$$Q_M^0 = \delta_p Q_M f_1(q), \text{ кг/с}. \quad (17)$$

Тогда

$$Q_{M_2}(v_B) = Q_M^0 \left\{ \left[\frac{|v_B^2 - v_{B_{\text{med}}}^2| - |v_B^2 - v_{B_{\text{min}}}^2|}{2(v_{B_{\text{med}}}^2 - v_{B_{\text{min}}}^2)} \right] + \frac{1}{2} \right\} = Q_M^0 F_2^M(v_B), \text{ кг/с}, \quad (18)$$

где

$$F_2^M(v_B) = \left[\frac{|v_B^2 - v_{B_{\text{med}}}^2| - |v_B^2 - v_{B_{\text{min}}}^2|}{2(v_{B_{\text{med}}}^2 - v_{B_{\text{min}}}^2)} \right] + \frac{1}{2};$$

$$Q_{M_3}(v_B) = Q_M^0 \left\{ \left[\frac{|v_B^2 - v_{B_{\min}}^2| - |v_B^2 - v_{B_{\text{med}}}^2|}{2(v_{B_{\text{med}}}^2 - v_{B_{\min}}^2)} \right] + \frac{1}{2} \right\} = Q_M^0 F_3^M(v_B), \text{ кг/с.} \quad (19)$$

При максимальной скорости воздушного потока $v_{B_{\max}}$, блокирующей процесс просеивания семян через регулируемые отверстия, применимы выражения:

$$q_2(v_B) = q_1^0 \left\{ \left[\frac{|v_B^2 - v_{B_{\max}}^2| - |v_B^2 - v_{B_{\min}}^2|}{2(v_{B_{\max}}^2 - v_{B_{\min}}^2)} \right] + \frac{1}{2} \right\} = q_1^0 f_2^{v_B}(v_B), \text{ кг/с;} \quad (20)$$

$$q_3(v_B) = q_1^0 \left\{ \left[\frac{|v_B^2 - v_{B_{\min}}^2| - |v_B^2 - v_{B_{\max}}^2|}{2(v_{B_{\max}}^2 - v_{B_{\min}}^2)} \right] + \frac{1}{2} \right\} = q_1^0 f_3^{v_B}(v_B), \text{ кг/с.} \quad (21)$$

Коэффициент смещения регулируемого отверстия τ характеризует в первую очередь площадь отверстия для просеивания. Поэтому в первом приближении его относительная величина будет влиять на производительность решета и процессы разделения вороха подсолнечника на фракции.

Данные процессы описываются зависимостями:

$$Q_{i_2}(q) = \frac{S_{\dot{Y}}}{S_0} Q_i \left\{ \left[\frac{|q - q_{\max}| - |q - q_{\min}|}{2(q_{\max} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = \frac{S_{\dot{Y}}}{S_0} Q_i f_2(q), \text{ кг/с;} \quad (22)$$

$$Q_{\hat{e}_2}(q) = \frac{S_{\dot{Y}}}{S_0} \delta_p Q_{\hat{e}} \left\{ \left[\frac{|q - q_{\min}| - |q - q_{\text{med}}|}{2(q_{\text{med}} - q_{\min})} \right] + \frac{1}{2} \right\} = \frac{S_{\dot{Y}}}{S_0} \delta_p Q_{\hat{e}} f_1(q), \text{ кг/с,} \quad (23)$$

где $S_{\text{Э}}$ – площадь продольного сечения эллипсоида (семянки), м^2 ; S_0 – площадь регулируемого отверстия, м^2 .

На основе приведенных выражений модель для определения сорных примесей в проходе вороха подсолнечника в зависимости от подачи и скорости воздушного потока имеет вид:

$$Q_2(q, v_B) = \frac{S_{\text{Э}}}{S_0} [\delta_p Q_{\kappa} f_1(q) + Q_M f_2(q)], \text{ кг/с.} \quad (24)$$

С учетом влияния скорости воздушного потока $v_{\text{вмед}}$ математическая модель приобретает вид:

$$Q_2(q, v_{\text{в}}) = \frac{S_{\text{э}}}{S_0} [\delta_p Q_{\text{к}} f_1(q) + Q_{\text{м}} f_2(q)] F_2^{\text{М}}(v_{\text{в}}), \text{ кг/с.} \quad (25)$$

