

## Обоснование рациональной производительности пресс-экструдера в среде Mathcad при получении рассыпного подсолнечного жмыха

*И.Е. Припоров, к.т.н., А.А. Матусевич, соискатель,  
В.А. Массольд, соискатель, ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ*

В настоящее время при производстве кормов используется эффективный метод повышения их качества – способ экструдирования, заключающийся в приготовлении разнообразных кормов для сельскохозяйственных животных, связанный с его переработкой в экструдере путём размягчения или пластификации, и придании им нужной формы при продавливании через экструзионную головку, сечение фильер которой соответствует конфигурации изделия [1–3].

Наиболее распространены в России серийные пресс-экструдеры КМЗ-2 и их модификации, ПЭК-125×8-75, у которых производительность составляет 250–600 кг/ч. Показатели работы экструдеров зависят от вида и состояния обрабатываемого зерна [4]. Они предназначены для переработки зернового сырья и требуют модернизации рабочих органов для качественного выполнения процесса экструзии. Поэтому совершенствование узлов и агрегатов пресс-экструдера, позволяющих повысить его производительность и за счёт этого снизить энергоёмкость экструдирования кормов, является важной научно-технической задачей [5].

Поэтому целью исследования является определение рациональной производительности пресс-экструдера путём экспериментального обоснования рациональных конструктивных параметров шнека с переменным уменьшающимся шагом витков при получении рассыпного подсолнечного жмыха в среде математической программы Mathcad.

Задачи исследования:

- теоретическим путём установить аналитические зависимости, характеризующие технологический процесс работы пресс-экструдера при получении рассыпного подсолнечного жмыха;
- обосновать оптимальные конструктивные параметры шнека переменного шага на основе по-

лученной математической модели и проверить её на адекватность по критериям Фишера, Кохрена.

**Материал и методы исследования.** Рассмотрим конструктивные параметры шнека переменного шага пресс-экструдера при получении подсолнечного жмыха в рассыпном виде.

Для этого определим угол конусности шнека переменного шага пресс-экструдера (рис. 1) в зависимости от его диаметра и длины по выражению, представленному в работе [6]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(d_k - d_n)}{a^N b \cdot (z - 1) + \sum_1^z \Delta b'}$$

где  $d_n$ ,  $d_k$  – начальный и конечный диаметр шнека переменного шага соответственно, м;  
 $a$  – коэффициент пропорциональности,  $a > 1$ ;  
 $b$  – шаг витка шнека переменного шага, м;  
 $N$  – число оборотов шнека переменного шага;  
 $z$  – количество витков шнека переменного шага по длине вала;

$\Delta b$  – ширина витка шнека переменного шага в нормальном сечении, м.

Шаг витка определяется по известному выражению, приведённому в работе [6]:

$$t = at_i$$

где  $t_i$  – шаг  $i$ -х витков, м.

При повороте шнека переменного шага на угол  $\varphi = 360N$  шаг витка будет:

$$t_N = at_{N-1} = a^N b.$$

На следующем этапе с целью определения рациональной производительности пресс-экструдера был проведён многофакторный эксперимент Бокса–Бенкина ( $B_k$ ), процедура которого сводится к следующему [7]. Перед началом эксперимента факторы [5] кодировали, осуществляя линейное преобразование факторного пространства с переносом начала координат в центр эксперимента и введением новых единиц измерения по осям.

