

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ВИБРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РЕШЕТАМИ

**Пивень М.В., к.т.н., доц.**

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)*

*Методом планування багатofакторного експерименту отримана математична модель процесу сепарування зернових сумішей циліндричними вібровідцентровими решетами.*

Постановка проблемы. Сепарирование зерновых смесей в режимах высоких удельных загрузок приводит к увеличению толщины слоя смеси, что снижает эффективность процесса. Проходовые частицы не успевают выделиться из слоя и достигнуть поверхности решета, чтобы просеяться через его отверстия. В результате засоренность зернового материала возрастает, качество разделения снижается. Таким образом, для повышения эффективности сепарирования необходимо интенсифицировать внутрислойные процессы, называемые сегрегацией.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] установлены кинематические режимы работы цилиндрических виброцентробежных решет, интенсифицирующие сегрегацию. Однако при возрастании эффективности сегрегации наступает снижение просеваемости семян через отверстия решета. Это объясняется несоответствием оптимальных значений кинематических параметров для сегрегации и просеваемости.

Интенсификация сегрегации восходящим воздушным потоком исследована в работах [2, 3]. Применение воздушного потока уменьшает внутреннее трение смеси, увеличивает степень разрыхленности слоя, что способствует быстрому выделению частиц из слоя. Однако восходящий воздушный поток препятствует прохождению семян через отверстия решет.

Наиболее рационально интенсифицировать сегрегацию применением разрыхлителей зерновых смесей [4, 5]. Они сообщают дополнительные воздействия в смесь, разрыхляют ее и не препятствуют прохождению зерен сквозь отверстия решет. Однако в литературе отсутствуют исследования влияния разрыхлителей на процесс сепарирования.

Цель исследований – методом планирования эксперимента построить математическую модель процесса сепарирования зерновых смесей цилиндрическими виброцентробежными решетами с разрыхлителями.

Результаты исследований. Лабораторией послеуборочной обработки зерна ХНТУСХ имени Петра Василенка разработаны новые конструкции разрыхлителей в виде наваренных на поперечных перемычках ребер или выштампованных продолговатых рифлей (рис.1, а, б).