Коэффициент τ влияет на две основные функциональные переменные q и $v_{\text{в}}$ в формуле (25). Путём произведения множителей f_1 и f_2 и замены их на $F_2^{\text{М}}$ в данном выражении получаем функциональную зависимость для определения содержания сорных примесей в проходе вороха подсолнечника через решето с регулируруемыми отверстиями:

$$Q_2 = \left[\tau \delta_p Q_{\text{к}} f_1(q) + \frac{\tau \delta_2 Q_{\text{м}} q}{q_{\text{макс}}} \delta_1 Q_{\text{м}} f_2(q) F_2^{\text{М}}(v_{\text{в}}) \right], \text{ кг/с.} \quad (26)$$

Ворох подсолнечника массой M разделяется на слои, каждый из которых располагается над рабочим участком решета длиной $L_{\text{р}}$. Рабочий участок включает в себя впадину и гофру. Ширина гофры B равна ширине решета.

Между собой массы слоёв упруго взаимодействуют в виде силы $F_{\text{с}}$, которую определяют с помощью коэффициента жёсткости вороха C (рисунок 5).

$$F_{\text{с}} = C(x_1 - x_2), \text{ Н,} \quad (27)$$

где $F_{\text{с}}$ – сила связи между массами вороха m_1 и m_2 , Н; x_1 – координата перемещения массы m_1 в горизонтальной плоскости, м; x_2 – координата перемещения массы m_2 в горизонтальной плоскости, м; C – коэффициент жёсткости вороха подсолнечника, Н/м.

Взаимодействие слоя вороха с впадиной гофры происходит в виде трения по закону Кулона:

$$F_{\text{тр1}} = m_1 g f \text{sign}(v_{m_1} - v_{\text{п}}), \text{ Н,} \quad (28)$$

где f – коэффициент трения; $v_{\text{п}}$ – скорость привода решета, м/с; v_{m_1} – скорость движения массы m_1 , м/с.

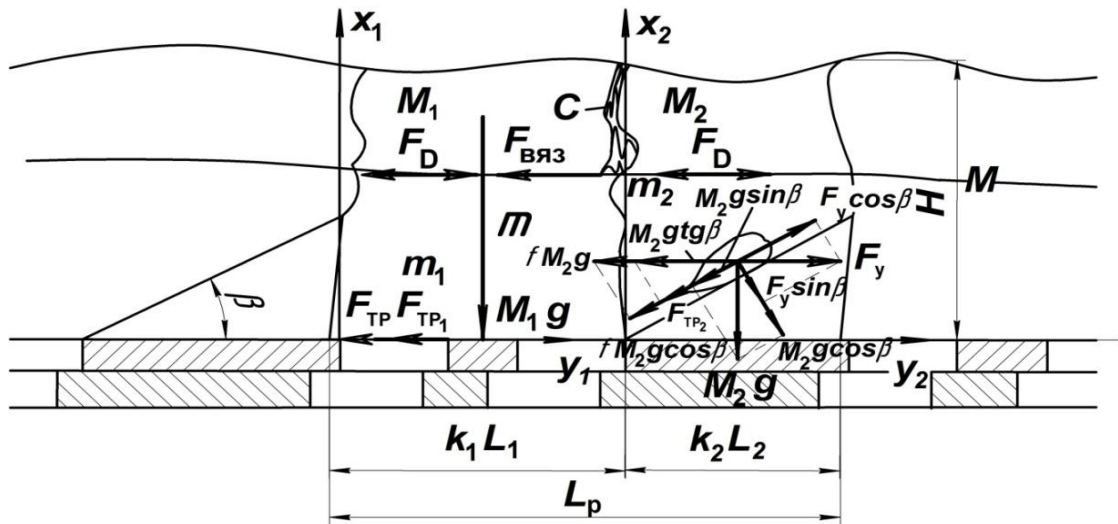


Рисунок 5 – Схема сил, действующих на ворох подсолнечника:

M – масса вороха; M_1 – масса верхних слоёв вороха, находящихся над впадиной;

M_2 – масса верхних слоёв вороха, находящихся над гофрой;

m – масса вороха, взаимодействующего с рабочим участком решета;

H – высота слоя вороха; F_D – сила демпфирования между массами;

$F_{\text{вяз}}$ – сила вязкости вороха; $F_{\text{тр}}$ – сила трения вороха о поверхность решета,

$F_{\text{тр}_1}$ – сила трения вороха массой m_1 о поверхность решета,

$F_{\text{тр}_2}$ – сила трения массы m_2 о поверхность гофры;

$F_{\text{упор}}$ – сила упора гофры; C – коэффициент жёсткости вороха;

k_1, k_2 – коэффициенты, характеризующие распределение масс по длине решета;

