

УДК 664:519.237

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЯКОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Бескровний О.І., к.т.н.,

Донецький національний технічний університет

Тел.(066) 040-04-35

Анотація – у роботі запропоновано та продемонстровано застосування вдосконаленого експериментально-статистичного методу для моделювання і оптимізації технологічних процесів харчової технології.

Ключові слова – підвищення якості, експериментально-статистичний підхід, планування експерименту, вершкове масло, високий тиск.

Постановка проблеми. Деякі аспекти опису внутрішньої структури дисперсних систем харчових середовищ досить повно розвинені: у фізиці, в дослідженнях з питань динаміки неупорядкованих середовищ на мікроскопічному рівні та на рівні кореляційного опису колективного руху атомів і молекул в рідких середовищах; у фізичній та колоїдній хімії, у зв'язку з дослідженням динаміки утворення і руйнування гетерогенних структур, міжфазових обмінів речовин та стійкої рівноваги – на рівні феноменологічної кінетики та статистичної рівноважної і нерівноважної термодинаміки; в біохімії, у зв'язку з дослідженням поведінки білкових макромолекул – як на мікроскопічному, так і макроскопічному рівнях. Ці найбільш загальні результати вказаних досліджень можна перенести на опис дисперсійних харчових середовищ, які, на відміну від газоподібних, рідких, а також колоїдних систем, є складними комплексами, що включають те й інше. У той же час слід враховувати, що знання фізичного (біохімічного) характеру на мікрорівні найчастіше виявляються надлишковими і навіть малоприматними для опису макроскопічних властивостей харчових середовищ.

Тому найчастіше в прикладних дослідженнях використовуються методи багатофакторного статистичного моделювання та багатокритеріальної компромісної оптимізації. Така методологія моделювання складних систем і процесів неминуче включає евристичні рекомендації і приймаються рішення, які важко формалізувати [1].

Аналіз останніх досліджень. Незважаючи на те, що регресійні прогнози і оптимізаційні моделі відомі давно, їх вдосконалення, модернізація та методологія застосування безперервно розвиваються [1]. Однак розв'язання прикладних задач «регресійного аналізу та інтерпретація його результатів вимагають глибоких знань і вміння правильно оцінювати одержувану інформацію» [1]. Глибокі причини «парадоксальних» і явно «корельованих» тверджень відомих зарубіжних фахівців полягають у тому, що множинний регресійний аналіз – це наука, але вона стає ще й мистецтвом, коли її застосовують не в абстрактних умовах математики, а в системній практиці реальної дійсності [1].

Статистична методологія регресійного аналізу повинна забезпечувати стійкість, тобто визначеність одержуваних багатофакторних статистичних моделей. Необхідно використовувати стійкі багатофакторні плани експериментів [2], вибір «істинних» структур моделей [2], стійке оцінювання коефіцієнтів моделей в умовах вихідної мультиколінеарності факторів [2].

Методологія моделювання складних систем і процесів неминує включати евристичні рекомендації і приймаються рішення, які важко формалізувати. Такі рішення використовуються в аналізі даних, теорії планування експерименту, прикладній статистиці.

Отримання вихідних експериментальних даних пов'язане з фізичними проявами властивостей експериментальної установки, інструментів, вимірювальних приладів, участі обслуговуючого персоналу, умов проведення експериментів. Крім врахованих керованих факторів на результати впливають некеровані і неконтрольовані фактори. Інформація про них у експериментатора зазвичай відсутня. Тому розглядати обробку експериментальних даних як систему тільки формалізованих математичних дій не представляється можливим. Тому у створенні оптимальних прикладних систем, крім формальних математичних та обчислювальних методів, велику роль відіграють різноманітні евристичні міркування, що ґрунтуються на досвіді і глибокому розумінні змісту предмета інженерами-технологами.

Метою статті є підвищення якості регресійних оптимізаційних моделей на основі планування експерименту і розроблення нового вдосконаленого методу дослідження харчових технологій на прикладі вивчення впливу параметрів обробки високим тиском вершкового масла.

