

В.Н. Василенко, проф., д-р техн. наук;  
Л.Н. Фролова, проф., д-р техн. наук;  
И.В. Драган, доц., канд. техн. наук;  
И.Ю. Кочкин, асп.; И.Д. Еремин, студ;  
Ю.А. Пальчикова, студ.  
(ФГБОУ ВО ВГУИТ, г. Воронеж)

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КОМБИКОРМОВ**

Одним из новейших приемов подготовки к скармливанию животным и птице зерна бобовых, злаковых культур и кукурузы, а также переработки биологических отходов является метод экструзии. К новейшим приемам подготовки бобовых культур, зерна злаковых культур и кукурузы, а также переработки биологических отходов относится метод экструдирования. Он совмещает воздействие тепла с резким перепадом давления в момент выброса продукта из экструдера. Умеренный уровень температуры (150 °С) в конце процесса в течение 3–4 сек. (продолжительность всей операции – 30–60 сек.) приводит к равномерной денатурации нативного белка, не нарушая первичные соединения аминокислот и тем самым сохраняя питательную ценность протеина. Активность ферментов снижается до приемлемой нормы, обеспечивающей максимальную кормовую эффективность.

Для исследования влияния удельных энергозатрат на процесс экструзии были применены математические методы планирования эксперимента. Математическое описание данного процесса может быть получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов.

В качестве основных факторов, влияющих на процесс экструзии, были выбраны:  $x_1$  - начальная влажность продукта, %;  $x_2$  - частота вращения шнека,  $c^{-1}$ ;  $x_3$  - конструктивный параметр (отношение внутреннего диаметра шнека к наружному);  $x_4$  - живое сечение матрицы (отношение диаметра канала корпуса к диаметру выходного сечения матрицы);  $x_5$  - давление в предматричной, зоне, МПа.

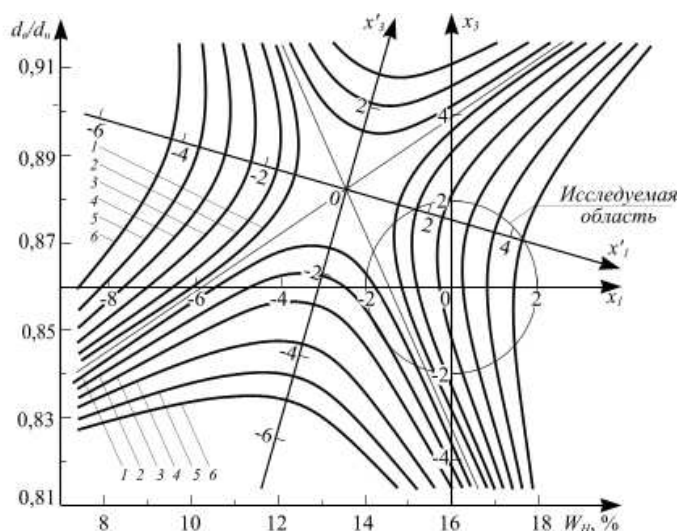
Все эти факторы совместимы и некоррелируемы между собой. Выбор интервалов изменения факторов обусловлен технологическими условиями процесса экструзии, техническими характеристиками экструзионной установки.

Программа исследований была заложена в матрицу планирования эксперимента. Для исследования было применено центральное композиционное ротатабельное униформпланирование и был выбран полный факторный эксперимент  $2^{5-1}$  с дробной репликой  $x_5 = x_1 x_2 x_3 x_4$ . Порядок опытов рандомизировали посредством таблицы случайных чисел, что исключало влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента.

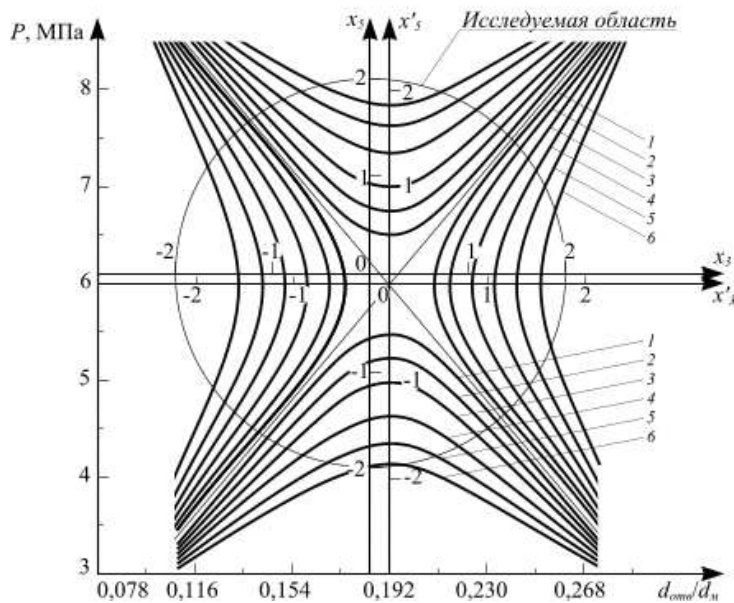
При обработке результатов эксперимента были применены следующие статистические критерии: проверка однородности дисперсий – критерий Кохрена, значимость коэффициентов уравнений регрессии – критерий Стьюдента, адекватность уравнений – критерий Фишера. В результате статистической обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, адекватно описывающее данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

$$y_1 = 0,033 - 0,011x_1 + 0,002x_2 + 0,004x_3 + 0,001x_4 + 0,006x_5 - 0,001x_1x_2 - 0,001x_1x_3 + 0,001x_1x_4 - 0,002x_1x_5 + 0,001x_2x_3 + 0,001x_2x_4 + 0,001x_1^2 + 0,013x_4^2 - 0,002x_5^2, \text{ кДж/кг};$$