L_1 – ширина впадины; L_2 – ширина гофры; L_p – длина рабочего участка

Взаимодействие массы m_1 с гофрой определяется ускорением и силой F_A , создаваемой амплитудой решета:

$$F_A = m_1 \omega^2 A \sin(\omega t) \left[\frac{1 + \text{sign}(v_{\text{п}} - v_{m_1})}{2} \right], \text{ Н.} \quad (29)$$

С верхними слоями вороха подсолнечника предполагается взаимопроникающее и вязкое взаимодействие нижних слоёв в виде демпфирования, определяемого использованием коэффициента k_D :

$$F_D = k_D (v_{\text{п}} - v_{m_1}), \text{ Н,} \quad (30)$$

где F_D – сила демпфирования между верхними и нижними массами, Н; k_D – коэффициент демпфирования, Н·с/м.

В результате, выражая силу инерции и ускорение массы m_1 через приведенные составляющие, получим дифференциальное уравнение движения массы m_1 вида:

$$m_1 w_1 = m_1 \omega^2 A \sin(\omega t) \left[\frac{1 + \text{sign}(v_{\text{п}} - v_{m_1})}{2} \right] + k_1 k_D (v_{\text{п}} - v_{m_1}) - M_1 g f \text{sign}(v_{m_1} - v_{\text{п}}) - C(x_1 - x_2), \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2. \quad (31)$$

Масса m_2 , находящаяся на наклоне гофры, не контактирует с её уступом, поэтому к коэффициенту трения f добавляется угол образующей гофры в виде $\text{tg}\beta$. Таким образом, силу трения вороха массой m_2 по поверхности гофры определяют по формуле:

$$F_{\text{тр}2} = M_1 g (f + \text{tg}\beta) \text{sign}(v_{m_2} - v_{\text{п}}), \text{ Н}, \quad (32)$$

где v_{m_2} – скорость движения массы m_2 по поверхности гофры, м/с.

В решетке рассматриваемой конструкции отверстия расположены в шахматном порядке во впадине между наклонной поверхностью и уступом гофры. Это повышает вероятность P_p попадания семянки в положение перекрытия более двух третей её длины над отверстием до значения $P_p = 0,5$.

С учётом динамики процесса взаимодействия семянки с уступом гофры при колебаниях решета вероятность разворота P_r семянки в положение совпадения главной оси семянки и оси впадины имеет значение $P_r = 0,5$. Общая вероятность совпадения этих двух необходимых условий для прохождения семянки через одну впадину:

$$P_{pr} = P_p P_r = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25, \quad (33)$$

где P_p – вероятность попадания семянки в отверстие; P_r – вероятность разворота семянки.

Количество впадин, необходимое для просеивания одного слоя семянки при движении по решетке, обратно пропорционально общей вероятности попадания семянки в отверстие и её развороту:

$$n = \frac{1}{P_{pr}} = 4. \quad (34)$$

Число слоёв семянки при полной загрузке решета и высоте слоя $H = 50$ мм, а также толщине семянки разных сортов $h_c = 6-8$ мм составит:

$$m = \frac{H}{h_c} = \frac{50}{(6-8)} \approx 6-8. \quad (35)$$

Тогда количество впадин для гарантированного прохождения семян при полной загрузке решета

$$N = nm = 4 \cdot (6-8) = 24-32 \quad (36)$$

В третьей главе «**Методика экспериментальных исследований и производственных испытаний**» обоснованы факторы, влияющие на содержание сорных примесей в проходе вороха подсолнечника через решето и семян в сходе.

В качестве факторов были выбраны: коэффициент смещения отверстий τ , подача вороха подсолнечника на решето q , скорость воздушного потока v_v . Лабораторные исследования были проведены на экспериментальной установке (рисунок 6), которая по своему конструктивному исполнению отображала работу части ВРО комбайна.

