

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭКСТРУДИРОВАНИЯ РАПСОВОГО ЖМЫХА

Т.А. Байбатыров,

доцент Западно-Казахстанского аграрно-технического университета им. Жангир хана,  
канд. техн. наук, доцент

С.А. Дрозд,

зам. декана по воспитательной работе агроинженерского факультета БГАТУ, канд. техн. наук

*В статье рассматривается обоснование параметров экструдирования рапсового жмыха, таких как температура и влажность продукта, с целью повышения эффективности нейтрализации вредных компонентов, в частности глюкозинолатов, в жмыхе рапса. Это позволяет использовать обработанный рапсовый жмых в кормлении животных, что способствует увеличению биологической ценности кормов. Предложенный подход направлен на улучшение качества и питательной ценности кормовых продуктов, обеспечивает оптимальные условия для производства комбикормов.*

*Ключевые слова: экструдирование, рапсовый жмых, параметры, нейтрализация, глюкозинолаты, комбикорм, биологическая ценность.*

*The article deals with the substantiation of rapeseed cake extrusion parameters, such as temperature and humidity of the product, in order to increase the efficiency of neutralization of harmful components, in particular glucosinolates, in rapeseed cake. This allows to use the treated rapeseed cake in animal feeding, which contributes to increasing the biological value of feed. The proposed approach is aimed at improving the quality and nutritive value of fodder products, provides optimal conditions for the production of compound feeds.*

*Key words: extrusion, rapeseed cake, parameters, neutralization, glucosinolates, compound feed, biological value.*

### Введение

Устойчивым фактором развития животноводства Республики Беларусь является применение отечественных высокоэнергетических комбикормов, питательную ценность которых необходимо повышать для обеспечения роста производства продукции животноводства [1].

Одним из направлений повышения питательной ценности кормов является добавление рапсового жмыха. Получаемый при переработке семян рапса жмых позволяет сбалансировать рационы животных за счет содержания в нем значительного количества белка (30...40 %) и минеральных элементов, таких как кальций, фосфор, калий, магний и железо, а также витаминов Е, В1, В2, РР, β-каротина и А – природных антиоксидантов, защищающих клетки от повреждения кислородными радикалами [2].

Однако помимо питательных веществ рапсовый жмых содержит большое количество токсичных элементов – глюкозинолатов, которые вызывают воспаление слизистых оболочек внутренних органов, увеличение щитовидной железы, отрицательно влияют на рост и развитие молодняка [3].

Для уменьшения количества глюкозинолатов и плохо усвояемых веществ в рапсовом жмыхе используются различные методы обработки. Наиболее эффективными методами, оказывающими положительное влияние на биохимические показатели компонентов комбикормов, является экструдирование [3].

Экструзионная обработка нейтрализует содержание вредных веществ в рапсовом жмыхе, повышает усвояемость корма и его вкусовые свойства [4-8].

Процесс экструдирования описан в работах В.И. Передни, А.Н. Острикова, А.Б. Лисицына, М.В. Карве, Л.Г. Винниковой, С.И. Козлова, А.И. Пунько и других.

Цель данной работы – повышение эффективности нейтрализации вредных компонентов (глюкозинолатов) в жмыхе рапса путем обоснования оптимальных параметров процесса экструдирования рапсового жмыха.

### Основная часть

Для обоснования оптимальных параметров экструдирования рапсового жмыха с целью повышения эффективности нейтрализации вредных компонентов (глюкозинолатов) использовался статистический метод планирования экспериментов [9].

Оценку эффективности экструдирования рапсового жмыха осуществляли посредством функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ , в качестве которых приняты следующие выходные (результатирующие) показатели процесса:

$Y_1$  – количество глюкозинолата, ммоль/кг;

$Y_2$  – удельный расход электроэнергии экструдера, кВт·ч/т.

В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на эффективность экструдирования рапсового жмыха, выбраны следующие регулируемые параметры [5-6]:

$T$  – температура экструдирования, °С;

$W$  – влажность рапсового жмыха, %.

Экспериментальное исследование экструдирования рапсового жмыха проводилось на экструдере марки КМЗ-2. Исследуемый диапазон экструдирования рапсового жмыха составил 110-150 °С, с шагом варьирования 10 °С, влажность рапсового жмыха исследовалась в диапазоне 14...20 %, с шагом варьирования 2 %. Всего было проведено 20 опытов с четырехкратной повторностью. Значения исследуемых параметров и среднее арифметическое значение количества глюкозинолата и удельного расхода электроэнергии представлены в таблице 1.