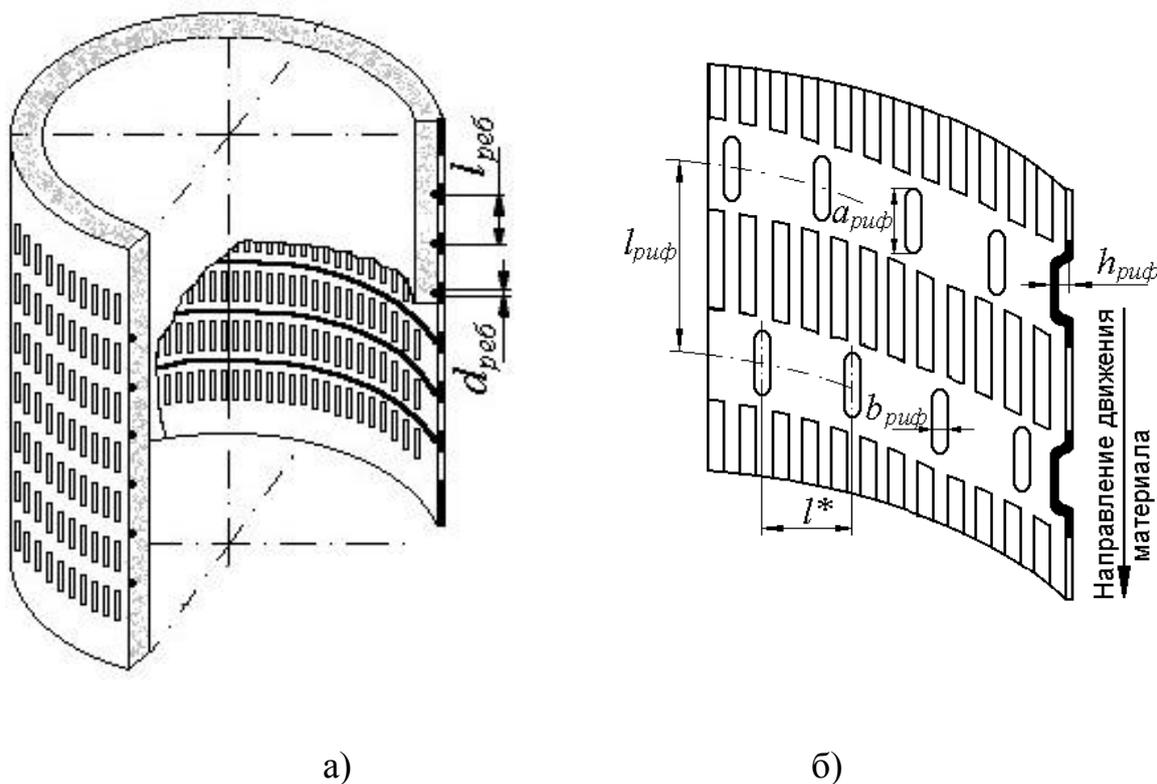


Рис.1 - Конструктивные схемы цилиндрических решет с разрыхлителями:

а – с ребрами; б – с рифлями

При вибрациях решета разрыхлители сообщают воздействия в смесь и разрыхляют ее, что способствует быстрому продвижению частиц из слоя к решетку. Ребра устанавливаются на подсевном решете (рис.1, а), так как его проходными частицами являются мелкие примеси и дробленое зерно не требующие ориентации перед просеиванием в отверстия. Рифли устанавливаются на сортировальном решете (рис.1, б), поскольку его проходными частицами являются мелкие зерна требующие продольной направленности. Размеры продолговатых отверстий подсевного решета  $1,7 \times 16$  мм<sup>2</sup>, сортировального  $2,2 \times 20$  мм<sup>2</sup>. Конструктивными параметрами разрыхлителей являются: диаметр ребер  $d_{реб}$ ; расстояние между ребрами  $l_{реб}$ ; высота рифлей  $h_{риф}$ ; расстояние между рядами рифлей  $l_{риф}$ ; расстояние между рифлями  $l^*$ ; ширина рифлей  $b_{риф}$ ; длина рифлей  $a_{риф}$ .

Для исследования процесса сепарирования зерновых смесей с разрыхлителями была применена методика планирования многофакторного эксперимента [5]. Методика предусматривает проведение экспериментальных исследований в два этапа: построение математической модели изучаемого процесса и нахождение оптимальных значений его параметров.

В данной статье представлены результаты первого этапа исследований. За критерий оптимизации процесса сепарирования зерновых смесей с интенсификацией разрыхлителями принята удельная производительность, определяемая величиной удельной загрузки при заданной чистоте сходовой фракции. Кинематические параметры виброцентробежного сепаратора приняты

паспортными для обеспечения максимальной просеваемости. Их значения не варьировались и составляли: амплитуда колебаний решет – 6 мм; круговая частота колебаний – 94,2 рад/с; угловая скорость вращения решет – 11,77 рад/с.

Для сокращения числа опытов были проведены отсеивающие эксперименты. Установлено, что факторы ширина и длина рифлей – малозначащие и были исключены из дальнейшего рассмотрения. Порядок проведения опытов был следующим. Согласно матрицы плана устанавливалось одно из сочетаний уровней факторов. Производился пуск сепаратора и подавалась зерновая смесь озимой пшеницы естественного гранулометрического состава. После прохождения всей смеси и фиксирования затраченного времени определяли чистоту сходовой фракции  $\varphi_{сф}$ . При значении  $\varphi_{сф}$  меньше необходимого уменьшали заслонкой подачу смеси при следующей повторности опыта. Получение (заданных) требуемых значений чистоты добивались при всех сочетаниях уровней факторов, влияющих на процесс решетного сепарирования. После этого определяли удельную производительность сепаратора, полученную при том или ином сочетании факторов. Перед проведением эксперимента были назначены уровни варьирования факторов и произведено их кодирование (табл.1).