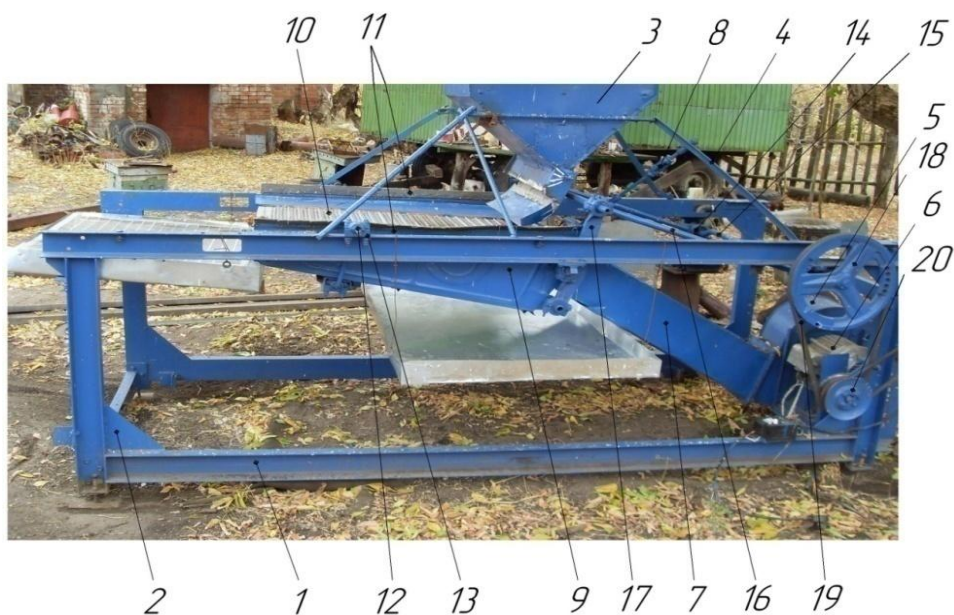


Рисунок 6 – Лабораторная установка: 1 – рама; 2 – косынки; 3 – бункер; 4 – подставка; 5 – вентилятор; 6, 20 – электродвигатели; 7 – воздуховод; 8 – стяжка; 9 – лоток; 10 – решето с регулируемыми отверстиями; 11 – направляющие лотка; 12 – оси; 13 – шарниры; 14 – кривошипно-шатунный механизм; 15 – кривошип; 16, 17 – рычаги; 18 – шкив; 19 – ремённая передача; 20 – шкив

В соответствии с геометрическими размерами семян подсолнечника принимали следующие значения величин отверстий:

- длина l : 12; 11,8; 11,3; 10,4 мм;
- ширина s : 12; 10; 8; 6 мм.

Также были обозначены шаги варьирования режимных параметров работы решета с регулируемыми отверстиями:

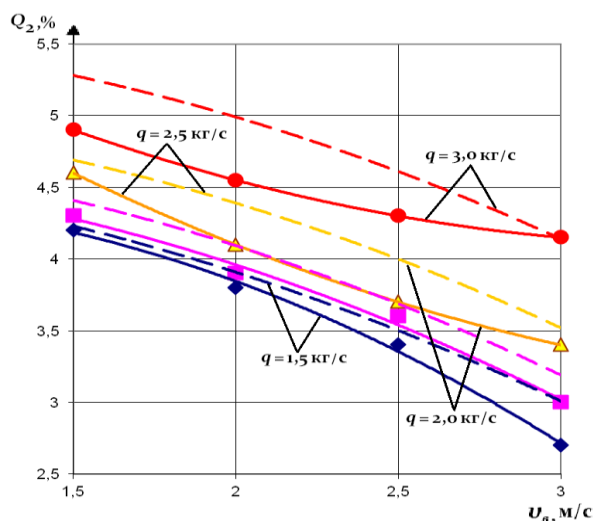
- подача вороха подсолнечника на решето q : 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 кг/с, эти значения определялись пропускной способностью молотильно-сепарирующих устройств различных марок зерноуборочных комбайнов и урожайностью подсолнечника;
- скорость воздушного потока вентилятора v_B : 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 м/с, эти значения соответствуют режиму работы ВРО при уборке подсолнечника.

Для контроля параметров использовали серийную измерительную аппаратуру и оборудование: тягонапоромер, трубку Пито, электронные весы и другие приборы.

В четвертой главе **«Результаты экспериментальных исследований»** приведены лабораторно-полевые опыты, в результате которых были изучены и уточнены физико-механические свойства вороха подсолнечника и геометрические параметры семян:

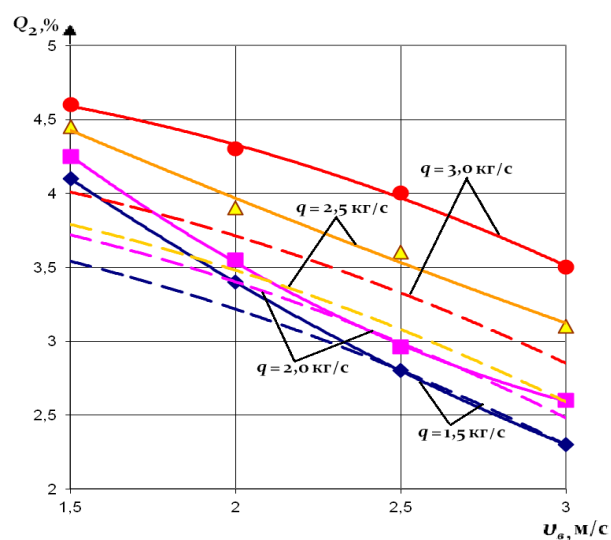
- размерная характеристика: длина, ширина и толщина семян трёх сортов «Лакомка», «Саратовский-20», «Донской»;
- характеристика стеблей: масса срезаемого стебля подсолнечника, масса семян в одной корзинке, удельное содержание массы семян в массе срезаемого стебля;
- размерная характеристика сорных примесей: длина и толщина крупных и мелких сорных примесей.

Представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с разработанными методиками, дан их анализ. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей (рисунки 7, 8).



— — экспериментальные значения;
 - - - - - теоретические значения

Рисунок 7 – Зависимости содержания сорных примесей Q_2 , %, от подачи вороха подсолнечника q сорта «Саратовский-20», кг/с, и скорости воздушного потока v_B , м/с, при $\tau = 0,85$



— — экспериментальные значения;
 - - - - - теоретические значения

Рисунок 8 – Зависимости содержания сорных примесей Q_2 , %, от подачи вороха подсолнечника q сорта «Саратовский-20», кг/с, и скорости воздушного потока v_B , м/с, при $\tau = 0,7$

По результатам полного факторного эксперимента было установлено, что все выбранные факторы влияют на содержание сорных примесей в проходе и семянков в сходе. Из графических зависимостей (см. рисунки 7, 8) видно, что с уменьшением τ от 0,85 до 0,7 при фиксированных значениях $q = 1,5$ кг/с и $v_B = 3,0$ м/с содержание сорных примесей в проходе вороха через решетку уменьшается от 2,7 до 2,3 % ко всей массе прохода. Минимальное содержание сорных примесей в проходе вороха через решетку достигается при $q = 1,5$ кг/с, $v_B = 3,0$ м/с и $\tau = 0,58$.

Снижение содержания сорных примесей наблюдается и при очистке подсолнечника других сортов. Так, минимальное содержание сорных примесей 1,9 и 1,63 % в ворохе подсолнечника сортов «Лакомка» и «Донской» достигается при $\tau = 0,58$, $q = 1,5$ кг/с и $v_B = 3,0$ м/с.

При $\tau = 0,7$ и фиксированных значениях $q = 3,0$ кг/с и $v_B = 3,0$ м/с содержание сорных примесей в проходе вороха подсолнечника сорта «Саратовский-20» составляет 3,48 % (см. рисунок 8). С повышением скорости воздушного потока от 1,5 до 3,0 м/с при $\tau = 0,7$ и $q = 2,5$ кг/с содержание сорных примесей Q_2 снижается от 4,45 до 3,1 %. Однако при уменьшении τ увеличивается количество семянков в сходе с решетки, так как они не проходят в отверстия (рисунки 9, 10) и попадают в колосовой шнек.

