

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИИ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Методами многокритериальной (векторной) оптимизации рассмотрена проблема оптимизации биотехнологического процесса на примере переработки полуфабрикатов растительного происхождения.

**Ключевые слова:** векторная оптимизация, синтез технологии, экструдирование, биотехнологии.

Отличительной особенностью технологий получения продуктов является использование для оценки их качества неформализуемых параметров. Решение задачи синтеза технологии требует установления критериальных зависимостей между технологическими параметрами качества и обрабатывающего воздействия на полуфабрикат [1]. Частная задача синтеза технологии экструдирования данного полуфабриката может быть решена методом векторной оптимизации [2]. Зависимости параметров качества от управляющих воздействий для этого случая могут быть получены вероятностными методами.

Рассмотрим решение задачи синтеза технологии на примере производства вспученных экструдатов методом теплой экструзии [3, 4].

Исходным сырьем принята крошка из некондиционного пшеничного хлеба 1-го сорта. Для оптимизации процесса экструдирования использовали полные факторные эксперименты ПФЭ 2<sup>4</sup>.

Факторами, наиболее влияющими на процесс экструзии, приняты:

- влажность исходного сырья  $W$ ;
- частота вращения шнека  $\omega$ ;
- отношение длины шнека к диаметру  $\lambda_{ш}$ ;
- высота щелевого формующего отверстия  $h_{ф}$

Параметрами эффекта приняты [2, 5]: производительность пресса  $Q$  (кг/ч), удельный расход энергии на проведение процесса  $N/Q$  (Дж/кг), степень вспучивания полуфабрикатов при фритировании в растительном масле  $C_e$ , удельная прочность вспученных крекеров  $\Pi_y$  (г/мм<sup>2</sup>), безразмерный комплексный показатель качества  $K$ , который рассчитывается по эмпирическим формулам, полученным на основе экспертной оценки вкусовых свойств готового продукта:

$$K = 0 \text{ при } C_e < 1,3 \text{ или } \Pi_y > 12$$

$$K = \frac{C_e}{0,03} - \frac{\Pi_y}{0,15} + 124 \text{ при } 1,30 \leq C_e \leq 2,47, \\ 12,00 \geq \Pi_y \geq 3,15;$$

$$K = 121 - \Pi_y \text{ при } C_e > 2,47, 12,00 \geq \Pi_y \geq 3,15;$$

$$K = \frac{C_e}{0,03} + 17 \text{ при } 1,30 \leq C_e \leq 2,47, \Pi_y < 3,15;$$

$$K = 100 \text{ при } C_e > 2,47, \Pi_y < 3,15.$$

При экструдировании использовали однозаходный шнек с внешним диаметром 50 мм, внутренним 34 мм и шагом 50 мм. Матрица имела два прямоугольных отверстия переменной высоты шириной 15 мм, длиной 5 мм.

Уровни и интервалы варьирования факторов, представленные в таблице 1, выбраны в ходе предварительных экспериментов.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс экструзии:

$$Q = 12,23 + 4,52\omega + 6,00h_{ф} + 5,29\lambda_{ш} + 0,58W\omega + 2,10h_{ф}\omega + \\ + 2,01\lambda_{ш}\omega + 1,58\lambda_{ш}h_{ф} + 0,43W\omega\lambda_{ш} + 0,49\omega\lambda_{ш}h_{ф}; \quad (1)$$

$$N/Q = 275,8 - 32,1W + 19,0\omega - 189,5h_{ф} + 28,7\lambda_{ш} - 12,3W\omega - \\ - 29,2Wh_{ф} + 19,2\omega h_{ф} - 8,9\omega\lambda_{ш} + 20,6\lambda_{ш}h_{ф} - 19,5\omega\lambda_{ш}h_{ф}; \quad (2)$$

$$C_e = 1,49 + 0,04W - 0,05\omega - 0,04h_{ф} + 0,05W\omega + \\ + 0,03W\lambda_{ш} - 0,05\omega\lambda_{ш} - 0,04W\omega h_{ф} + 0,04\omega\lambda_{ш}h_{ф}; \quad (3)$$

$$\Pi_y = 11,8 - 1,1W + 0,5\omega + 2,3h_{ф} + 1,4\lambda_{ш} - W\omega - \\ - 0,8Wh_{ф} + 0,6\omega h_{ф} + 0,6W\omega h_{ф} - \omega\lambda_{ш}h_{ф}. \quad (4)$$