На основе полученных экспериментальных данных (табл. 1) и с использованием компьютерной программы Statistica рассчитаны уравнения полной квадратичной регрессии для исследуемых показателей  $Y_1$  и  $Y_2$ , а также основные статистические критерии оценки качества математического описания процесса экструдирования рапсового жмыха (табл. 2).

Для проверки значимости компонентов регрессии рассчитаны t-критерии Стьюдента и р-уровни значимости. Как следует из таблицы 2, на показатели эффективности экструдирования рапсового жмыха существенное влияние оказывают все компоненты регрессии на уровне 0,05. Исключение составляет  $T^2$ , так как его влияние на уровень глюкозинолатов  $Y_1$  оказалось незначимым.

На основании полученных коэффициентов регрессии (табл. 2) запишем уравнения квадратичной регрессии двух независимых переменных – температуры экструдирования  $T$  (°С) и влажности продукта  $W$  (%) в следующем виде:

– для уровня глюкозинолатов, ммоль/кг

$$Y_1 = 170,96 - 0,6194 T - 11,663 W + 0,013 TW + 0,0012 T^2 + 0,2612 W^2; \quad (1)$$

– для удельного расхода электроэнергии экструдера, кВт·ч/т

$$Y_2 = 1250,9 - 2,84 T - 116,675 W + 0,0775 TW + 0,00875 T^2 + 2,95 W^2. \quad (2)$$

Для оценки адекватности полученных уравнений регрессии (1)-(2) математического описания процесса экструдирования рапсового жмыха рассчитана таблица 3 дисперсионного анализа.

Из таблицы 3 следует, что величина  $F$  значима на

**Таблица 1. Экспериментальные данные экструдирования рапсового жмыха**

Опыт	Параметры		Функций отклика		Опыт	Параметры		Функций отклика	
	$T$	$W$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$		$T$	$W$	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$
1	110	14	24,6	107	11	130	18	15,7	62
2	110	16	20,1	66	12	130	20	15,8	76
3	110	18	17,8	53	13	140	14	20,9	120
4	110	20	17,0	64	14	140	16	17,5	86
5	120	14	23,7	113	15	140	18	14,1	77
6	120	16	19,3	75	16	140	20	14,2	85
7	120	18	16,5	60	17	150	14	19,7	128
8	120	20	15,4	69	18	150	16	16,6	94
9	130	14	21,3	118	19	150	18	12,6	91
10	130	16	17,8	82	20	150	20	16,3	102

**Таблица 2. Результаты регрессионного анализа показателей эффективности экструдирования рапсового жмыха**

Обозначение	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t-критерий Стьюдента	р-уровень значимости	95%-е доверительные границы	
					нижняя	верхняя
Уровень глюкозинолатов $Y_1$ , ммоль/кг						
	170,95914	25,52329	6,69816	0,00001	116,21713	225,70116
$T$	-0,61943	0,29680	-2,08706	0,05565	-1,25599	0,01713
$W$	-11,66350	1,70474	-6,84182	0,00001	-15,31979	-8,00721
$TW$	0,01300	0,00570	2,27947	0,03883	0,00077	0,02523
$T^2$	0,00118	0,00108	1,09352	0,29263	-0,00113	0,00349
$W^2$	0,26125	0,04509	5,79438	0,00005	0,16455	0,35795
Удельный расход электроэнергии экструдера $Y_2$ , кВт·ч/т						
	1250,875	87,476044	14,29963	9,57E-10	1063,258	1438,492
$T$	-2,84	1,0172071	-2,79196	0,014407	-5,02169	-0,65831
$W$	-116,675	5,8426438	-19,9696	1,1E-11	-129,206	-104,144
$TW$	0,0775	0,0195462	3,964967	0,00141	0,035578	0,119422
$T^2$	0,00875	0,0036939	2,368781	0,032768	0,000827	0,016673
$W^2$	2,95	0,1545262	19,09061	2,02E-11	2,618574	3,281426

**Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа уравнений регрессии, характеризующих процесс экструдирования рапсового жмыха**

Источник изменчивости	Число степеней свободы <i>df</i>	Сумма квадратов $S^2$	Средний квадрат <i>MS</i>	Отношение средних квадратов <i>F</i>	Значимость <i>F</i> ( <i>p</i> -уровень)
Уровень глюкозинолатов $Y_1$ , ммоль/кг					
Регрессия ( <i>R</i> )	5	178,8825	35,77649	54,99819	1,04E-08
Остаток ( <i>E</i> )	14	9,107043	0,650503	-	-
Полная сумма ( <i>T</i> )	19	187,9895	-	-	-
Удельный расход электроэнергии экструдера $Y_2$ , кВт·ч/т					
Регрессия ( <i>R</i> )	5	9181,825	1836,365	240,3282	4,71·10 <sup>-13</sup>
Остаток ( <i>E</i> )	14	106,975	7,641071	-	-
Полная сумма ( <i>T</i> )	19	9288,8	-	-	-

уровне  $p < 0,05$ . Это свидетельствует о том, что экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с полученными уравнениями регрессии.