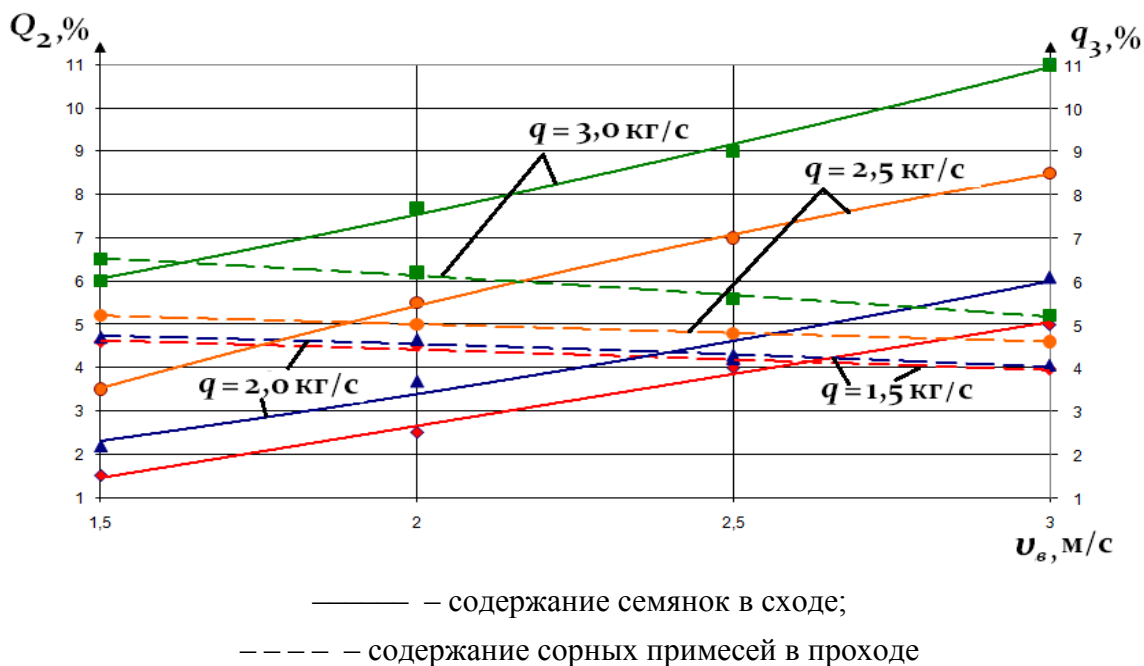


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости содержания сорных примесей $Q_2, \%$, и семян подсолнечника «Саратовский-20» $q_3, \%$, в сходе с решета с регулируемыми отверстиями от подачи вороха подсолнечника $q, \text{кг/с}$, и скорости воздушного потока $v_{в}, \text{м/с}$, при $\tau = 0,85$

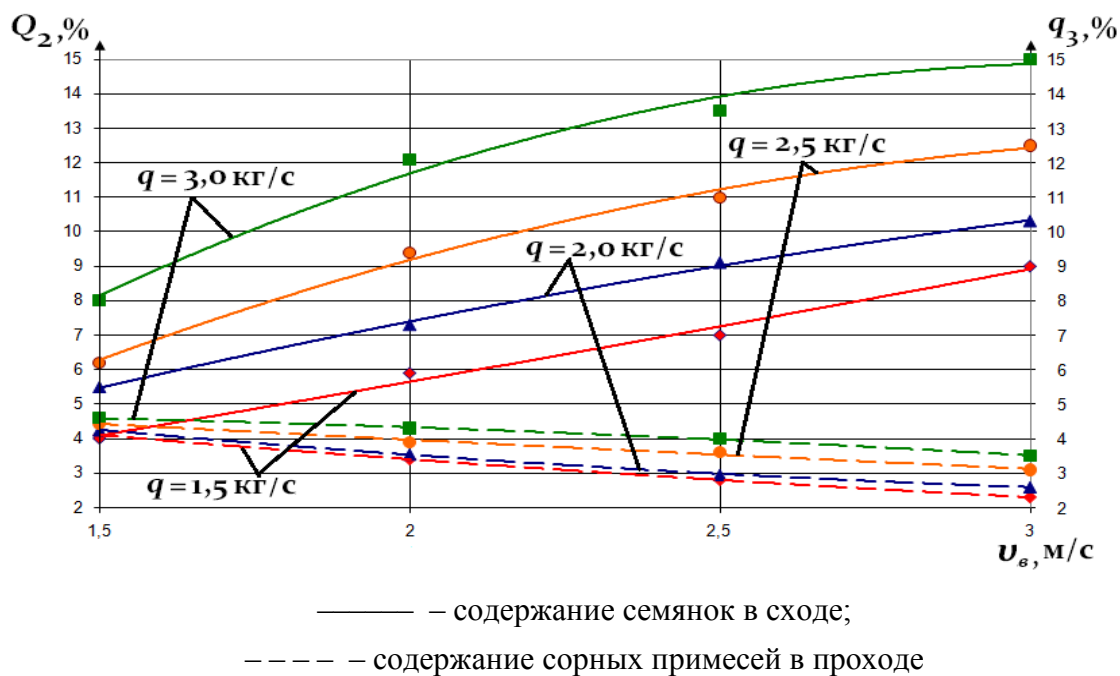


Рисунок 10 – Экспериментальные зависимости содержания сорных примесей $Q_2, \%$, и семян подсолнечника «Саратовский-20» $q_3, \%$, в сходе с решета с регулируемыми отверстиями от подачи вороха подсолнечника $q, \text{кг/с}$, и скорости воздушного потока $v_{в}, \text{м/с}$, при $\tau = 0,7$

Так, при минимальном значении сорности $Q_2 = 1,9 \%$ при $q = 1,5$ кг/с и $v_b = 3,0$ м/с количество семян в сходе с решета $q_3 = 7 \%$. С увеличением q от 1,5 до 3 кг/с при $v_b = 3,0$ м/с q_3 возрастает от 7 до 11,5 %. С уменьшением τ (см. рисунок 10) величина q_3 также растёт. Так, при $q = 1,5$ кг/с и $v_b = 3,0$ м/с $q_3 = 9 \%$.