Таблица 1 - Кодированные значения факторов

Уровень и интервал варьирования факторов	Факторы				
	диаметр ребер $d_{реб}$ , мм	расстояние между ребрами $l_{реб}$ , мм	высота рифлей $h_{риф}$ , мм	расстояние между рядами рифлей $l_{риф}$ , мм	расстояние между рифлями $l^*$ , мм
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
+1	1,5	42	1,1	42	25
0	1,0	21	0,7	21	15
-1	0,5	21	0,3	21	5
$\epsilon$	0,5	21	0,4	21	10

Для нахождения оптимального сочетания выделенных факторов, дающего наибольшую удельную производительность, был проведен эксперимент, включающий 16 опытов, составляющих полуреплику полного факторного эксперимента типа  $2^5$ . После реализации эксперимента и расчета коэффициентов регрессии была получена линейная модель

$$Y=66,782+0,859x_1-2,549x_2+0,799x_3-0,831x_4-0,665x_5-2,754x_1x_2+0,831x_1x_3-0,211x_1x_4+3,838x_1x_5+0,051x_2x_3-1,374x_2x_4-1,336x_2x_5+2,639x_3x_4-0,597x_3x_5-0,969x_4x_5.(1)$$

Адекватность линейной модели проверялась с помощью критерия Фишера. По результатам статистического анализа вычислены значения дисперсии неадекватности  $S_{LF}^2=0,1373$ ; дисперсии характеризующей ошибку

опыта  $S_y^2=0,1426$ ; расчетного критерия Фишера  $F_{расч}=0,0033$ . Табличное значение критерия Фишера с числом степеней свободы  $f_1 = N - k - 1 = 10$  и  $f_2 = N(m - 1) = 32$   $F_{табл} = 2,18$ . Как видно,  $F_{расч} < F_{табл}$ , поэтому гипотезу об адекватности линейной модели можно принять.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась с помощью построения доверительного интервала. После сравнения абсолютных значений коэффициентов регрессии с абсолютной величиной их доверительного интервала установлено, что существенное влияние на показатель удельной производительности оказывают не только линейные эффекты, но и большинство их взаимодействий. Следовательно, модель нелинейна и гипотезу адекватности проверяли по второму критерию – равенство нулю коэффициентов при квадратичных членах регрессии (нуль-гипотеза). Установлено, что коэффициенты при квадратичных членах заметно отличаются от нуля, а исследуемая зависимость не является линейной. Следовательно, для описания результатов эксперимента линейная модель не может быть принята. В дальнейших исследованиях необходимо использовать планирование второго порядка. Методом крутого восхождения по поверхности отклика были установлены более благоприятные условия для проведения следующей стадии эксперимента. Результаты крутого восхождения приведены в табл.2.

Таблица 2 - Матрица крутого восхождения

Показатель		Факторы и их размерность							
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$			
1		2	3	4	5	6			
Коэффициенты регрессии линейных членов $b_i$		0,859	-2,549	0,799	-0,831	-0,665			
Произведение $b_i \varepsilon_i$		0,429	-53,52	0,319	-17,45	-6,65			
Шаг (соответствующий $x_1$ на 2 мм)		0,2	-24,93	0,15	-18	-3,09			
Округленный шаг		0,2	-21	0,2	-21	-3	Значение критерия оптимизации $Y$ , кг/час·дм <sup>2</sup>	$Y_{опт} = 75,90$	
Ном ер опы та	1	1,0	21	0,7	21	15			68,78
	2	1,2	21	0,9	21	12	72,34		
	3	1,4	21	1,1	21	9	75,90		
	4	1,6	21	1,3	21	6	71,20		