Факторы  $W, \omega, h_{ф}, \lambda_{ш}$  представлены в уравнениях (1) ... (4) в условных единицах в масштабах, соответствующих уровням варьирования от  $-1$  до  $+1$ .

Отыскание оптимальных значений приводили векторной оптимизацией, по методу рабочих характеристик.

Выберем комплексный показатель качества  $K$  первым основным параметром эффекта, который откладывается по оси ординат рабочей характеристики. Это обусловлено тем, что  $K$  определен из параметров эффекта более низкого уровня  $C_6$  и  $\Pi_y$ . По оси абсцисс отложим второй основной параметр эффекта производительность  $Q$ .

Уравнение (1) позволяет выразить  $\omega$  через  $Q$ :

$$\omega = \frac{Q - 12,23 - 6,00h_\phi - 5,29\lambda_{ш} - 1,58\lambda_{ш}h_\phi}{4,52 + 0,58W + 2,10h_\phi + \lambda_{ш}(2,01 + 0,43W + 0,49h_\phi)} \quad (5)$$

Исключив при помощи уравнения (5) величину  $\omega$  из уравнений (2), (3) и (4), получим зависимости, позволяющие строить рабочие характеристики [6].

Зависимости (2) ... (5) позволяют получать в системе координат  $KOQ$  диаграммы, характеризующие постоянными значениями всех интересующих нас факторов и параметров эффекта.

Вначале формируется опорный объект, включающий средние значения оптимизируемых факторов в таблице 1. Затем строятся рабочие характеристики влияния каждого фактора, и каждый последующий фактор оптимизируется при оптимальных значениях предыдущих факторов. Линии постоянных значений исследуемого фактора строим, фиксируя внешние величины. Линии постоянных значений параметров эффекта и частоты вращения строим для данного значения параметра, задаваясь величиной производительности и вычисляя величину исследуемого на рабочей характеристике фактора. Зная текущую величину фактора, вычисляем значение координаты  $K$  при известной координате  $Q$ .

Графики постоянных значений исследуемых факторов изображены на рабочих характери-

ках (рисунки 1, 2 и 3) в системе координат  $KOQ$  линиями вдвое толще основной. Графики постоянных значений частоты вращения шнека показаны коротким пунктиром, постоянных значений степени вспучивания при фритировании  $C_6$  – штрихпунктирными линиями, графики постоянных значений удельной прочности вспученных крекеров  $\Pi_y$  – сплошными линиями, постоянных значений энергоемкости процесса  $N/Q$  – длинным пунктиром. Оптимальная область выделена заливкой. Для удобства все значения факторов в

