УДК 631.362.322
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2025-168-2-2-7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ НА ПЛОСКИХ РЕШЕТАХ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В.П. Чеботарев,
зав. каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Д.Н. Бондаренко,
ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

А.А. Зенов,
ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

Д.А. Яновский,
ст. преподаватель каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ

Г.А. Радишевский,
доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Н.П. Гурнович,
доцент каф. сельскохозяйственных машин БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В статье описано исследование процесса очистки зерновой смеси на плоских решетах с прямоугольными отверстиями, с использванием методики планирования экспериментов. Определены зависимости содержания проходовой фракции зерновой смеси в сходовой от частоты колебаний и угла наклона решет. Установлен фактор, оказывающий наибольшее влияние на параметр оптимизации, а также определен оптимальный режим работы семяочистительной машины с двумя плоскими решетами.

Ключевые слова: зерновая смесь, плоское решето, сходовая фракция, проходовая фракция, прямоугольные отверстия, колебания, угол наклона решета.

The article presents a study of the process of cleaning grain mixtures on flat sieves with rectangular holes, using a methodology for planning experiments. The dependences of the content of the passing fraction of the grain mixture in the convergent fraction on the frequency of oscillation and the angle of inclination of the sieves are determined. The factor that has the greatest influence on the optimization parameter is identified, and the optimal operating mode of a seed cleaning machine with two flat sieves is determined.

Key words: grain mixture, flat sieve, outgoing fraction, passing fraction, rectangular holes, oscillation, screen inclination angle.

Введение

Одна из основных задач при производстве зерна – его своевременная и качественная послеуборочная обработка. Основными технологическими процессами послеуборочной обработки являются: предварительная очистка, сушка, первичная очистка, вторичная очистка и обеспечение условий хранения. Каждый из этих приемов улучшает определенные качества зерна и доводит до базисных кондиций. Задачей очистки (сепарации) является выделение из зерновой смеси всех примесей, а также удаление битого, щуплого и поврежденного зерна основной культуры для повышения чистоты зернового материала. Очистке должно подвергаться все убранное зерно.

Принцип работы сепарирующих органов основан на различии физико-механических свойств отдельных частиц зерновой смеси. К этим свойствам относятся: размеры, форма, аэродинамические свойства, состояние поверхности, плотность, электрофизические свойства, упругость, цвет и другие. Способы очистки и сортирования зерновой смеси определяются в зависимости от физико-механических свойств, составляющих исходный ворох [1].

Зерновую смесь на решетах разделяют по толщине (решета с прямоугольными отверстиями) и по ширине (решета с круглыми отверстиями). Процесс работы любого решета заключается в том, что поступившая на его поверхность смесь разделяется на проходовую и сходовую части [2, 3]. Частицы, размеры которых меньше размеров отверстий решета, проваливаются через них, образуя проходовую фракцию. Крупные зерна, размеры которых больше размеров

отверстий решета, сходят с него не проваливаясь и образуют сходовую фракцию. Процесс непрерывного перемещения зернового материала по решетам обеспечивается их колебаниями с определенной частотой, амплитудой, направлением колебаний, а также углом установки решет к горизонтали.

Научные исследования процессов сепарирования зерновых смесей проводились многими учеными в различных областях сепарирования зерна. Огромный вклад в развитие теории сепарирования зерна внесли В.В. Гортинский [4], И.Е. Кожуховский [5], В.М. Цециновский [6] и другие.

В современных семяочистительных машинах, как правило, используются два и более решет с различной формой и размером отверстий [7]. Решета закрепляются на решетном стане и в процессе работы имеют одинаковый угол, частоту и амплитуду колебаний. В то же время, на каждое из решет поступает зерновая смесь, имеющая различные геометрические размеры и вес, так как в процессе движения от верхнего решета к нижнему из зерновой смеси выделяются фракции, имеющие размеры больше проходных отверстий (по ширине либо толщине). В результате на каждом решете в сходовой фракции зерновой смеси образуются компоненты проходовой фракции. В настоящее время отсутствуют какие-либо математические модели, позволяющие определять оптимальный режим работы семяочистительной машины с двумя и более решетами, обеспечивающий минимальное количество проходовой фракции в сходовой на каждом решете.

