

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОТСЕИВАЮЩЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА ОБМОЛОТА ЛЬНОТРЕСТЫ УСТРОЙСТВОМ С ЭЛАСТИЧНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

В. А. ЛЕВЧУК, ст. преподаватель
С. В. КУРЗЕНКОВ, канд. техн. наук, доцент
А. Н. ЧАЙЧИЦ, канд. техн. наук, доцент
М. В. ЦАЙЦ, магистр техн. наук, ст. преподаватель

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
Горки, Республика Беларусь

Введение. С целью повышения эффективности отделения семян в линии первичной переработки была предложена конструкция устройства, позволяющая с минимальными материальными затратами усовершенствовать серийно установленный очесывающий аппарат [1, 2].

Внедрение в Республике Беларусь заводской технологии уборки льна-долгунца позволяет начать уборочный период на 12 дней раньше, снизить энергозатраты за счет сокращения технологических операций, проводимых в поле. Вместе с тем имеет место потеря (до 70 %) льносемян [2].

Основная часть. Построение ранжированного ряда факторов по их доле, вносимой в дисперсию критерия оптимизации, производили в две стадии. Вначале проводили серию опытов по составленной матрице, а затем строили диаграммы рассеяния для визуальной оценки степени влияния того или иного фактора и оценивали ее количественно.

Для того чтобы определить экспериментальную область факторного пространства, использовали результаты, которые были получены при проведении однофакторных поисковых экспериментов [3]. Также учитывали то обстоятельство, что при решении задачи оптимизации необходимо выбирать для первой серии опытов такую область, при которой будет возможность для пошагового движения к оптимуму [4].

При проведении отсеивающих экспериментов выбор уровней и интервалов варьирования факторов осуществлялся с учетом априорной информации о точности фиксирования их значений, диапазоне изменения параметра оптимизации и характере поверхности отклика. В соответствии с рекомендациями [4] принимаем функцию, описывающую поверхность отклика нелинейной, а диапазон изменения пара-

метра оптимизации широким и выбираем уровни и интервалы варьирования факторов.

Для изучения процесса обмолота лент льна обмолачивающим устройством с эластичным рабочим органом, имеющим зубчатую рабочую кромку, на основании теоретических исследований и априорной информации [5] нами были выделены следующие факторы:

Программа эксперимента предполагала оценку значимости таких факторов, как скорость подачи ленты льнотресты (кодированное обозначение X_1), смещение средней части зоны расположения семян в ленте относительно середины зоны обмолота (X_2), зазор между бичом и декой (X_3), угол установки плоскости бича к плоскости ленты (X_4), толщина слоя ленты льнотресты (X_5), частота вращения рабочего органа (X_6) как показатель кратности воздействия бича на обрабатываемую ленту льнотресты. Установление границ варьирования указанных факторов проводили как на основе анализа априорной информации и теоретический исследований, так и эмпирически. Варьирование значений исследуемых факторов осуществлялось на двух уровнях: верхнем (+) и нижнем (-). Верхняя граница скорости подачи ленты льнотресты принята равной 2,0 м/с исходя из теоретических расчетов, в результате анализа однофакторных поисковых экспериментов [3] нижнюю границу фактора X_1 приняли равным 1,2 м/с.

В качестве критерия оптимизации (Y) в отсеивающих экспериментах согласно ГОСТ 33734-2016 нами была принята степень обмолота коробочек льна

$$E_{ob} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (1)$$

где m_1 – общая масса семян, содержащихся в одном погонном метре ленты льна, кг;

m_2 – масса выделенных семян в результате обмолота с одного погонного метра, кг.

Для проведения испытаний разработанное обмолачивающее устройство было установлено в линии первичной переработки льна «Wan Dommele» ОАО «Дубровенский льнозавод».

В обмолачивающем устройстве были предусмотрены возможности регулирования следующих параметров: частоты вращения рабочего органа, скорости подачи ленты льнотресты, величины смещения ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства (зоны обмолота), толщины ленты льнотресты, зазора между бичом и декой.

Составление плана отсеивающих опытов выполняли методом случайной выборки из матрицы полного факторного эксперимента 5^2 [5]. Матрица планирования отсеивающего эксперимента и значения критерия оптимизации приведены в табл. 1.

