

УДК 621.928.93

Оптимизация конструктивно-технологических параметров разработанного циклона аспирационных систем зерноочистительных машин

Е.А. Гаек

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенка (г. Харьков, Украина)*

Выполнением многофакторного эксперимента установлены оптимальные значения конструктивно-технологических параметров разработанного циклона виброцентробежных зерновых сепараторов.

Ключевые слова: эксперимент, циклон, очистка, воздушный поток.

Актуальность темы. Технологический процесс передвижных сепараторов-ворохоочистителей СВС-15, СВС-25, СВС-5, ОВП-20, ОВВ-20, ОВС-25 сопровождается выделением пыли. Согласно ГОСТ 12.1.005 - 88 [1] запыленность воздуха обслуживающей рабочей зоны не должна превышать 4 мг/м³. Для увеличения эффективности работы аспирационных систем необходимо провести оптимизацию технологически-конструктивных параметров основных рабочих элементов циклонов.

Разработанный циклон [2] позволяет получить высокую эффективность очистки воздушного потока за счёт применения перспективного способа с использованием промежуточного активного отбора в два этапа.

Способ реализован за счёт применения завихрителя с наклонными лопастями и многодискового доочистителя [3, 4].

Цель исследования. С целью оптимизации технологически-конструктивных параметров разработанного циклона проведен факторный эксперимент.

Назначением циклона является удаление легких примесей частиц пыли, которые составляют дисперсную фазу воздушного потока. Эффективность очистки от легких примесей и частиц пыли определяется коэффициентом очистки [5]:

$$\eta = \frac{M_{\text{улов}}}{M_{\text{общ}}} 100\%, \quad (1)$$

где: $M_{\text{улов}}$ — вес уловленных частиц пыли циклоном; $M_{\text{общ}}$ — вес частиц пыли, которые находятся в исходном воздушном потоке.

Поэтому критерием оптимизации выбран коэффициент η .

Результаты расчетов и их анализ. На основании априорной информации установлено, что на эффективность очистки влияют следующие факторы: засоренность, дисперсный состав, количество легких примесей, влажность и скорость воздушного потока.

Производительность сепаратора СВС-25 фиксировалась на уровне 25 т/ч, поэтому она не включена в перечень факторов.

На основании традиционных экспериментов установлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность очистки, поэтому психологический эксперимент [6] оказался невостребованным.

Согласно требованиям к независимости и управляемости [7] выбраны следующие факторы: расстояние между дисками доочистителя, шириной открытия жалюзи, частота вращения ротора, количество дисков доочистителя и угол наклона лопастей завихрителя (табл. 1).

Таблица 1. Кодированные значения факторов

Уровень и интервал варьирования факторов	Факторы				
	Угол наклона лопастей завихрителя α , град	Частота вращения ротора ω , рад/с	Ширина открытия жалюзи b , мм	Количество дисков доочистителя N , шт	Расстояние между дисками доочистителя h , мм
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	30	156,0	20	9	1,5
0	20	104,0	15	6	1
1	10	52,0	10	3	0,5
ϵ	10	52,0	5	3	0,5

Для упрощения расчеты проводили в закодированном виде [6]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}; \quad (2)$$

где x_i — закодированное значение фактора, верхний уровень которого обозначен «+1», а нижний «-1»; X_i — натуральное значение фактора; X_{0i} — натуральное значение фактора на нулевом уровне; ε_i — натуральное значение интервала варьирования фактора.