Целью работы является определение зависимости содержания проходовой фракции зерновой смеси в сходовой на плоских решетах с прямоугольными отверстиями от частоты колебаний и угла наклона решет и определение фактора, оказывающего наибольшее влияние на параметр оптимизации, а также оптимальных режимов работы семяочистительной машины с двумя плоскими решетами.

Основная часть

Исследование процесса очистки зерновой смеси проводилось на кафедре сельскохозяйственных машин Белорусского государственного аграрного технического университета. Для проведения исследования использовалась лабораторная установка (рис. 1), состоящая из рамы 6, на которой с помощью подвесов 7 установлен решетный стан 4. Решетный стан 4 состоял из приемного бункера 3, под которым размещен блок из двух решет 9, закрепленных к решетному стану двумя фиксаторами 8. Для сбора сходовой фракции из блока решет 9 под ними была установлена емкость для отбора фракций 11. Колебания решетного стана 4 осуществлялись посредством передачи крутящего момента от электродвигателя 10 через клиноременную передачу на вал с эксцентриковым механизмом 5, который соединен с решетным станом 4 одним из подвесов. Изменение частоты колебаний осуществлялось с помощью преобразователя частоты 2 и пульта управления 1 (рис. 1).

Регулировка угла наклона решетного стана производилась маховиком 1 с последующей фиксацией 2. Контроль установленного угла происходит по регулировочной шкале 3 (рис. 2).

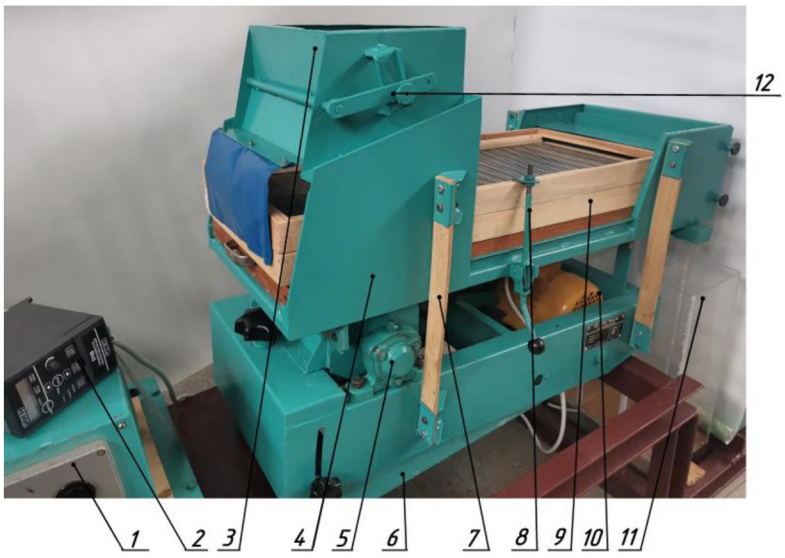


Рисунок 1. Лабораторная установка:
1 – пульт управления; 2 – преобразователь частоты колебаний; 3 – приемный бункер; 4 – решетный стан; 5 – вал с эксцентриковым механизмом; 6 – рама; 7 – подвес; 8 – фиксатор; 9 – блок решет; 10 – электродвигатель; 11 – емкость для отбора фракций; 12 – механизм дозировки подачи зерновой смеси