Таблица 1. Матрица планирования отсеивающих экспериментов и значения параметра отклика

№ опыта	Факторы						Значения параметра отклика (степень обмолота $E_{об}$)			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	y_1	y_2	y_3	\bar{y}
1	-	-	-	+	+	+	0,8060	0,7750	0,9455	0,8422
2	+	+	-	-	-	+	0,9610	0,9920	0,9765	0,9765
3	+	-	+	-	+	-	0,8215	0,8525	0,8525	0,8422
4	-	+	+	+	-	-	0,6665	0,6355	0,6045	0,6355
5	-	+	+	-	-	-	0,6510	0,6510	0,6975	0,6665
6	+	-	-	+	+	+	0,9145	0,9145	0,8370	0,8887
7	-	-	+	+	-	+	0,9455	0,8370	0,9300	0,9042
8	+	+	+	+	-	-	0,8370	0,8215	0,8060	0,8215
9	-	+	-	+	+	-	0,4495	0,6200	0,6510	0,5735
10	+	+	-	-	-	-	0,7285	0,7285	0,7285	0,7285

Анализ результатов отсеивающих экспериментов выполняли на основании диаграмм рассеяния значений критерия оптимизации [6, 7]. Для этого по оси абсцисс отмечали факторы с их уровнями, а по оси ординат – опытные значения критерия оптимизации (рис. 1).

Результаты и обсуждение. Каждый фактор рассматривали независимо от других. Величину степени влияния (эффeкт) того или иного фактора оценивали по разности между средними значениями критерия оптимизации, вычисленными отдельно для каждого уровня фактора [8].

В качестве среднего значения использовали медиану. Отказ от среднего арифметического в пользу медианы обоснован тем, что зачастую влияние фактора описывается законом распределения отличным от нормального, и использование в этих случаях среднего арифметического зачастую приводит к абсурдным результатам [8].

В результате анализа диаграммы рассеяния (рис. 1) выбраны два наиболее значимых фактора: скорость подачи ленты льнотресты (X_1) и частота вращения рабочего органа (X_6). Количественную оценку эффeктов этих факторов выполняли с использованием таблицы с двумя входами (табл. 2), в клетках которой записывали оцениваемые факторы с уровнями варьирования и значения критерия оптимизации, полу-

ченные в том или ином сочетании уровней факторов. В нее также включали результаты экспериментов, распределенные по различным комбинациям уровней факторов, и рассчитывали средние значения критерия оптимизации \bar{y}_i .

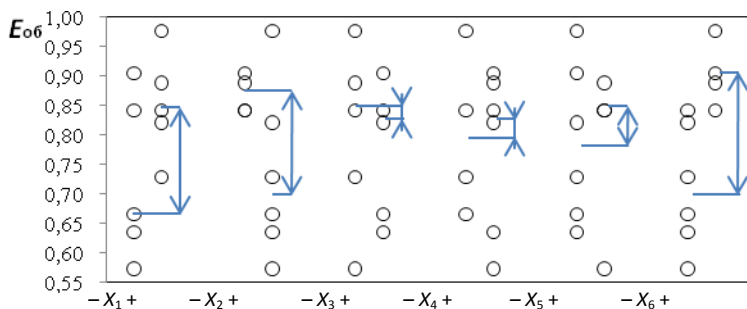


Рис. 1. Диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень обмота

Таблица 2. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов факторов

Оцениваемый фактор	+X ₁	-X ₁
+X ₆	0,9765	0,8422
	0,8887	0,9042
	$\Sigma y_1 = 1,8652$	$\Sigma y_2 = 1,7464$
	$\bar{y}_1 = 0,9326$	$\bar{y}_2 = 0,8732$
-X ₆	0,8422	0,6355
	0,8215	0,6665
	0,7285	0,5735
	$\Sigma y_3 = 2,3922$	$\Sigma y_4 = 1,8755$
	$\bar{y}_3 = 0,7974$	$\bar{y}_4 = 0,6252$

Величину эффектов факторов X₁ и X₆ рассчитывали по следующим формулам [8]:

$$X_1 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3}{2} - \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4}{2}; \quad (2)$$

$$X_6 = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2}{2} - \frac{\bar{y}_3 + \bar{y}_4}{2}. \quad (3)$$

В результате расчетов по формулам (2–3) эффекты факторов составили: X₁ = 0,1158; X₆ = 0,1916.