Для первого фактора  $x_1$  был выбран единичный шаг равный 0,2 мм. Для получения шагов других факторов их произведение  $b_i \varepsilon_i$  уменьшали во столько раз, во сколько уменьшалась  $b_i \varepsilon_i$  для первого фактора при делении его на единичный шаг. Для удобства проведения опытов крутого восхождения значения шагов факторов округлялись в сторону уменьшения или увеличения. В силу конструктивных ограничений факторы  $x_2$  и  $x_4$  достигли минимальной величины, и варьировать ими невозможно. Поэтому их величина была зафиксирована и в дальнейших опытах оставалась на оптимальном уровне, соответствующем расстоянию между двумя соседними перемычками, равному 21 мм.

Результаты движения по градиенту дают основания предположить, что выбранный ранее центр эксперимента находится вблизи области оптимума, поскольку наилучшие результаты ( $y=75,90$  кг/час·дм<sup>2</sup> при  $X_1=1,4$  мм;  $X_2=21$  мм;  $X_3=1,1$  мм;  $X_4=21$  мм;  $X_5=9$  мм) получены уже после третьего опыта.

Описание области оптимума проводили исходя из результатов крутого восхождения. За центр эксперимента приняты уровни факторов, при которых получены наилучшие показатели критерия оптимизации. Кодированные значение факторов и уровни их варьирования приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Факторы, интервалы и уровни их варьирования в экспериментах по описанию области оптимума

Уровень и интервал варьирования факторов	Факторы				
	диаметр ребер $d_{реб}$ , мм	расстояние между ребрами $l_{реб}$ , мм	высота рифлей $h_{риф}$ , мм	расстояние между рядами рифлей $l_{риф}$ , мм	расстояние между рифлями $l^*$ , мм
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
+2	1,8	42	1,5	42	15
+1	1,6	21	1,3	21	12
0	1,4	21	1,1	21	9
-1	1,2	21	0,9	21	6
-2	1,0	21	0,7	21	3
$\varepsilon$	0,2	21	0,2	21	3

Для описания области оптимума математической моделью был применен центральный композиционный униформ-рототабельный план второго порядка. При этом данные для построения матрицы плана равнялись: ядро плана  $2^k=16$ ; число звездных точек  $2k^*=10$ ; число нулевых точек  $n_0=6$ ; общее число опытов  $N=32$ ; величина звездного плеча  $L=2,0$ .

После реализации матрицы эксперимента и расчета коэффициентов регрессии получена математическая модель второго порядка

$$\begin{aligned}
Y = & 75,771 + 0,3348x_1 - 0,153x_2 + 0,2172x_3 - \\
& 0,0971x_4 + 0,257x_5 + 0,000625x_1x_2 + 0,00312x_1x_3 + 0,00187x_1x_4 - \\
& 0,00562x_1x_5 + 0,000625x_2x_3 - 0,000625x_2x_4 + 0,00187x_2x_5 + 0,00687x_3x_4 - \\
& 0,000625x_3x_5 + 0,000625x_4x_5 - 0,333x_1^2 - 0,211x_2^2 - 0,115x_3^2 - 0,134x_4^2 - 0,086x_5^2. \quad (2)
\end{aligned}$$

Для проверки гипотезы об адекватности модели второго порядка был проведен статистический анализ уравнения регрессии. По результатам анализа вычислены значения дисперсии неадекватности  $S_{LF}^2 = 0,3746$ ; дисперсии характеризующей ошибку опыта  $S_V^2 = 0,2203$ ; расчетного критерия Фишера  $F_{расч} = 1,54$ . Табличное значение критерия Фишера с числом степеней свободы  $f_1 = 26$ ,  $f_2 = 64$  составило  $F_{табл} = 1,6$ . Так как  $F_{расч} = 1,54 < F_{табл} = 1,6$ , гипотезу об адекватности описания уравнением (2) результатов эксперимента можно считать верной с 95%-ной вероятностью.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась с помощью построения доверительного интервала. Расчет показал, что большинство коэффициентов уравнения можно считать значимыми с 95%-ной вероятностью.