Качество полученного по экспериментальным данным уравнения регрессии проверялось коэффициентом множественной корреляции *R*, детерминации  $R^2$  и критерием Дарбина-Ватсона *d* (табл. 4).

Приведенные в таблице 4 значения коэффициента множественной корреляции *R* и коэффициента детерминации  $R^2$  имеют близкие к единице значения. Анализ зависимости количества глюкозинолатов (рис. 1) и удельных энергозатрат процесса экструдирования (рис. 2) от температуры экструдирования и влажности рапсового жмыха показывает, что оптимальное значение влажности рапсового жмыха находится в диапазоне 18,5-20,0 %, в зависимости от температуры экструзии – 150-110 °С соответственно. Это обеспечивает количество глюкозинолатов в диапазоне 14,76-17,13 ммоль/г. При этом удельные энергозатраты минимальны и составляют 87-53 кВт·ч/т (рис. 2).

При исследовании температуры экструдирования оптимум не очевиден, так как при увеличении температуры экструдирования с 110 °С до 150 °С наблюдается снижение содержания глюкозинолатов с 17-25 до 15-20 ммоль/г, с одновременным ростом удельных энергозатрат с 53-108 до 87-129 кВт·ч/т в зависимости от влажности рапсового жмыха, что свидетельствует об очень тесной взаимосвязи показателей  $Y_1$  и  $Y_2$  и включенных в уравнение параметров *T* и *W*. Значения критерия Дарбина-Ватсона *d* показывают отсутствие серийной корреляции в регрессионных остатках. Все это свидетельствует о 95 %-й достоверности полученных уравнений регрессии и их адекватности процессу экструдирования рапсового жмыха [9-10].

На основании полученных уравнений регрессии (1) и (2) построены графические зависимости, харак-

теризующие зависимость количества глюкозинолата (рис. 1) и удельный расход электроэнергии экструдера (рис. 2) от температуры экструдирования и влажности рапсового жмыха.

Для определения оптимальных значений уровня глюкозинолатов  $Y_1$  и удельного расхода электроэнергии экструдера  $Y_2$  полученные уравнения регрессии (1) и (2) были использованы в качестве целевых функций. Составлена следующая модель оптимизации основных параметров процесса экструдирования рапсового жмыха [9]:

найти минимум содержания глюкозинолатов  $Y_1$  и удельного расхода электроэнергии экструдера  $Y_2$

$$\begin{cases} Y_1 = f(T, W) \Rightarrow \min; \\ Y_2 = f(T, W) \Rightarrow \min \end{cases} \quad (3)$$

при следующих двусторонних ограничениях:  
на температуру экструдирования  $T$  (°С)

$$110 \leq T \leq 150; \quad (4)$$

и влажность сырья  $W$  (%)

$$14 \leq W \leq 20. \quad (5)$$

Оптимизационная задача (3) – (5) относится к классу задач нелинейного математического программирования. Для ее решения использован модуль «Поиск решения» офисной программы Excel [9]. Результаты компромиссного решения поставленной задачи приведены в таблице 5.

При экструдировании кормов на экструдере КМЗ-2 с учетом полученных рациональных значений (температура экструдирования – 125 °С, влажность рапсового жмыха – 18,5 %) экструдировали рапсовый жмых. Результаты представлены в таблице 6.

Проведенные исследования показали, что при обработке рапса в экструдере содержание белка не изме-

**Таблица 4. Критерии оценки качества уравнения регрессии, полученного для параметров процесса экструдирования рапсового жмыха**

Статистический показатель оценки качества регрессии	Значение для отклика	
	$Y_1$	$Y_2$
Множественная корреляция <i>R</i>	0,975	0,994
Коэффициент детерминации $R^2$	0,952	0,988
Нормированный (скорректированный на <i>df</i> ) $R^2$	0,934	0,984
Стандартная ошибка	0,807	0,276
Критерий Дарбина-Ватсона <i>d</i>	2,349	1,609