Содержание семян подсолнечника сорта «Лакомка» q_3 в сходе с решета составляет 14 %, сорта «Донской» – 8 % при $Q_2 = 1,9 \%$.

В пятой главе «**Результаты производственных испытаний**» была проведена технико-экономическая проверка решета с регулируемыми отверстиями (рисунок 11).



Рисунок 11 – Установка решета с регулируемыми отверстиями:

- 1 – верхнее решето; 2 – нижнее решето; 3 – кронштейн для крепления решета с регулируемыми отверстиями;
- 4 – решето с регулируемыми отверстиями;
- 5 – днище корпуса нижнего стана;
- 6 – направляющая воздушного фартука вентилятора

Испытания проходили в ИП «Глава К(Ф)Х Заикин Е.Б.» Балашовского района Саратовской области на посевах подсолнечника площадью 805 га. Результаты производственной проверки показывают, что годовая экономия эксплуатационных затрат составила 14787,85 за счёт снижения сорности в бункерном ворохе и исключения операции послеуборочной доочистки зерна. Сорность бункерного вороха подсолнечника – 2,3 %, влажность – 9,1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа литературных источников, в которых рассматривались вопросы исследования воздушно-решётных очисток и конструкций решёт, установлено, что при очистке вороха подсолнечника они не могут снижать содержание сорных примесей в проходе ниже 2,5 %. Возможное снижение сорных примесей достигается использованием в конструкции дополнительного решета с регулируемыми отверстиями.

2. На основании выполненного анализа конструкций решёт предложена конструктивно-технологическая схема решета с регулируемыми отверстиями для очистки вороха подсолнечника. Новизна устройства подтверждена патентами на полезную модель № 73805 и изобретения 2401530, 2414971.

3. Теоретическими исследованиями получены аналитические выражения вероятности просеивания семян через регулируемые отверстия, определены оптимальные значения коэффициента смещения отверстий τ при просеивании вороха подсолнечника различных сортов, получено математическое выражение для определения содержания сорных примесей в проходе решета с регулируемыми отверстиями. ВРО зерноуборочного комбайна, оснащённая решетом с регулируемыми отверстиями, в сравнении с базовой конструкцией позволяет снизить содержание сорных примесей в проходе в 2,1–2,7 раза. Установлены: количество гофр $N = 30$, длина решета $L = 0,990$ м.

4. Экспериментальными исследованиями установлены зависимости содержания сорных примесей в проходе вороха подсолнечника Q_2 от различных величин подачи q , скорости воздушного потока v_b и коэффициента смещения отверстий τ . Рекомендуемое содержание сорных примесей в проходе вороха подсолнечника сорта «Саратовский-20» $Q_2 = 2,3$ % достигается при величине подачи $q = 1,5$ кг/с, скорости воздушного потока $v_b = 3$ м/с и коэффициенте смещения отверстий $\tau = 0,7$, сорта «Лакомка» $Q_2 = 2,43$ % при $q = 1,5$ кг/с, $v_b = 3$ м/с, $\tau = 0,85$; сорта «Донской» $Q_2 = 1,6$ % при $q = 1,5$ кг/с, $v_b = 3$ м/с, $\tau = 0,58$. Масса срезанного стебля подсолнечника $m_{ст} = 109,66–243,26$ г, удельное содержание массы семян в массе срезанного стебля 0,25–0,27.

5. Производственными испытаниями решета с регулируемыми отверстиями, проведенными на уборке подсолнечника сорта «Саратовский-20» в ИП «Глава К(Ф)Х Заикин Е.Б.» Балашовского района Саратовской области, установлено, что содержание сорных примесей в проходе вороха подсолнечника через ВРО, оснащённую решетом с регулируемыми отверстиями, составило $Q_2 = 2,3$ %, по сравнению с ВРО комбайна, оснащённой двумя жалюзийными решетами, – $Q_2 = 6,3$ %. Годовая экономия эксплуатационных затрат составила 14787,85 руб. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 0,097 года.

**Основные положения диссертации
опубликованы в следующих работах:**

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Попов, И. Ю.* Математическое выражение просеивания зернового вороха сквозь отверстия, имеющие форму линзы / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Аграрная наука.* – 2012. – № 1. – С. 31 (0,1/0,05 печ. л.).