Для нахождения оптимальных соотношений указанных факторов проведен эксперимент, который состоял из 16 опытов с трехкратной повторяемостью, что составляет полуреплику полного факторного эксперимента типа 25 [6, 7]. После реализации эксперимента и получения значений критерия оптимизации строили математическую модель процесса очистки воздушного потока. Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 86,8869 + 0,436x_1 + 0,096x_2 + 1,462x_3 + 1,773x_4 - 0,029x_5 + 0,03219x_1x_2 + 0,6356x_1x_3 - 0,051x_1x_4 + 0,623x_1x_5 - 0,833x_2x_3 - 0,042x_2x_4 + 0,117x_2x_5 - 0,191x_3x_4 - 1,104x_3x_5 - 0,094x_4x_5. \quad (3)$$

Адекватность математической модели проверяли с помощью критерия Фишера. Вычисленные выражения имеют значение $S_{LF}^2 = 0,0000017$; $S_Y^2 = 0,02$; $F_{расч} = 0,000058$. Как видим $F_{расч} < F_{табл}$, поэтому по критерию Фишера гипотеза о линейности модели адекватна. Значимость коэффициентов регрессии проверяли с помощью построения доверительного интервала. Доверительный интервал коэффициента регрессии с 95%-ной вероятностью для степени свободы $f = 32$ составляет: $\pm \Delta b_i = \pm \Delta b_{ij} = \pm 0,0705$.

После сравнения абсолютных значений коэффициентов регрессии с абсолютной величиной их доверительного интервала приходим к выводу: что существенное влияние на коэффициент очистки делают не только линейные эффекты, но и большинство их взаимодействий (незначимым оказался коэффициент x_1^2). В связи с этим, гипотезу об адекватности проверяли по второму критерию — равенству нулю коэффициентов при квадратичных членах регрессии (нуль-гипотезе). Для этого были поставлены дополнительные опыты в центре эксперимента, определено среднее значение критерия оптимизации и вычислена разница, которая является некоторой характеристикой кривизны поверхности отклика. Нуль-гипотеза принимается, если разница не превышает ошибки эксперимента. В

нашем случае $b_0 - \bar{Y}_0 = 0,0705 > \Delta b_{bi} = 2,036$. Отсюда следует, что зависимость не является линейной. Несмотря на то, что линейная модель для данного уравнения оказалась неадекватной, проведено крутое восхождение по поверхности отклика.

Результаты движения по градиенту дают основания предположить, что выбранный ранее центр эксперимента находится вблизи области оптимума, поскольку наилучшие результаты ($Y = 93,58\%$ при $X_1 = 10^\circ$; $X_2 = 50$ рад/с; $X_3 = 5$ мм; $X_4 = 3$ шт; $X_5 = 0,5$ мм) получены уже после третьего опыта. Описание области оптимума проводили исходя из результатов крутого восхождения. Центром эксперимента приняты уровни факторов, при которых получены лучшие показатели критерия оптимизации. Кодированные значения факторов и уровни их варьирования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Факторы, интервалы и их уровни варьирования

Уровень и интервал варьирования факторов	Факторы				
	Угол наклона лопастей завихрителя α , град	Частота вращения ротора ω , рад/с	Ширина открытия жалюзи b , мм	Количество дисков доочистителя N , шт	Расстояние между дисками доочистителя h , мм
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
2	30	250	25	10	2,5
1	25	200	20	8	2
0	20	150	15	6	1,5
-1	15	100	10	4	1
-2	5	50	5	2	0,5
ε	5	50	5	2	0,5

Для описания области оптимума математической модели применен центральный композиционный равномер-рототабельный план второго порядка [8, 9]. При этом данные для построения матрицы плана равнялись: ядро плана $2k = 16$; число звездных точек $2k^* = 10$; число нулевых точек — 6; общее число опытов — 32; величина звездного плеча $L = 2,000$. После определения общего числа точек построена рабочая матрица в виде полуреплики от полного факторного эксперимента типа 25.

Адекватность математической модели проверяли по критерию Фишера. Так как $F_{расч} = 0,24 < F_{табл} = 4,95$, то гипотезу об адекватности урав-

нения, описывающее результаты эксперимента можно считать вероятной с 95%- достоверностью. Расчет доверительных интервалов (табл. 3) показал, что кроме коэффициента b_{23} остальные коэффициенты уравнения можно считать значимым с 95%-ной достоверностью.