Для использования уравнения (2) в качестве расчетной формулы произведено его раскодирование

$$\begin{aligned}
q = & 50,8485 + 24,970d_{реб} + 0,0122l_{реб} + 7,2746h_{риф} + 0,00573l_{риф} + 0,2724l^* + \\
& + 0,00015d_{реб}l_{реб} + 0,078d_{реб}h_{риф} + 0,00045d_{реб}l_{риф} - 0,0094d_{реб}l^* + \\
& + 0,00015l_{реб}h_{риф} - 0,0000014l_{реб}l_{риф} + 0,00003l_{реб}l^* + 0,0016h_{риф}l_{риф} - \\
& - 0,00104h_{риф}l^* - 0,00001l_{риф}l^* - 8,325d_{реб}^2 - 0,00048l_{реб}^2 - \\
& - 2,875h_{риф}^2 - 0,0003l_{риф}^2 - 0,0096l^{*2}. \quad (3)
\end{aligned}$$

Расчетные данные, полученные с помощью уравнения (3), хорошо согласуются с экспериментальными. Так, например, для опыта, проведенного при  $d_{реб} = 1,6$  мм,  $l_{реб} = 21$  мм,  $h_{риф} = 1,3$  мм,  $l^* = 21$  мм,  $l_{риф} = 12$  мм по уравнению (3) нашли, что удельная производительность сепаратора должна быть 76,04 кг/час·дм<sup>2</sup>. В результате эксперимента при данном значении факторов получена удельная производительность  $q = 76,01$  кг/час·дм<sup>2</sup>.

Вывод. Применением методики планирования факторного эксперимента, получена математическая модель процесса сепарирования зерновых смесей цилиндрическими виброцентробежными решетками, позволяющая исследовать влияние параметров разрыхлителей на удельную производительность сепаратора.

## Список использованных источников

1. Гончаров Е.С. Оптимальная частота колебаний решет при обработке зерновых материалов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – К.: Урожай, 1976. – Вып.33. – С. 19 – 25.
2. Космовский Ю.А. Сравнительные исследования сепарации семян в воздушном потоке и в псевдооживленном слое для целей селекции семеноводства: Автореф. дис. ... канд. техн. наук :05.20.01 / ВИМ. – М., 1975. – 27 с.
3. Петренко Н.Н., Марченко И.В., Марченко К.Н. О возможности использования пульсирующего воздушного потока для воздушно-решетной очистки зернового вороха // Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград: КДТУ, 2002. – Вип.32. – С. 117 – 121.
4. Зерноочистительная сортировальная машина: А.с. 1282917 СССР, МКИ В07В 1/26 / Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко, С.В. Проценко (СССР). – №3924870/29-03; Заявл. 07.05.85; Опубл. 15.01.87, Бюл.№2. – 3 с.
5. Зерноочистительно-сортировальная машина: А.с.1256821 СССР, МКИ В07В 13/11 / Д.И. Мазоренко, Л.Н. Тищенко (СССР). – №3865513/29-03; Заявл. 11.03.85; Опубл. 15.09.86, Бюл. №34. – 3 с.
6. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследовании сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 167 с.

## Аннотация

### ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА СЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ВИБРОЦЕНТРОБЕЖНЫМИ РЕШЕТАМИ

Пивень М.В.

*Методом планирования многофакторного эксперимента получена математическая модель процесса сепарирования зерновых смесей цилиндрическими виброцентробежными решетками.*

## Abstract

### PLANNING EXPERIMENT IN RESEARCH OF THE PROCESS OF SEPARATION OF GRAIN MIXTURES BY VIBROCENTRIFUGAL SIEVES

M. Piven

*The mathematical model of the process of separation of grain mixes by vibrocentrifugal cylindrical sieve has been devised in the article by multifactorial experiment planning method.*