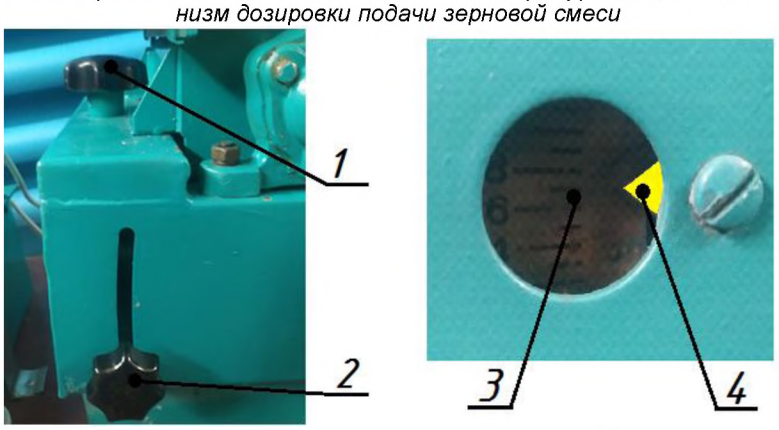
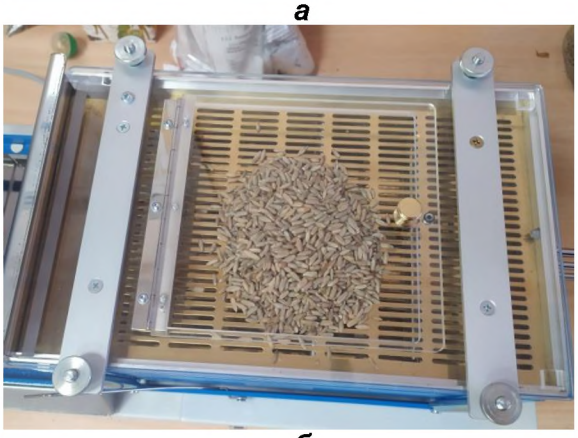


Рисунок 2. Механизм регулировки угла наклона решетного стана: а – общий вид механизма; б – визуальный контроль;1 – маховик регулировки угла наклона решетного стана; 2 – маховик фиксации угла наклона; 3 – шкала регулировочная; 4 – указатель

Перед началом исследований производилась подготовка зерновой смеси с использованием лабораторной сортировальной машины *Sortimat* [8]. В установке использовалось три типа решет с прямоугольными отверстиями и шириной (h) – 2,8; 2,5; 2,0 мм, благодаря которым были выделены три зерновые фракции по 100 г:

– фракция $2,8 > h > 2,5$ мм;
– фракция $2,5 > h > 2,0$ мм;
– фракция $h < 2,0$ мм.

а



б

Рисунок 3. Лабораторная сортировальная машина Sortimat («Pfeuffer», Германия):
а – общий вид сортировальной машины;
б – навеска с зерном на верхнем решете

Показатели лабораторной установки и зерновой смеси:

- масса навески – 300 г;
– культура – ячмень;
– влажность культуры – $W = 14$ %
– верхнее решето – плоское, с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм;
– нижнее решето – плоское, с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм;
– частота колебаний $V = 40…50$ Гц;
– угол наклона решет к горизонтали $\alpha = 6…10°$;
– время сепарации навески зерновой смеси – 1 минута.

Процесс очистки происходил путем подачи навески зерновой смеси в приемный бункер 3, откуда зерновая смесь под собственным весом ссыпалась на блок из двух решет 9. В процессе очистки зерновая смесь разделялась на три фракции: $2,5 > h$; $2,5 < h > 2,0$; $h > 2,0$, которые распределялись по ячейкам емкости для отбора фракций 11 (рис. 1). Далее каждая фракция взвешивалась, и результат фиксировался в лабораторном журнале.

Параметры оптимизации: $m_{2.5}$ – содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,5 мм, %; $m_{2.0}$ – содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,0 мм, %.

Факторы, влияющие на параметр оптимизации: α – угол установки решета, град; V – частота колебаний решета, Гц.

Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 1.

Кодирование уровней факторов осуществлялось по формуле [10]:

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Варьируемый параметр	α	V
Единица измерения	град	Гц
Кодовые обозначения факторов	x_1	x_2
Верхний уровень ($x_i = +1$)	10	50
Основной уровень ($x_i = 0$)	8	45
Нижний уровень ($x_i = -1$)	6	40
Интервал варьирования	2	5

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{t}, \quad (1)$$

где x_i – кодированное значение уровня фактора;

C_i - C_{0i} – натуральное значение фактора (соответственно, его текущее значение и значение на нулевом уровне), кг/м^3;

t – натуральное значение интервала варьирования фактора, кг/м^3.

$$t = \frac{C_i^B - C_i^H}{t}, \quad (2)$$

где C_i^B и C_i^H – значение фактора, соответственно, на верхнем и нижнем уровнях, кг/м^3.