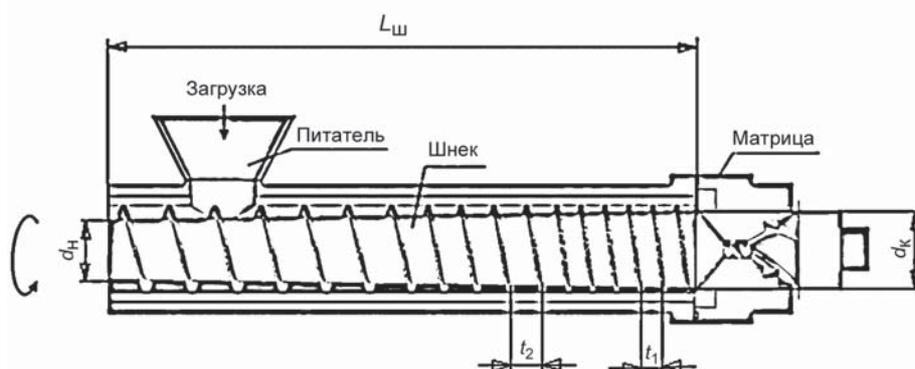


Рис. 1 – Шнек переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 [4]

Кодирование факторов и определение натуральных значений интервала их варьирования производились по известным формулам, представленным в работах.

С учётом ранее проведённых теоретических исследований [6] были выбраны факторы варьирования для определения рациональной производительности пресс-экструдера при получении подсолнечного жмыха в рассыпном виде (табл. 1).

Для проведения планирования эксперимента была разработана программа [8], позволяющая рассчитать коэффициенты регрессии полученной математической модели в кодированном и раскодированном видах (табл. 2).

**Результаты исследования.** На основе проведённой математической обработки экспериментальных данных была получена математическая модель, описывающая производительность пресс-экструдера КМЗ-2с переменным уменьшающимся шагом витков шнека при получении рассыпного подсолнечного жмыха:

– в кодированном виде:

$$Y_S = 1,5 - 0,06x_1 - 0,33x_2 + 0,02x_3 + 0,02x_1x_2 + 0,008x_1x_3 + 0,002x_2x_3 - 0,008x_1^2 + 0,01x_2^2 - 0,004x_3^2; \quad (1)$$

– в раскодированном виде:

$$Q = 0,4 + 0,071\alpha - 0,052t_2 + 0,014t_1 + 0,04\alpha t_2 + 0,032\alpha t_3 + 0,016t_2t_1 - 0,008\alpha^2 + 0,04t_2^2 - 0,058t_3^2; \quad (2)$$

где  $Y_S$ ,  $Q$  – значение производительности пресс-экструдера КМЗ-2с переменным уменьшающимся шагом витков шнека при получении рассыпного подсолнечного жмыха в кодированном и раскодированном видах соответственно, т/ч.

Анализ приведённого уравнения (1) показывает, что наибольшее влияние на производительность пресс-экструдера КМЗ-2 оказывают угол конусности шнека ( $\alpha$ ), шаг витка ( $t_2$ ) шнека 2-й навивки, в том числе парное их взаимодействие.

Для анализа опытных данных воспользуемся проверкой однородности дисперсий с помощью критерия Кохрена по известным формулам, приведённым в работе [7]. Результаты расчёта представлены в таблице 3.

Значение величины критерия Кохрена, найденное по известной формуле, приведённой в работе [7], будет:

$$G_{оп} = \frac{0,139}{1,020} = 0,137.$$

Табличное значение критерия Кохрена при  $f_1 = 2$ ,  $f_2 = 12$  составило  $G_{табл} = 0,3924$ . Вычисленное значение сравнивали с табличным. При условии, если полученное значение критерия Кохрена ( $G_{оп}$ ) меньше табличного ( $G_{табл}$ ), то дисперсии однородны. В данном случае гипотеза об однородности дисперсий подтверждена.

С целью проверки гипотезы об адекватности полученной математической модели (1) второго порядка проведём её статистический анализ.

Адекватность модели второго порядка проверяли с помощью критерия Фишера, используя вспомогательную таблицу 4 [7].

Результаты проверки адекватности полученной математической модели представлены в таблице 4.

При 5-процентном уровне значимости табличное значение критерия Фишера составило 4,303. Так как значение  $F$ -критерия, полученное по расчётам, не превышает табличного значения для выбранного уровня значимости, то данная математическая модель адекватна.

Для нахождения максимума функции отклика приравняем к нулю её частные производные и решаем полученную систему уравнений [7].