Оценку значимости факторов X_1 и X_4 выполняли по критерию Стьюдента (t -критерию). Экспериментальные значения t -критерия для каждого из факторов в отдельности определяли по формуле [8]:

$$t_{X_1} = ((\bar{y}_1 + \bar{y}_2) - (\bar{y}_3 + \bar{y}_4)) / \sqrt{\sum \frac{S_{R_i}^2}{n_i}}; \quad (4)$$

$$t_{X_4} = ((\bar{y}_1 + \bar{y}_3) - (\bar{y}_2 + \bar{y}_4)) / \sqrt{\sum \frac{S_{R_i}^2}{n_i}}. \quad (5)$$

где S_{R_i} – среднеквадратическая ошибка, характеризующая рассеяние относительно средних значений в i -й клетке таблицы с несколькими входами; n_i – число наблюдений в i -й клетке таблицы с несколькими входами.

Среднеквадратическую ошибку $S_{R_i}^2$ рассчитывали по формуле [8]:

$$S_{R_i}^2 = \frac{\sum y_i^2}{n_i - 1} - \frac{(\sum y_i)^2}{n_i \cdot (n_i - 1)}. \quad (6)$$

Рассчитанные по формуле (6) значения среднеквадратической ошибки составили: $S_{R1} = 0,0039$, $S_{R2} = 0,0019$, $S_{R3} = 0,0037$, $S_{R4} = 0,0022$.

По результатам расчетов по формулам (4–5) значения t -критерия для факторов X_1 и X_6 составили: $t_{X1} = 3,32$; $t_{X6} = 5,50$.

Для признания фактора значимым вычисленное значение t -критерия должно быть больше табличного. Табличные значения t -критерия принимали в зависимости от уровня значимости и числа степеней свободы f , определяемого по формуле [8]:

$$f = \sum n_i - k,$$

где k – число клеток таблицы с двумя входами, $k = 4$.

Число степеней свободы f для табл. 2 составляет 10. В этом случае табличное значение t -критерия при 5%-ном уровне значимости равно $t_{0,05} = 2,447$ [8].

Поскольку расчетные значения t -критерия факторов X_1 и X_6 превышают табличное при уровне значимости 0,05, то можно заключить, что скорость подачи ленты льнотресты и частота вращения рабочего бича являются значимыми факторами.

После выделения эффектов и оценки значимости факторов X_1 и X_6 выполняли корректировку результатов отсеивающих экспериментов для того, чтобы четче выделить эффекты других менее сильных фак-

торов и парных взаимодействий. Корректировали путем прибавления эффектов выделенных факторов с обратным знаком к результатам отсеивающих экспериментов на верхнем уровне (+).

После корректировки результатов строили корректированную диаграмму рассеяния факторов (рис. 2), а также диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов (рис. 2).

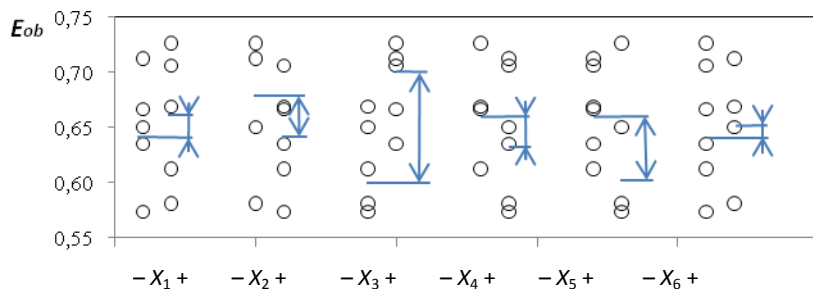


Рис. 2. Корректированная диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень обмолота

Проведя анализ скорректированной диаграммы рассеяния (рис. 2) выбран один наиболее значимый фактор: зазор между бичом и декой (X_3).

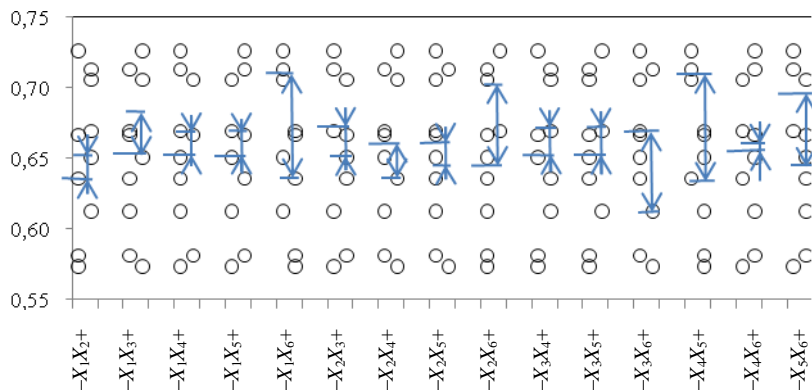


Рис. 3. Диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов, влияющих на степень обмолота

В результате анализа диаграммы рассеяния (рис. 3) выбрано наиболее значимое парное сочетание факторов: скорость подачи ленты льнотресты в сочетании с частотой вращения рабочего органа (X_1X_6). Количественную оценку эффектов этих факторов выполняли по вышеизложенной методике (табл. 3).