Все эксперименты проводились в трехкратной повторности. Полученные результаты уточнялись и округлялись. С целью исключения влияния системных ошибок, вызванных внешними неконтролируемыми факторами, в ходе экспериментальных исследований выполнялась рандомизация опытов, под которой понимается чередование отдельных опытов в случайном порядке. Процедура рандомизации опытов выполнялась с помощью таблиц случайных чисел [9]. При этом, последовательно двигаясь по столбам таблицы, были выбраны числа, соответствующие порядковым номерам проводимых опытов.

Матрица ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов (закодированный вид), влияющих на $m_{2.5}$ и $m_{2.0}$, данные в раскодированном виде и результаты измерений приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2. Матрица планирования для $m_{2.5} = f(\alpha, V)$ и результаты измерений

Номер опыта	Уровень фактора			Раскодированный вид		y_n			$\overline{y}_n$
	x_0	x_1	x_2	α	V	y_1	y_2	y_3	$m_{2.5}$
1	1	1	1	10	50	4,83	4,81	5,14	4,93
2	1	1	0	10	45	7,48	8,47	8,42	8,13
3	1	1	-1	10	40	6,70	6,86	7,27	6,94
4	1	0	1	8	50	2,23	2,09	1,89	2,07
5	1	0	0	8	45	5,64	5,43	5,87	5,65
6	1	0	-1	8	40	5,39	5,21	5,57	5,39
7	1	-1	1	6	50	0,97	1,13	1,02	1,04
8	1	-1	0	6	45	4,81	4,95	4,21	4,66
9	1	-1	-1	6	40	5,12	5,47	5,34	5,31

Таблица 3. Матрица планирования для $m_{2.0} = f(\alpha, V)$ и результаты измерений

Номер опыта	Уровень фактора			Раскодированный вид		y_n			$\overline{y}_n$
	x_0	x_1	y_1	y_2	y_1	y_2	y_2	y_3	$m_{2.0}$
1	1	1	1	10	50	4,80	4,55	5,62	4,99
2	1	1	0	10	45	2,76	3,13	3,78	3,22
3	1	1	-1	10	40	1,97	2,49	1,79	2,08
4	1	0	1	8	50	3,62	3,38	3,07	3,36
5	1	0	0	8	45	2,30	2,71	3,09	2,70
6	1	0	-1	8	40	1,90	2,41	1,73	2,01
7	1	-1	1	6	50	3,91	4,96	3,57	4,15
8	1	-1	0	6	45	2,69	2,77	2,36	2,61
9	1	-1	-1	6	40	2,58	1,98	2,32	2,29

С помощью критерия Кохрена выполнялась проверка гипотезы об однородности дисперсий. Табличное значение критерия Кохрена выбиралось по таблице [10, с. 159, Приложение 2], для чисел степеней свободы $f_1 = 2$ и $f_2 = 9$ $G(\alpha, f_k, k)$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ для $m_{2.5} = f(\alpha, V)$ и $m_{2.0} = f(\alpha, V)$ оно составляет $G = 0{,}477$. Так как расчетное значение критерия Кохрена меньше табличного $G_{p\ m2.5} = 0{,}424 < G = 0{,}477$ и $G_p\ m2.0 = 0{,}303 < G = 0{,}477$, условие выполняется для каждого значения параметра оптимизации. Следовательно гипотеза об однородности построчных выборочных дисперсий не противоречила экспериментальным данным.

Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии приведены в таблицах 4, 5.