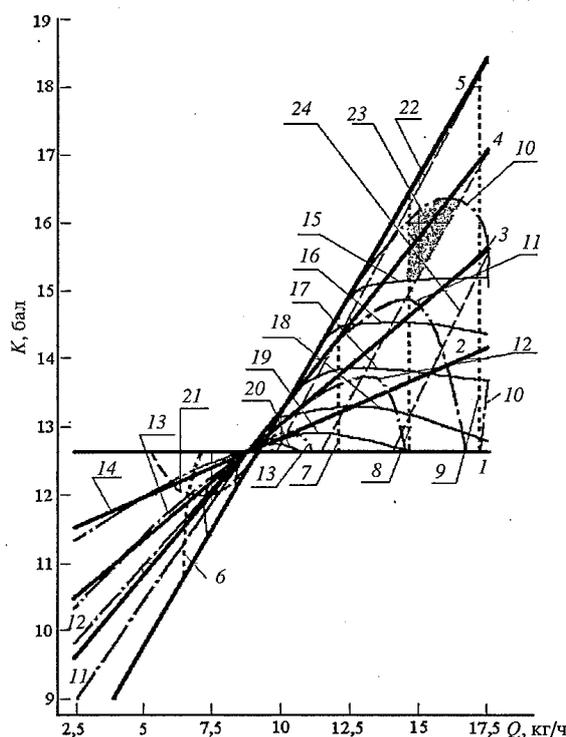


Рисунок 1. Зависимость комплексного показателя качества полуфабрикатов крекеров  $K$  от влажности экструдата  $W$ ;  $W$ , %: 1 – 32,8; 2 – 33,1; 3 – 33,4; 4 – 33,7; 5 – 34,0;  $\omega$ , мин<sup>-1</sup>: 6 – 75; 7 – 150; 8 – 187; 9 – 225;  $C_6$ : 10 – 1,445; 11 – 1,450; 12 – 1,460; 13 – 1,470; 14 – 1,480;  $\Pi_y$ , г/мм<sup>2</sup>: 15 – 10,4; 16 – 10,7; 17 – 10,8; 18 – 10,9; 19 – 11,0; 20 – 11,2; 21 – 11,4;  $N/Q$ , Дж/кг: 22 – 240; 23 – 250; 24 – 255; 25 – 260; 26 – 275

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Параметр	Уровень фактора			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
Влажность $W$ , %	28	31	34	3
Частота вращения шнека $\omega$ , мин <sup>-1</sup>	75	150	225	75
Отношение длины шнека к наружному диаметру $\lambda_{ш}$	4	7	10	3
Высота формирующего отверстия $h_\phi$ , мм	0,3	0,7	1,1	0,4

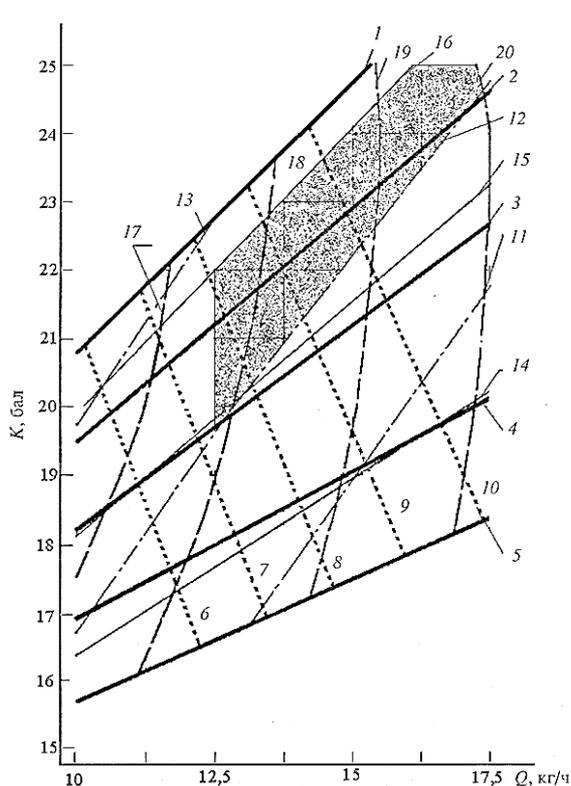


Рисунок 2. Зависимость комплексного показателя качества полуфабрикатов крекеров  $K$  от отношения длины шнека к диаметру  $\lambda_{ш}$ : 1 – 5,8; 2 – 6,1; 3 – 6,4; 4 – 6,7; 5 – 7,0;  $\omega$ , мин<sup>-1</sup>: 6 – 150; 7 – 169; 8 – 187; 9 – 206; 10 – 225;  $C_0$ : 11 – 1,52; 12 – 1,525; 13 – 1,530;  $P_y$ , г/мм<sup>2</sup>: 14 – 6; 15 – 8; 16 – 10;  $N/Q$ , Дж/кг: 17 – 240; 18 – 250; 19 – 260; 20 – 275 Дж/кг