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы экструдера, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров продукта составляли минимум удельных энергозатрат. На рисунках 1–2 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые несут смысл номограмм и представляют практический интерес. Для определения оптимального режима использовали метод "ридж-анализ", который базируется на методе неопределенных множителей Лагранжа.



**Рисунок 1 – Кривые равных значений удельных энергозатрат ( $y_1$ ) от начальной влажности продукта  $W$  (%) и конструктивного параметра  $d_v/d_n$ , кДж/кг: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03; 4 – 0,04; 5 – 0,05; 6 – 0,06;  $P = 6,0$  МПа;  $n = 0,8 \text{ с}^{-1}$   $d_{отв}/d_m = 0,192$**



**Рисунок 2 – Кривые равных значений удельных энергозатрат ( $y_1$ ) от живого сечения матрицы  $\dot{v}w/dm$  и давления в предматричной зоне  $P$  (МПа), кДж/кг: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03; 4 – 0,04; 5 – 0,05; 6 – 0,06;  $W_n = 16\%$ ;  $n = 0,8$  с-1,  $d_w/d_n = 0,86$**

В данном случае допустимые значения  $\lambda$  лежали в пределах:  $0,002 < \lambda < 0,008$ . Задаваясь значениями  $x$  из данного интервала был вычислен оптимальный режим процесса экструзии для удельных энергозатрат.

Как уже отмечалось выше, при выборе оптимальных значений удельных энергозатрат необходимо исходить из их минимально допустимых значений при ограничениях на независимые переменные. Для такого режима  $\lambda = 0,003$ , т.е.  $x_1 = 3,814$ ;  $x_2 = -0,688$ ;  $x_3 = -0,979$ ;  $x_4 = -0,008$ ;  $x_5 = -0,591$ , или, переходя от кодированных значений  $x_i$  к натуральным, имеем начальную влажность продукта  $x_1 = 23,6\%$ ; частоту вращения шнека  $x_2 = 0,868$  с<sup>-1</sup>; конструктивный параметр  $x_3 = 0,85$ ; коэффициент живого сечения матрицы  $x_4 = 0,192$ ; давление в предматричной зоне  $x_5 = 5,41$  МПа.

В этом случае удельные энергозатраты имеют значения  $y_1 = 0,023$  кДж/кг.

В интервале изменения  $\lambda \in [0,002; 0,008]$  значения параметров  $x_i$  лежали в следующих интервалах:  $x_1 = 18,0...27,4\%$ ;  $x_2 = 0,71...0,78$  с<sup>-1</sup>;  $x_3 = 0,86...0,87$ ;  $x_4 = 0,191...0,193$ ;  $x_5 = 5,73...6,31$  МПа. При таких значениях параметров удельные энергозатраты лежали в диапазоне  $y_1 = 0,12...0,23$  кДж/кг. Отмеченные интервалы изменения независимых переменных для параметра оптимизации  $y_1$  следует принять за оптимальные.

Для проверки правильности полученных результатов был поставлен ряд параллельных экспериментов, полученные результаты попали в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям качества. При этом среднеквадратичная ошибка не превышала 3,2 %. Таким образом, в ходе решения задачи с векторным критерием оптимизации было установлено, что удельные энергозатраты являются определяющим параметром процесса, также была получена область оптимальных значений выходных параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эксергетический анализ технологических линий по производству функциональных продуктов / Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Татаренков Е.А., Пономарев А.В. // Вестник Воронежской государственной технологической академии. 2010. № 1 (43). С.19–24.

2. Патент на изобретение RU 2328171 С1 Линия производства полнорационных экструдированных комбикормов / Остриков А.Н., Василенко В.Н., 10.07.2008. Заявка № 2006145128/13 от 18.12.2006.

3. Техника и технологии экструдированных комбикормов / Василенко В.Н., Остриков А.Н. - Воронеж, 2011, с. 454

4. Создание энергоэффективного оборудования для переработки масличного сырья / Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Михайлова Н.А., Русина К.Ю., Таркаева Д.А.//Вестник машиностроения. 2017. № 1. С.87–88.

5. Математическое обеспечение процесса экструдирования аномально-вязких сред методами планирования эксперимента /Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Дерканосова А.А., Михайлова Н.А., Щепкина А.А., Давыдов А.М. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 3 (77). С. 37–42.

6. Оборудование для производства высокоэффективных комбикормов нового поколения / Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Михайлова Н.А., Драган И.В., Таркаева Д.А. // Вестник машиностроения. 2020. № 6. С.86–87