Регрессионное уравнения второго порядка для параметра оптимизации $m_{2.5} = f(\alpha, V)$

$$y = 5{,}62 + 1{,}50x_1 - 1{,}60x_2 + 0{,}56x_1x_2 + 0{,}80x_1^2 - 1{,}87x_2^2 \quad (3)$$

Регрессионное уравнения второго порядка для параметра оптимизации $m_{2.0} = f(\alpha, V)$

$$y = 2{,}49 + 0{,}21x_1 + 1{,}02x_3 + 0{,}26x_1 \cdot x_3 + 0{,}53x_1^2 + 0{,}30x_3^2 \quad (4)$$

Следующий этап обработки экспериментальных данных заключался в определении значимости полученных коэффициентов в уравнениях регрессии. Значимость коэффициентов уравнений проверялась по t–критерию Стьюдента [10]. Затем определялись доверительные интервалы соответствующих коэффициентов. Табличное значение t-критерия Стьюдента $t_{(\alpha,f)}$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$, числе степеней свободы $f = 18$ равно 2,1 [10, с. 159, Приложение 1]. Согласно условию [9, с. 63] в регрессионных уравнениях второго порядка $m_{2.5} = f(\alpha, V)$ и $m_{2.0} = f(\alpha, V)$ статистически незначимые коэффициенты отсутствуют.

Адекватность уравнений регрессии (3), (4) экспериментальным данным проверялась по F-критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера выбирались по таблице [10, с. 160, Приложение 3], для чисел степеней свободы f и $f_{ад}$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ оно составляло $F(\alpha, f_{ад}, f_в) = 3{,}2$. Так как расчетное значение критерия Фишера меньше табличного $F_{p\ m2.5} = 2{,}21 < F(\alpha, f_{ад}, f_в) = 3{,}2$ и $F_{p\ m2.0} = 2{,}54 < F(\alpha, f_{ад}, f_в) = 3{,}2$ то, следовательно, полученные уравнения адекватно описывают экспериментальные данные.

Для использования уравнений (3), (4) в инженерных расчетах они были раскодированы заменой кодового значения факторов x_1, x_2 на натуральные переменные.

$$m_{2.5} = -104{,}18 - 4{,}98\alpha + 5{,}95V + 0{,}06\alpha V + 0{,}20\alpha^2 - 0{,}07V^2 \quad (5)$$

$$m_{2.0} = 35{,}20 - 3{,}22\alpha - 1{,}10V + 0{,}03\alpha V + 0{,}13\alpha^2 + 0{,}01V^2 \quad (6)$$

Поверхности отклика и их двумерные сечения, построенные по уравнениям регрессии с использованием программы «*Statistica* 10», представлены на рисунке 4.

Таблица 4. Коэффициенты уравнения регрессии $m_{2.5} = f(\alpha, V)$

Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели	Значение коэффициента
b_0	5,62
b_1	1,50
b_2	-1,60
$b_1 \cdot b_2$	0,56
b_1^2	0,80
b_2^2	-1,87

Таблица 5. Коэффициенты уравнения регрессии $m_{2.0} = f(\alpha, V)$

Коэффициенты уравнения регрессии квадратичной модели	Значение коэффициента
b_0	2,49
b_1	0,21
b_2	1,02
$b_1 \cdot b_2$	0,26
b_1^2	0,53
b_2^2	0,30

Определение оптимальных параметров работы решет, обеспечивающих минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с пря-