Решение системы уравнений даёт следующие координаты точки максимума (кодированные значения):  $x_1 = 3,27$ ;  $x_2 = -1,16$ ;  $x_3 = 0,86$ .

Подставив полученные результаты в уравнение (1), определим максимальное значение производительности пресс-экструдера КМЗ-2 с переменным уменьшающимся шагом витков шнека при получении подсолнечного жмыха в рассыпном виде, которое составляет  $Y_S = 0,55$  т/ч.

### 1. Исходные данные для планирования эксперимента [4]

Фактор	Обозначения		Интервал варьирования	Уровни факторов		
	кодированное	раскодированное		-1	0	+1
Угол конусности шнека	$x_1$	$\alpha$ , град.	1	6	7	8
Шаг витка шнека 2-й навивки	$x_2$	$t_2$ , мм	2	5	7	9
Шаг витка шнека 1-й навивки	$x_3$	$t_1$ , мм	4	8	12	16

### 2. Результаты расчёта коэффициентов регрессии

	Коэффициенты регрессии									
	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_{12}$	$D_{13}$	$D_{23}$	$D_{11}$	$D_{22}$	$D_{33}$
В кодированном виде	1,5	-0,06	-0,33	0,02	0,02	0,008	0,002	-0,0075	0,01	-0,0036
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
В раскодированном виде	0,4	0,071	-0,052	0,014	0,04	0,032	0,016	-0,008	0,04	-0,058

3. Расчёт дисперсий в строках плана по критерию оптимизации

№ опыта	Повторность		Среднее значение функции отклика ( $\bar{Y}_S$ ), т/ч	$\Delta Y_{iS}$ , т/ч	$(\Delta Y_{iS})^2$ , т/ч	$(\Delta \sigma_i)^2$
	$Y_1$ , т/ч	$Y_2$ , т/ч				
1	0,90	0,60	0,70	0,1500	0,0225	0,139
2	0,70	0,30	0,50	0,2000	0,0400	0,067
3	0,40	0,30	0,35	0,0500	0,0025	0,033
4	0,60	0,20	0,40	0,2000	0,0400	0,047
5	0,80	0,30	0,54	0,2500	0,0625	0,081
6	0,60	0,40	0,50	0,1000	0,0100	0,065
7	0,49	0,45	0,47	0,0200	0,0004	0,064
8	0,60	0,30	0,45	0,1500	0,0225	0,053
9	0,40	0,38	0,39	0,0100	0,0001	0,045
10	0,45	0,55	0,50	-0,0500	0,0025	0,084
11	0,60	0,54	0,57	0,0300	0,0009	0,093
12	0,30	0,56	0,43	-0,1300	0,0169	0,082
13	0,55	0,49	0,52	0,0300	0,0009	0,077
14	0,70	0,48	0,59	0,1100	0,0121	0,091
			Сумма			1,020

4. Результаты проверки адекватности математической модели

Показатель	Значение показателя
Дисперсия неадекватности, $S^2_{LF}$	0,036
Дисперсия ошибки опыта, $S^2_y$	0,010
Критерий Фишера: расчётное	3,67
табличное	4,303
$\Delta b_i$	0,128

Для определения коэффициентов  $B_1, B_2, B_3$  воспользуемся формулами, приведёнными в работе [7], и запишем их в среде Mathcad [8], которые выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
 B1 &= b11; \\
 B2 &= b22 \cdot (\cos(\alpha))^2 + b33 \cdot (\sin(\alpha))^2 + \\
 &+ b23 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha); \\
 B3 &= b22 \cdot (\sin(\alpha))^2 + b33 \cdot (\cos(\alpha))^2 - \\
 &- b23 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha).
 \end{aligned}$$

После вычисления коэффициентов по представленным формулам были получены следующие их значения в среде Mathcad:

$$B_1 = -0,008; B_2 = 0,0406; B_3 = -0,0586.$$

Уравнение регрессии (3), приведённое в канонической форме для угла конусности [град] шнека и шага витка [мм] шнека 2-й навивки (рис. 2а), имеет вид:

$$Y - 0,55 = -0,008X_1^2 + 0,04X_2^2. \quad (3)$$

Поскольку все коэффициенты при квадратичных членах имеют разные знаки, то поверхность отклика, описанная уравнением (3), представляет собой параболоид (рис. 2а), а его центр – экстремум (максимум).