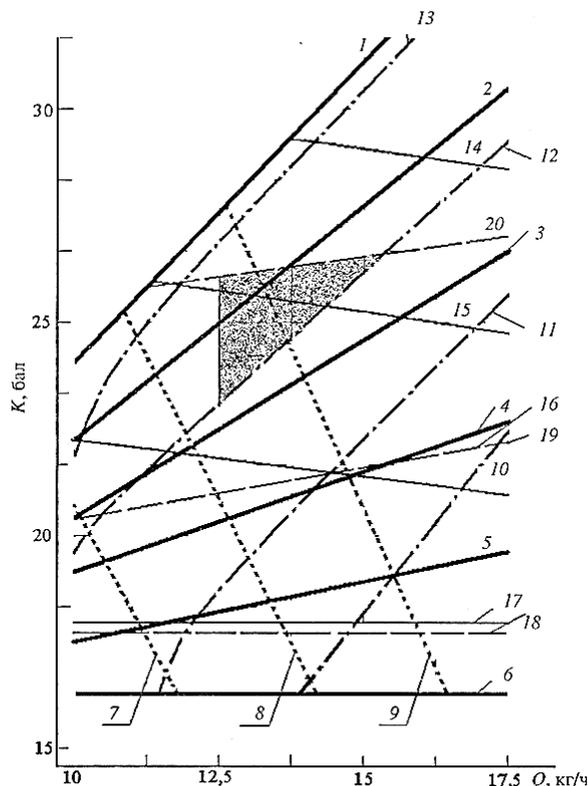


Рисунок 3. Зависимость комплексного показателя качества полуфабрикатов крекеров  $K$  от высоты щелевой фильеры  $h_{\phi}$ :  $h_{\phi}$ , мм: 1 – 0,58; 2 – 0,62; 3 – 0,66; 4 – 0,70; 5 – 0,74; 6 – 0,78;  $\omega$  со, мин<sup>-1</sup>: 7 – 150; 8 – 187; 9 – 225;  $C_0$ : 10 – 1,50; 11 – 1,51; 12 – 1,525; 13 – 1,53;  $P_y$ , г/мм<sup>2</sup>: 14 – 9,0; 15 – 9,5; 16 – 10,0; 17 – 10,5;  $N/Q$ , Дж/кг: 18 – 225; 19 – 250; 20 – 275

тексте в дальнейшем приведены в абсолютных единицах. Для оптимизации технологического процесса введены ограничения параметров эффекта процесса:  $K > 15$ ;  $C_0 > 1,525$ ;  $P_y < 10$  г/мм<sup>2</sup>;  $N/Q < 215$  Дж/кг;  $Q > 12,5$  кг/ч.

На рисунке 1 представлена рабочая характеристика влияния влажности экструдированного материала  $W$ . При этом остальные исследуемые параметры имеют средние значения:  $\lambda_{ш} = 7$ ,  $h_{\phi} = 0,7$  мм. Оптимальная область отсутствует. Для дальнейшей оптимизации технологического процесса принимаем влажность  $W = 34\%$ , поскольку она обеспечивает наибольшее значение первого основного параметра эффекта  $K$ .

На рисунке 2 приведена рабочая характеристика влияния отношения длины шнека к его внешнему диаметру  $\lambda_{ш}$ ,  $W = 34\%$ ,  $h_{\phi} = 0,7$  мм. Оптимальная область ограничена диаграммами

$Q = 12,5$  кг/ч;  $P_y = 10$  г/мм<sup>2</sup>;  $N/Q = 275$  Дж/кг;  $C_0 = 1,525$ . Оптимальной принята относительная длина шнека  $\lambda_{ш} = 6,1$ .