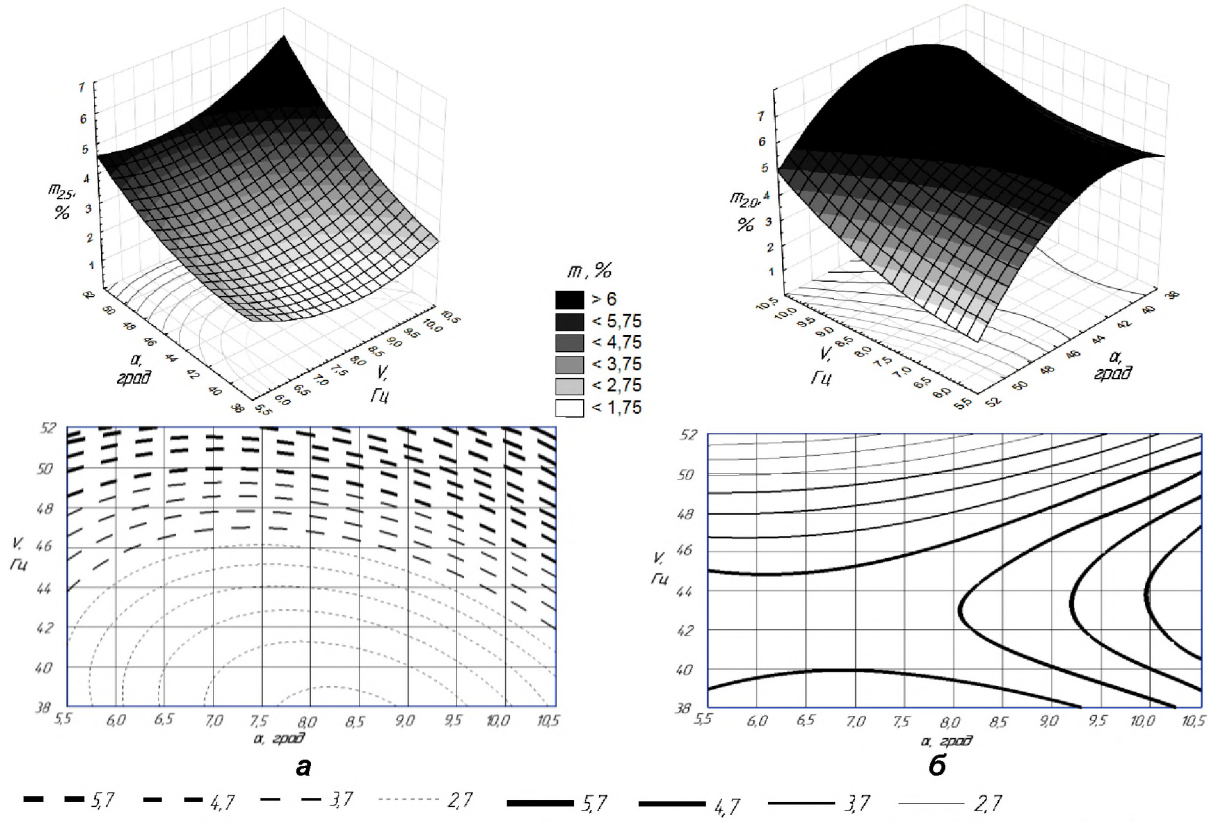


Рисунок 4. Поверхности отклика и их двумерные сечения: а – $m_{2.5} = f(\alpha, V)$; б – $m_{2.0} = f(\alpha, V)$

моугольными отверстиями шириной 2,5 мм и минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм, осуществлялся графическим методом путем наложения линий равного уровня параметров оптимизации (рис. 5).

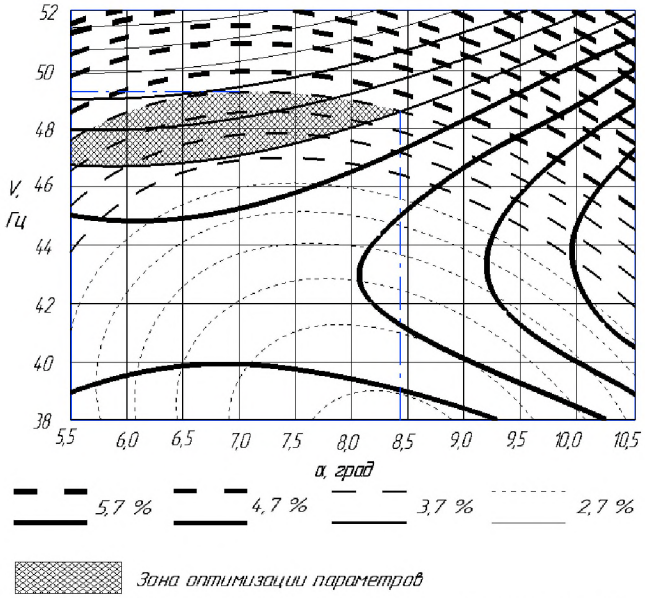


Рисунок 5. Графическое определение оптимальных параметров работы решет методом наложения линий равного уровня