На рисунке 2а видно, что максимальное значение показателя производительности  $Q$  в рассматриваемом сечении поверхности отклика, взятых на нулевом уровне, равно 0,55 т/ч и имеет место при угле конусности  $7^\circ$ , шаге витка шнека 2-й навивки 7 мм. На основании этого рисунка можно заключить, что оптимальные значения рассматриваемых факторов находятся в пределах  $\alpha = 6,5 - 7,5^\circ$  и шаге  $t_2 = 6,75 - 7,25$  мм.

Уравнение регрессии (4), приведённое в канонической форме для угла конусности [град] шнека и шага витка [мм] шнека 1-й навивки (рис. 2б), имеет вид:

$$Y - 0,55 = -0,008X_1^2 - 0,059X_2^2. \quad (4)$$

Поскольку все коэффициенты при квадратичных членах имеют одинаковые знаки, то поверхность отклика, описанная уравнением (4), представляет собой эллипсоид (рис. 2б), а его центр – экстремум (максимум).

На представленном рисунке 2б видно, что максимальное значение показателя производительности  $Q$  в рассматриваемом сечении поверхности отклика, взятых на нулевом уровне, равно 0,55 т/ч и имеет место при угле конусности  $7^\circ$ , шаге витка шнека 1-й навивки 12 мм. На основании этого рисунка можно заключить, что оптимальные значения рассматриваемых факторов находятся в пределах  $\alpha = 6,5 - 7,5^\circ$  и шаге  $t_1 = 11 - 13$  мм.

Уравнение регрессии (5), приведённое в канонической форме для шага витка [мм] шнека 2-й навивки и шага витка [мм] шнека 1-й навивки (рис. 2в), имеет вид:

$$Y - 0,55 = 0,041X_2^2 - 0,059X_3^2. \quad (5)$$

Поскольку все коэффициенты при квадратичных членах имеют разные знаки, то поверхность отклика, описанная уравнением (5), представляет