На рисунке 3 изображена характеристика влияния высоты формующего отверстия фильеры матрицы,  $W = 34\%$ ,  $\lambda_{ш} = 6,1$ . Оптимальная область ограничена диаграммами:  $Q = 12,5$  кг/ч;  $N/Q = 275$  Дж/кг;  $C_0 = 1,525$ . Оптимальной принимаем высоту канала фильеры  $h_{\phi} = 0,62$  мм, частота вращения шнека составляет  $\omega = 225$  мин<sup>-1</sup>.

Таким образом, оптимальны параметры переработки некондиционного пшеничного хлеба:  $W = 34\%$ ;  $\lambda_{ш} = 6,1$ ;  $h_{\phi} = 0,62$  мм;  $\omega = 225$  мин<sup>-1</sup>.

Приведенный пример показывает возможность использования векторной оптимизации при проектировании технологий регрессионными моделями для определения параметров эффекта.

14.09.2012

**Список литературы:**

1. Панфилов, В.А. Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока). – М.: Колос, 1993. – 288 с.
2. Полищук В.Ю., Коротков В.Г., Зубкова Т.М. Проектирование экструдеров для отраслей АПК. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 201 с.
3. Зинюхин, Г.Б. Разработка технологии производства хлебно-крупяных крекеров с применением одношнековых экструдеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУПП, 1996. – 24 с.
4. Попов, В.П. Разработка технологии производства сухих полуфабрикатов крекеров с использованием варочных экструдеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУПП, 1995. – 24 с.
5. Богатырев А.Н., Юрьев В.П. Термопластическая экструзия: научные основы, технология, оборудование. – М.: Ступень, 1994. – 158 с.
6. Руднев В.Е., Володин В.В., Лучанский К.М., Петров В.Б. Формирование технических объектов на основе системного анализа. – М.: Машиностроение, 1991. – 318 с.

Сведения об авторах:

**Коротков Владислав Георгиевич**, декан факультета прикладной биотехнологии и инженерии  
Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: fpp@mail.osu.ru

**Попов Валерий Павлович**, заведующий кафедрой пищевой биотехнологии  
Оренбургского государственного университета,  
кандидат технических наук, доцент, e-mail: ppbt@mail.osu.ru

**Василевская Светлана Петровна**, доцент кафедры машин и аппаратов химических  
и пищевых производств Оренбургского государственного университета,  
кандидат технических наук, e-mail: mahpp@mail.osu.ru  
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13

**UDC 674.08:662.818**

**Korotkov V.G., Popov V.P., Vasilevskaya S.P.**

Orenburg state university

**APPLICATION OF THE VECTOR OPTIMIZATION FOR SYNTHESIS AN EXTRUSION TECHNOLOGY OF THE BIOTECHNOLOGY FACILITIES**

Multi-criteria methods (vector) optimization of the problem of the optimization of biotechnological process based on the processing of the semi products of plant raw material.

Key words: the vector of optimization, synthesis technology, extrusion, biotechnology.

**Bibliography:**

1. Panfilov, V.A. Technological lines of edible productions (the production line theory). – М.: Kolos, 1993. – 288 p.
2. Polishchuk V.Yu., Korotkov V.G., Zubkova T.M. Designing of extruders for agrarian and industrial complex branches. – Ekaterinburg: UrO the Russian Academy of Sciences, 2003. – 201 p.
3. Zinyukhin, G.B. Design of the production technology bread-kрупjanyh crackers with application of single-screw extruders: Autoref. dis. ... cand. tech. sci. – М.: MSYFI, 1996. – 24 p.
4. Popov, V.P. Razrabotka's Priests of the production technology of dry half-finished products of crackers with use of the cooking extruders: Autoref. dis. .... cand. tech. sci. – М.: MSYFI, 1995. – 24 p.
5. Bogatyrev A.N., Jurev V.P. Thermosoftening extrusion: scientific bases, technology, the equipment. – М.: Stupen, 1994. – 158 p.
6. Rudnev V.E., Volodin V.V., Luchanskij K.M., Petrov V.B. Formirovanie of technical objects on the basis of systems analysis. – М.: Mashinostroenie, 1991. – 318 p.