2. *Попов, И. Ю.* Экспериментальная зависимость сорности вороха подсолнечника от величины смещения отверстий универсального решета с регулируемыми отверстиями / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Научное обозрение.* – 2011. – № 5. – С. 182–191 (0,86/0,43 печ. л.).

3. *Попов, И. Ю.* Математическое выражение для определения оптимального значения коэффициента смещения отверстий универсального решета с регулируемыми отверстиями при очистке вороха подсолнечника / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Вестник Саратовского ГАУ.* – 2012. – № 3. – С. 49–51 (0,24/0,12 печ. л.).

Публикации в других изданиях

4. *Попов, И. Ю.* Технологические недостатки процесса провеивания зерна в комбайнах / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Вавиловские чтения – 2007 : сб. науч. тр. / СГАУ им. Н. И. Вавилова.* – Саратов, 2007. – Ч. 3. – С. 216–218 (0,12/0,06 печ. л.).

5. *Попов, И. Ю.* Пути повышения качества очистки зерна при работе зерноуборочного комбайна путём модернизации решётных станков / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Аграрная наука в XXI веке – проблемы и перспективы : сб. науч. тр.* – Саратов : Научная книга, 2008. – С. 135–137 (0,12/0,06 печ. л.).

6. *Попов, И. Ю.* Конструкция и принцип работы решета с регулируемыми отверстиями / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию со дня рождения профессора В. В. Красникова / СГАУ им. Н. И. Вавилова.* – Саратов, 2008. – С. 137–141 (0,16/0,08 печ. л.).

7. *Попов, И. Ю.* Методика проведения экспериментальных исследований при работе универсального регулируемого решета / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 95-летию Саратовского госагроуниверситета.* Ч. 2. – Саратов, 2008. – С. 330–331 (0,12/0,06 печ. л.).

8. *Попов, И. Ю.* Лабораторная установка для исследования процесса работы универсального решета с регулируемыми отверстиями // А. С. Старцев, И. Ю. Попов // *Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 80-летию со дня рождения профессора В. Г. Кобы / СГАУ им. Н. И. Вавилова.* – Саратов, 2011. – С. 220–224 (0,32/0,16 печ.л.).

9. *Попов, И. Ю.* Использование дополнительного решета в комбайне / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // Проблемы и перспективы развития сельского хозяйства России : сб. науч. тр. – Саратов, 2008. – С. 172–174 (0,12/0,06 печ. л.).

10. *Попов, И. Ю.* Технология очистки вороха подсолнечника решетом с регулируемыми отверстиями / А. С. Старцев, И. Ю. Попов // Восьмой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций, Саратов, 19–20 сентября 2013 г., СГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2013. – С. 290–291 (0,125/0,06 печ. л.).

11. *Попов, И. Ю.* Решето с регулируемыми отверстиями для очистки зерна различных культур / Всероссийская молодёжная выставка-конкурс прикладных исследований, изобретений и инноваций, Саратов, 27–28 октября 2009 г. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2009. – С. 79 (0,125 печ. л.).

12. *Попов, И. Ю.* Влияние коэффициента смещения отверстий τ на процесс просеивания вороха подсолнечника через решето с регулируемыми отверстиями / И. Ю. Попов // Аграрная наука в XXI веке: проблемы и перспективы / СГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2008. – С. 107–109 (0,12 печ. л.).

13. *Попов, И. Ю.* Теоретическая зависимость механических примесей в проходе и сходе с решета с регулируемыми отверстиями от подачи вороха подсолнечника / И. Ю. Попов // Аграрная наука в XXI веке : проблемы и перспективы / СГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2008. – С. 109–115 (0,33 печ. л.).

Патенты

14. Пат. 73805 Российская Федерация, МПК В 02В 1/02. Решето с регулируемыми отверстиями для очистки зерна различных культур / Попов Ю. И., Попов И. Ю., Попов М. Ю., Старцев А. С. – № 2008101299/22 ; заявл. 09.01.2008 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16. – 2 с.

15. Пат. 2401530 Российская Федерация, МПК А01F 12/44, А01D 41/12. Устройство для очистки зерна с разделением по фракциям / Попов Ю. И., Попов И. Ю., Попов М. Ю. – № 2009114400/21 ; заявл. 15.04.2009 ; опубл. 20.10.2010, Бюл. № 29. – 11 с.

16. Пат. 2414971 Российская Федерация, МПК В07С 5/00, В07В 1/00. Универсальный калиброклассификатор / Попов Ю. И., Попов И. Ю., Попов М. Ю. – № 2009123035/05 ; заявл. 16.06.2009 ; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9. – 15 с.