Уравнение регрессии после исключения незначимых коэффициентов имеет вид:

$$y = 90,802 + 0,2902x_1 - 0,01334x_2 + 0,0375x_3 + 0,0234x_4 + 0,0559x_5 - 0,00632x_1x_2 - 0,00885x_1x_3 - 0,038x_1x_4 - 0,07458x_1x_5 - 0,02402x_2x_3 - 0,0164x_2x_4 - 0,0417x_2x_5 - 0,0139x_3x_4 - 0,0063x_3x_5 - 0,0341x_4x_5 - 0,2504x_1^2 - 0,19226x_2^2 - 0,1708x_3^2 - 0,18973x_4^2 - 0,1885x_5^2. \quad (4)$$

Для использования уравнения (4) в качестве расчетного выражения приведено раскодированные факторов:

$$Y = 79,663 + 0,515\alpha + 0,026\omega + 0,246b + 0,685N + 3,463h - 0,000025a\omega - 0,00035ab - 0,00038aN - 0,298ah - 0,00016N\omega - 0,00017\omega h - 0,0014Nb - 0,0025bh - 0,0341Nh - 0,01002a^2 - 0,000077\omega^2 - 0,0068b^2 - 0,0474N^2 - 0,754h^2. \quad (5)$$

Полученное уравнение (5) позволяет расчетным путем определить коэффициент очистки циклона при использовании значений факторов, находящихся в области эксперимента.

Таблица 3. Результаты расчета доверительных интервалов коэффициентов регрессии

Показатель	N	k	N_0	S_y^2
Значение	32	5	6	0,02
Показатель	$S_{b_0}^2$	$S_{b_i}^2$	$S_{b_{ij}}^2$	$S_{b_{ii}}^2$
Значение	0,003	0,0009	0,0013	0,0007
Показатель	$t_{0.05}$	Δ_{b_0}	Δ_{b_i}	
Значение	2,03	0,0069	0,0017	
Показатель	Δ_{b_j}	$\Delta_{b_{ii}}$		
Значение	0,0026	0,0014		

Анализ полученной математической модели при определении оптимальных значений факторов, выполняли методом двумерных сечений. Для облегчения расчетов анализ проводили с закодированными значениями факторов.

При пяти независимых факторах можно получить 10 двумерных сечений, потому остановимся на наиболее нас интересующих.

Как видно из рис. 1 максимальное значение коэффициента очистки при фиксации других факторов на нулевом уровне $x_3=0; x_4=0; x_5=0$ равен

$\eta = 90,6 - 90,8 \%$ при частоте вращения ротора $\omega = 130 - 170$ рад/с и углом наклона лопастей завихрителя $\alpha = 18 - 22^\circ$.

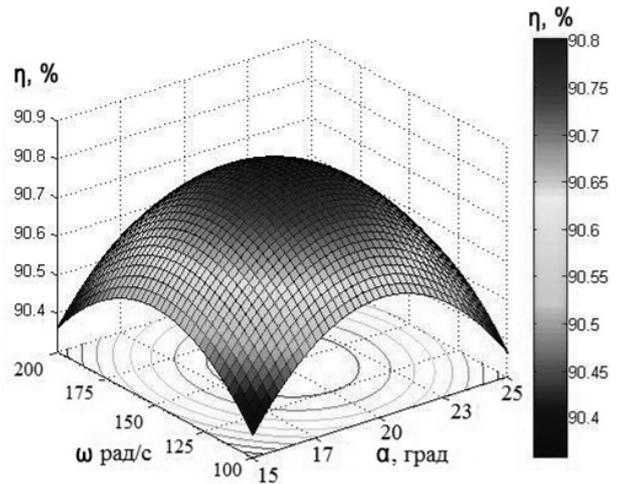


Рис. 1. Поверхность отклика при $x_3 = 0; x_4 = 0; x_5 = 0$

Для получения двумерного сечения поверхности, характеризующей коэффициент очистки разработанного циклона в зависимости от угла наклона лопастей активного ротора (x_1) и частоты оборотов вала (x_2), подставляем значения $x_3 = 0; x_4 = 0; x_5 = 0$ в уравнение (4) получаем:

$$y = 90,802 + 0,02902x_1 + 0,01334x_2 - 0,00632x_1x_2 - 0,2504x_1^2 - 0,19226x_2^2. \quad (6)$$