Эффекты факторов: $x_3 = 0,0632$; $x_1x_6 = -0,0438$.

Рассчитанные по формуле (6) значения среднеквадратической ошибки составили: $S_{R1} = 0,0005$, $S_{R2} = 0,0001$, $S_{R3} = 0,0028$, $S_{R4} = 0,0007$.

По результатам расчетов по формулам (4–5) значения t -критерия для факторов X_3 и X_1X_6 составили: $t_{X_3} = 3,18$; $t_{X_1X_6} = -2,21$.

Сравнивая полученные значения t -критерия с табличным его значением, делаем вывод, что фактор x_3 является значимым, а парное взаимодействие факторов X_1X_6 – незначимым. В нашем случае табличное значение t -критерия при числе степеней свободы $f = 6$, $t = 2,447$.

Таблица 3. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов фактора X_3 и парного взаимодействия факторов X_1X_6 , влияющих на степень обмолота

Оцениваемый фактор	$+X_1X_6$	$-X_1X_6$
$+X_3$	0,6355	0,7264
	0,6665	0,7126
		0,7057
	$\Sigma y_1 = 1,3020$	$\Sigma y_2 = 2,1446$
	$\bar{y}_1 = 0,6510$	$\bar{y}_2 = 0,7149$
$-X_3$	0,6691	0,6506
	0,5812	0,6127
	0,5735	
	$\Sigma y_3 = 1,8238$	$\Sigma y_4 = 1,2632$
	$\bar{y}_3 = 0,6079$	$\bar{y}_4 = 0,6316$

Последовательное применение процедуры отсеивания позволило нам за два этапа выделить все существенные факторы: X_1 , X_3 и X_6 и оценить эффекты этих факторов.

Заключение. В результате проведения отсеивающего эксперимента и обработки опытных данных установлено, что скорость подачи ленты льнотресты в диапазоне 1,2–2,0 м/с и частота вращения рабочего органа в диапазоне 1,7–3,3 об/с являются значимыми факторами, рациональные значения которых могут быть определены в ходе многофакторного эксперимента. Корректировка результатов отсеивающих экспериментов позволила выделить еще один значимый фактор – зазор между бичом и декой в диапазоне 0,01–0,03 м.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что парное сочетание факторов скорости подачи ленты льна и частоты вращения рабочего органа является не значимым. Поскольку в ранжированном ряду парных взаимодействий факторов, влияющих на степень обмолота он занимает наибольшую долю вносимой в дисперсию критерия оптимизации, остальные парные сочетания можно считать незначимыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб, И. А. Перспективы возделывания и переработки льна-долгунца в Республике Беларусь / И. А. Голуб // Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук. –2017. – № 3. – С. 91–98.
2. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна / В. А. Шаршунов [и др.]. – Горки: БГСХА, 2016. – 156 с.
3. Шаршунов, В. А. Поисковые эксперименты процесса обмолота лент льна устройством с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Весник БГСХА. – 2022. – № 1. – С. 148–153.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 279 с.
5. Шаршунов, В. А. Экспериментальные исследования устройства с эластичными гребенками для обмолота ленты льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, М. В. Левкин // Весці НАН Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2013. – № 3. – С. 105–110.
6. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – Москва, 1965. – 340 с.
7. Аль Насер Камаль. О двух моделях планирования отсеивающих экспериментов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Москва, 1994. – 14 с.
8. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Ленинград, 1972. – 200 с.

Аннотация. По результатам проведенных исследований построены диаграммы рассеяния факторов, а также их парных сочетаний, влияющих на степень обмолота. Анализ диаграмм рассеяния позволил выявить факторы, наиболее влияющие на степень обмолота: скорость подачи ленты льнотресты, частота вращения рабочего органа, зазор между бичом и декой, а также парное сочетание скорости подачи ленты льна и частота вращения рабочего органа.

Ключевые слова: лен, линия первичной переработки, заводской обмолот, бич, дека, отсеивающий эксперимент.