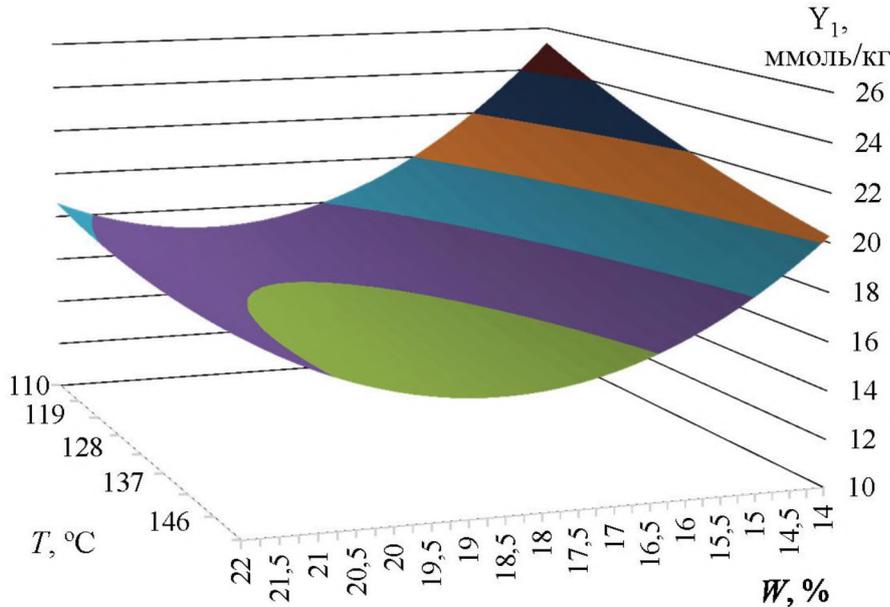


Рисунок 1. Графическая зависимость количества глюкозинолата  $Y_1$  от температуры экструдирования  $T$  (°C) и влажности рапсового жмыха  $W$  (%)

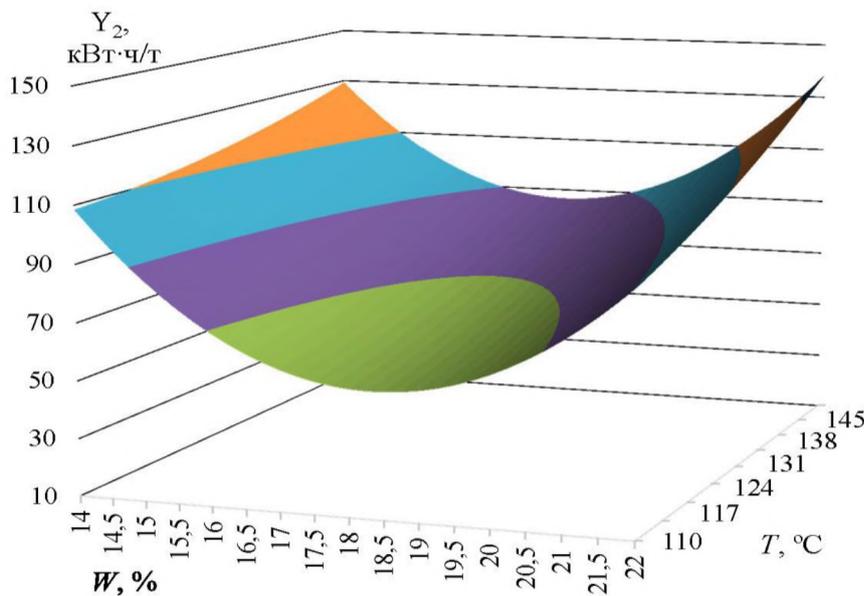


Рисунок 2. Графическая зависимость удельных энергозатрат процесса экструдирования  $Y_2$  от температуры экструдирования  $T$  (°C) и влажности рапсового жмыха  $W$  (%)

нилось, а содержание жира снизилось на 7,8 %, клетчатки – на 25,28 %. Содержание вредных веществ (глюкозинолата) уменьшилось на 35 % (с 24,6 до 16,0 мкмоль/г), а эруковой кислоты – в 1,88 раза.

**Заключение**

Получены регрессионные модели, позволяющие установить зависимости количества глюкозинолатов и удельных энергозатрат процесса экструдирования от температуры экструдирования и влажности рапсового жмыха, а также получить рациональные значения температуры экструдирования (125 °C) и влажности рапсового жмыха (18,5 %) путем многокритериальной оптимизации.