Определяем координаты центра поверхности дифференцированием (6) и решением системы уравнений:

$$\frac{dy}{dx_1} = 0,29902 - 0,00632x_1 - 0,5008 = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dy}{dx_2} = 0,01334 - 0,00632x_2 - 0,385 = 0.$$

После решения системы определены координаты центра поверхности отклика: $X_{1s} = 0,6728; X_{2s} = 0,7256$. Подставляя их в (6) получили значение коэффициента процесса очистки в центре поверхности — $Y_s = 90,8905 \%$.

Для канонического преобразования (6) решаем характеристическое уравнение:

$$B^2 + 0,37205B + 0,0233 = 0. \quad (8)$$

Аналогично проводим расчеты для факторов: ширины открытия жалюзи (x_3) и расстоянием между дисками доочистителя (x_5). Приравняв нулю $x_1 = 0; x_2 = 0; x_4 = 0$ (рис. 2), согласно расчетам, получаем: $X_{3s} = -0,1071; X_{5s} = -0,1464; Y_s = 90,796 \%; \alpha = 9^\circ 8'$. Подсчет

коэффициентов канонического уравнения показал, что $B_{33} = 0,1708$; $B_{55} = 0,1885$. Уравнение в каноническом виде имеет вид:

$$y - 90,796 = -0,1708 x_3^2 - 0,1885 x_5^2. \quad (9)$$

Как видно из представленного рис. 2 максимальное значение коэффициента очистки при фиксации других факторов на нулевом уровне равен $\eta = 90,72 - 90,796\%$ при ширине открытия жалюзи $b = 13 - 18$ мм и расстоянием между дисками доочистителя $h = 1,3 - 1,7$ мм.

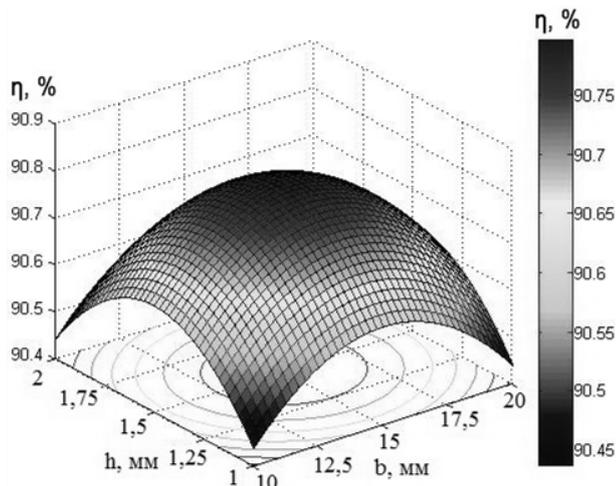


Рис. 2. Поверхность отклика при $x_1 = 0$; $x_2 = 0$; $x_4 = 0$

Аналогично приравниваем факторы нулю $x_1 = 0$; $x_2 = 0$; $x_5 = 0$ и исследуем влияние факторов x_3 и x_4 на $\eta = 90,799\%$ (рис. 3).

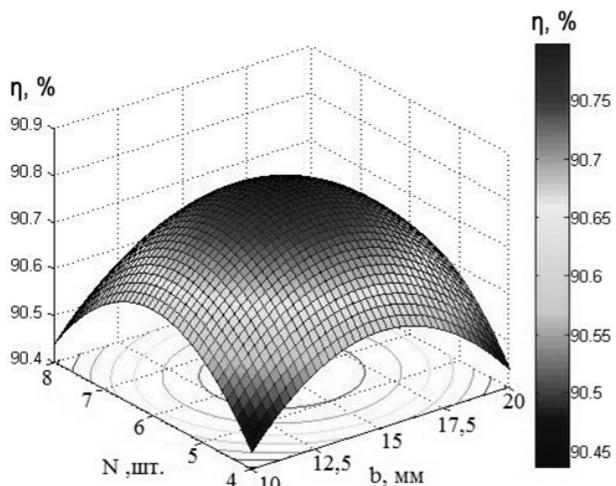


Рис. 3. Поверхность отклика при $x_1 = 0$; $x_2 = 0$; $x_5 = 0$

По аналогичным расчетам получили: $X_{3s} = -0,1074$; $X_{4s} = -0,0577$; $Y_s = 90,799\%$;