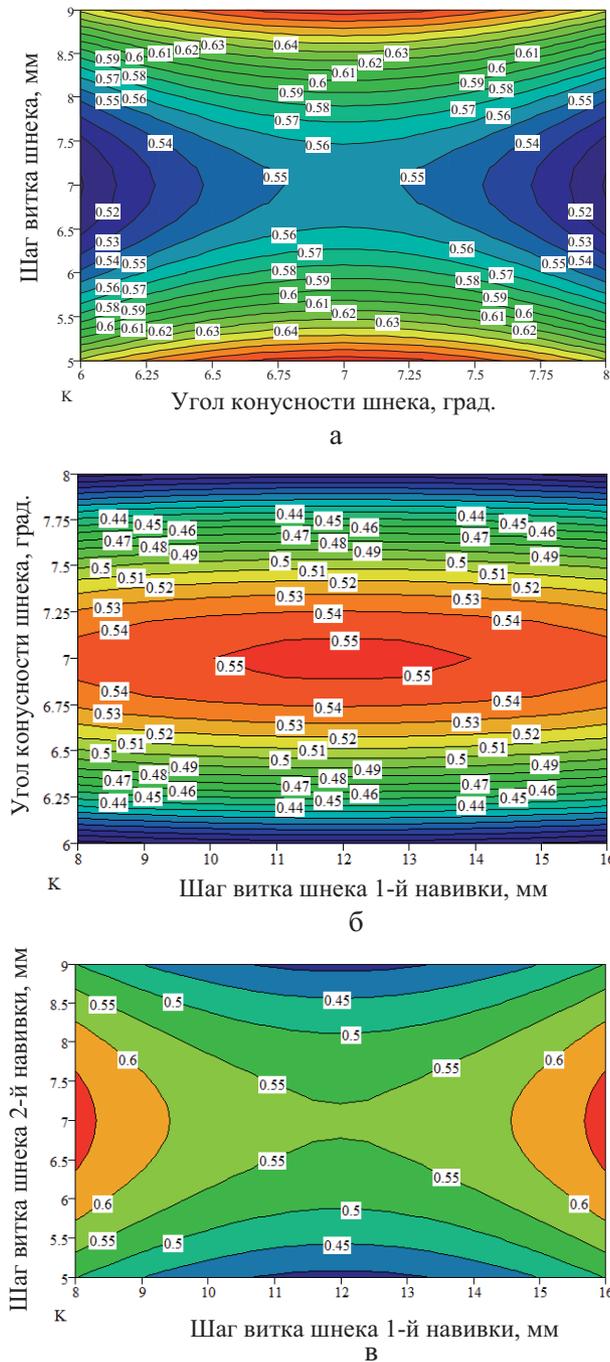


Рис. 2 – Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующей производительность пресс-экструдера от:  
 а – угла конусности и шаг витка шнека 2-й навивки; б – угла конусности и шага витка шнека 1-й навивки; в – шага витка шнека 2-й и 1-й навивок соответственно

собой параболоид (рис. 2в), а его центр – экстремум (максимум).

На рисунке 2в видно, что максимальное значение показателя производительности  $Q$  в рассматриваемом сечении поверхности отклика, взятых на нулевом уровне, равно 0,55 т/ч и имеет место при шаге витка шнека 2-й навивки  $7^\circ$ , шаге витка шнека 1-й навивки 12 мм. На основании этого рисунка можно заключить, что оптимальные значения рассматриваемых факторов находятся в пределах  $t_2 = 6,5-7,5^\circ$  и шаге  $t_1 = 11-13$  мм.

**Выводы.** В результате исследования теоретически установлена зависимость, характеризующая технологический процесс одношнекового пресс-экструдера от конструктивных параметров шнека переменного шага, являющийся составной частью технологической линии по приготовлению высокобелкового корма на основе отходов семян подсолнечника (подсолнечный жмых в рассыпном виде). В результате планирования многофакторного эксперимента в среде математической программы Mathcad была определена производительность пресс-экструдера КМЗ-2 с переменным уменьшающимся шагом при получении рассыпного подсолнечного жмыха, которая составила 0,55 т/ч.

**Литература**

1. Припоров Е.В. Пути снижения эксплуатационных затрат на работу агрегата // Научные механизмы решения проблем инновационного развития: сб. статей Междунар. науч.-практич. конф. 2016. С. 79–82.
2. Припоров Е.В., Юдт В.Ю. Анализ дисковых орудий с четырёхрядным расположением сферических дисков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 118. С. 1413–1427.
3. Фролов В. Ю. Теоретические и экспериментальные аспекты разработки технологий и технических средств, приготовления концентрированных кормов на основе соевого белка. Краснодар, 2010. 140 с.
4. Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Новиков В.В., Денисов С.В. Методологические аспекты теоретических исследований пресс-экструдеров для обработки растительного крахмалсодержащего сырья / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, В.В. Новиков [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013. № 6(10). С. 46–54.
5. Орси́к О. Л. О влиянии конусности направителя на продвижение смеси в пресс-экструдере // Нива Поволжья. 2014. № 3 (32). С. 73–78.
6. Припоров И.Е., Бачу Т.Н. Оптимизация конструктивных параметров шнека переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 на основе планирования эксперимента // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 84–87.
7. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.
8. Свидетельство 2004612245. Российская Федерация. Каноническое преобразование Вк-2 / Цыбулевский В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный аграрный университет». №2004611690; заявл. 05.08.2004; зарегистр. 04.10.2004.