Экструдирование рапсового жмыха на экструдере КМЗ-2 при рациональных параметрах приводит к улучшению качественных характеристик продукта. Обработка рапсового жмыха в экструдере снижает содержание вредных веществ: глюкозинолатов – на 35 % (с 24,6 до 16,0 мкмоль/г), эруковой кислоты – в 1,88 раза (с 1,02 % до 0,54 %), что позволяет использовать его в комбикормовом производстве. При этом содержание белка сохраняется, а количество жира и клетчатки снижается. Удельные энергозатраты процесса экструдирования рапсового жмыха составили 63 кВт·ч/т.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности процесса экструдирования при использовании рапсового жмыха в производстве комбикормов.

**Таблица 5. Рациональные параметры экструдирования рапсового жмыха**

Параметр экструдирования	Функция отклика		
	$W$ – влажность рапсового жмыха, %	$Y_1$ – уровень глюкозинолатов, мкмоль/г	$Y_2$ – удельные энергозатраты, кВт·ч/т
$T$ – температура, °C			
120,00	18,50	16,10	59,3
125,00	18,50	15,65	63,0
130,00	18,50	15,25	67,1

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Дрозд, С.А. Снижение удельных энергозатрат двухстадийным измельчением зернофуража при производстве комбикормов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.А. Дрозд. – Минск, 2023. – 25 с.

**Таблица 6. Результаты экструдирования рапсового жмыха**

Показатели	Рапсовый жмых	
	неэкструдированный	экструдированный
Белок, %	38,99	38,73
Жир, %	10,80	9,96
Клетчатка, %	19,74	14,75
Зола, %	4,7	6,27
Содержание глюкозинолатов, мкмоль/г	24,6	16,0
Эруковая кислота, %	1,02	0,54

2. Комплект оборудования для производства кормовых добавок на основе рапсового жмыха и эффективность его использования на практике / А.И. Пунько [и др.] // Вестник ВНИИМЖ. – Подольск, 2015. – № 4 (20). – С. 34-38.

3. Байбатыров, Т.А. Разработка технологии комбикормов повышенной питательной ценности с использованием рапса и его побочных продуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Т.А. Байбатыров. – Алматы, 2010. – 22 с.

4. Эффективность использования жмыхов льна, подсолнечника, рыжика, рапса и сурепицы при откорме бычков / Е.М. Поверинова [и др.] // Масличные культуры: науч.-техн. бюллетень ВНИИМК. – 2006. – № 2 (135). – С. 156-158.

5. Технология экструзионных продуктов: учеб. пос. / А.Н. Остриков [и др.]. – СПб.: Проспект Науки, 2007. – 202 с.

6. Василенко, В.Н. Техника и технологии экструдированных комбикормов: монография / В.Н. Василенко, А.Н. Остриков. – Воронеж: ВГТА, 2011. – 454 с.

7. Кадыров, Д. Экструзионная переработка биологических отходов в корма (Переработка вторичного сырья пищевой промышленности) / Д. Кадыров, А. Гарзанов, В. Плитман // Птицеводство. – 2008. – № 7.

– С. 51-54.

8 Технологический регламент на производство экструдированного зерна: регламент / Н.В. Цугленок [и др.] // Методические указания. – Красноярск: ФГБОУ ВПО Красноярский государ. аграр. ун-т., 2014. – 38 с.

9. Сухарев, А.Г. Курс методов оптимизации: учеб. пос. / А.Г. Сухарев, А.В. Тимохов, В.В. Федоров. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 368 с.

10. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования: учеб.-методич. комплекс / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 31.07.2024

**Автоматизированная микропроцессорная система очистки воздуха от микрофлоры на предприятиях АПК**

*Предназначена* для очистки и обеззараживания воздуха от микрофлоры в помещениях, к которым предъявляются повышенные требования по предельному уровню содержания бактерий, вирусов плесени, грибов и других вредных микроорганизмов.



**Основные технические данные**

тип облучателя	закрытый (рециркуляционный)
производительность установки, м <sup>3</sup> /ч	900
подаваемое напряжение, V	220 ± 22
частота питания, Гц	50 ± 2
источник ультрафиолетового излучения (УФИ)	разрядная лампа высокого давления ДРТ-400
облучённость в эффективном спектральном диапазоне 220-400 нм, Вт/м <sup>2</sup>	45 ± 15
ресурс работы УФИ (не более), ч	2500
срок службы (не менее), лет	5
управление установкой	дистанционное (пульт ДУ)
снижение обсемененности воздуха на выходе из установки	95 %

Применение установки позволяет эффективно в автоматическом режиме по заданной программе очищать воздух в производственных помещениях предприятий, к которым предъявляются повышенные требования к чистоте воздуха.