$\alpha = -18^\circ 14'$. Подсчет коэффициентов канонического уравнения показал, что $B_{33} = 0,1708$; $B_{44} = 0,18973$. Уравнение в каноническом виде имеет вид:

$$y - 90,799 = -0,1708 x_3^2 - 0,18973 x_4^2. \quad (10)$$

Как видно из рис. 3 максимальное значение коэффициента очистки при фиксации других факторов на нулевом уровне равен $\eta = 90,75 - 90,799\%$ при количестве дисков доочистителя $N = 5 - 7$ шт. и ширине открытия жалюзи $b = 12 - 17$ мм.

Выводы. Таким образом, с помощью пяти факторного эксперимента установлены оптимальные значения технологически-конструктивных параметров разработанного циклона. Значения этих параметров позволит разработать конструктивную документацию на новые устройства и внедрить их в производство.

Литература

- ГОСТ 12.1.005 – 88. Система стандартов безопасности труда. Система стандартов безопасности труда; 1989. – 50с.
- Пат. на кор. мод. України 103446, ЦИКЛОН; В04С 3/00 / Тищенко Л.М., Харченко С.О., Борщ Ю.П., Гаек Є.А.. Заявл. 11.12.2012; Опубл. 10.10.2013, Бюл. №19. – 3 с.
- Тищенко Л.Н. К построению математической модели динамики запылённого воздушного потока в разработанном циклоне / Л.Н. Тищенко С.О. Харченко, Е.А. Гаек // MOTROL. Lublin: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2014. Vol. 16. №7. 42 - 46.
- Харченко С.О. Способ повышения эффективности процесса очистки воздушного потока и разработка циклона аспирационных систем зерноочистительных машин / С.О. Харченко, Е.А. Гаек // Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С.87 - 92.
- Харченко С.А. Обоснование параметров процесса очистки воздушного потока пылеосадочной камерой виброцентробежных зерновых сепараторов: дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / С.А. Харченко. – Харьков: ХНТУСХ им. П. Василенко, 2007. – 230 с.
- Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин – 2-е изд. – Л., 1980. – 168 с.
- Барабашук В.И. Планирование эксперимента в технике. / В.И. Барабашук, Б.П. Кре-

денцер, В.И. Мирошниченко – К.: Техника, 1984. – 200 с.

8. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

9. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

Анотація

Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів розробленого циклона аспіраційних систем зерноочисних машин

Є.А. Гаєк

Виконанням багатофакторного експерименту встановлені оптимальні значення конструктивно-технологічних параметрів розробленого циклону вібровідцентрових зернових сепараторів.

Ключові слова: експеримент, циклон, очищення, повітряний потік.

Abstract

Optimization of structural and technological parameters developed cyclone aspiration systems grain cleaners

E.A. Gaek

The optimal values of structural and technological parameters developed cyclone separators vibrocentrifugal grain by performing multivariate experiment. On the basis of aprior information it was established that the following factors have an influence on cleaning efficiency: grain dockage, qualitative composition, quantity of light impurities, humidity and airflow speed. Factors that have the highest influence on the cleaning efficiency were established on the basis of traditional experiment, thus psychological experiment turned to be expendable.

Keywords: experiment cyclone cleaning air flow.

Представлено: М.М. Кірієнко / Presented by: M.M. Kirienko

Рецензент: М.В. Бакум / Reviewer: M.V. Bakum

Подано до редакції/ Received: 14.04.2015