Анализ поверхности отклика и ее двумерного сечения для $m_{2.5} = f(\alpha, V)$ показал:

– увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета от 6°до 10° снижает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм от 4,3 % до 2 %;

– увеличение угла наклона решета с 6 до 10° при частоте колебаний решета 50 Гц повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм на 3,9 %.

Анализ поверхности отклика и ее двумерного сечения для $m_{2.0} = f(\alpha, V)$ показал:

– увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета 6° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм на 1,9 %;

– увеличение частоты колебаний решета от 40 до 50 Гц при угле наклона решета 10° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм на 2,9 %;

увеличение угла наклона решета с 6 до 10° при частоте колебаний решета 50 Гц повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм на 0,84 %.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

1. Оптимальными параметрами для работы решет, обеспечивающих минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм и минимальное содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм, являются: $V = 47…49$ Гц, $\alpha = 5{,}5…8{,}4°$.

2. Для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм повышение частоты колебаний от 40 до 50 Гц при угле установки решет 10° повышает содержание зерна толщиной меньше 2,5 мм в сходе, в среднем, на 3,2 %.

3. Для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,0 мм повышение частоты колебаний от 40 до 50 Гц при угле установки решет 6° снижает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе, в среднем, на 2,0 %.

4. Увеличение угла наклона решета с 6 до 10°, при частоте колебаний 40…50 Гц незначительно снижает содержание зерна толщиной меньше 2,0 мм в сходе, в среднем, на 0,4 %.

Таким образом, для решета с прямоугольными отверстиями шириной 2,5 мм факторы V и α оказывают практически равнозначное влияние на параметр оптимизации $m_{2.5}$. Для решета с прямоугольными отверстиями толщиной 2,0 мм наибольшее влияние на параметр оптимизации $m_{2.0}$ оказывает частота колебаний (V), нежели угол установки решета (α).

Полученные результаты исследования могут применяться при проектировании решетных зерноочистительных машин с регулируемыми параметрами угла установки и частоты колебаний решет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пути улучшения технологического процесса очистки зерна / В.П. Чеботарев [и др.] // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24-25 ноября 2022 г. / Белорус. гос. аграрн. техн. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2022. – С. 93-96.

2. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные машины: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. / Н.И. Кленин, С.Н. Киселев, А.Г. Левшин. – М.: Колос, 2008. – 816 с.

3. Халанский, В.М. Сельскохозяйственные машины: учебник / В.М. Халанский, И.В. Горбачев. – М.: Колос, 2003. – 624 с.

4. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1973. – 295 с.

5. Кожуховский, И.Е. Механизация очистки и сушки зерна / И.Е. Кожуховский, Г.Т. Павловский. – М.: Колос, 1968. – 439 с.

6. Технология обработки семян зерновых культур: учеб. пособие для специалистов XI111 / В.М. Цециновский [и др.]. – М., 1982. – 204 с.

7. Воздушно-решетные сепараторы МУЗ. Полымя ЗАО «Борисовский завод «Металлист»]. – URL: https://polymya.com/ru/catalog/separatory-zernoochistitelnye-mashiny/vozdushno-reshetnye-separatory-muz/ (дата обращения: 07.03. 2024).

8. Лабораторная сортировочная машина Sortimat. – URL: https://www.pfeuffer.com/ru/produkt/sortimat (дата обращения: 07.03. 2024).

9. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

10. Хайлис, Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.04.2025

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).
Журнал выходит один раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.
Стоимость подписки на 1-е полугодие 2025 года: для индивидуальных подписчиков - 48,39 руб., ведомственная подписка - 50,91 руб.