Основна частина. Знаходження оптимальних значень параметрів процесу обробки вершкового масла високим тиском проводили в декілька етапів.

Перший етап – побудова математичних моделей, які адекватно описують залежність вихідних параметрів від факторів, що вивчаються. Для цього було реалізовано активний експеримент за системою центрального композиційного уніформ-ротатбельного плану (ЦКРП).

Спочатку було реалізовано активний експеримент – повний факторний експеримент типу 3^2 (ПФЕ). Як основні фактори було обрано: P_{\max} – високий тиск (МПа), n – кількість циклів підняття і скидання тиску. У якості вихідних параметрів (відгуків) вибрано основні показники: y_1 – кислотне число; y_2 – йодне число; y_3 – число омилювання; y_4 – число Поленське; y_5 – число Рейхеля-Мейссля; y_6 – зусилля різання. Крім того, було реалізовано три режими змінення швидкостей навантаження: I – $v \uparrow -1, v \downarrow -5$ (МПа/с); II – $v \uparrow -5, v \downarrow -10$ (МПа/с); III – $v \uparrow -10, v \downarrow -25$ (МПа/с).

Рівні й інтервали варіювання факторів (x_1, x_2 – кодовані значення) було обрано спираючись на результати попередніх досліджень. Кодування факторів проводили за стандартними співвідношеннями. Експерименти проводили відповідно до таблиці 1 та при цьому застосували рандомізацію експерименту із використанням таблиць випадкових чисел, щоб виключити вплив систематичних похибок, зумовлених зовнішніми умовами. Кожен експеримент виконували у подвійній повторюваності, а однорідність результатів оцінювали за критерієм Кохрена.

Таблиця 1 – Результати експерименту для режиму $v \uparrow - 1, v \downarrow - 5$

$P_{\max},$ МПа	x_1	n	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
350	1	5	1	0.5	0.016	23	228.5	2.42	33.1
350	1	1	-1	1.0	0.021	28	237	2.95	37.8
230	-1	5	1	0.8	0.020	26	232	2.65	35.2
230	-1	1	-1	1.1	0.024	30	238	3.08	38.3
290	0	3	0	0.57	0.018	28	232	2.63	35.8
290	0	5	1	0.55	0.017	25.5	230	2.48	35.0
350	1	3	0	0.70	0.016	23	230	2.50	33.6
290	0	1	-1	1.0	0.023	28.5	238	3.04	37.8
230	-1	3	0	0.9	0.023	28.5	236.5	2.87	37.0

Обробку результатів проводили за типовою методикою.

Паралельні експерименти в центрі плану дозволили визначити, що рівняння регресії першого порядку, отримане за результатами ПФЕ, не може надати задовільного математичного опису модельних систем і необхідно перейти до планування другого порядку, щоб

урахувати оцінки квадратичних ефектів факторів і побудувати адекватну математичну модель (ЦКРП з урахуванням даних у «зіркових» точках).

Статистична обробка експериментальних даних містила обчислення оцінок регресійних коефіцієнтів, перевірку їх значущості, оцінку відтворюваності експериментів та встановлення адекватності отриманого регресійного рівняння. При цьому використовували статистичні критерії Кохрена, Стьюдента і Фішера (за довірчої ймовірності 95%).

Рівняння регресії, які адекватно описують залежність відгуків y_i від факторів, якими управляють, мають вигляд:

$$\begin{aligned} y_1 &= 0,64 - 0,1x_1 - 0,21x_2 - 0,05x_1x_2 + 0,13x_1^2 + 0,10x_2^2, \\ y_2 &= 0,19 - 0,002x_1 - 0,003x_2 - 0,003x_1x_2 + 0,001x_1^2 + 0,001x_2^2, \\ y_3 &= 27,11 - 1,75x_1 - 2x_2 - 0,25x_1x_2 - 0,92x_1^2 + 0,33x_2^2, \\ y_4 &= 232,61 - 1,83x_1 - 3,75x_2 - 0,625x_1x_2 + 0,33x_1^2 + 1,08x_2^2, \\ y_5 &= 2,65 - 0,12x_1 - 0,25x_2 - 0,025x_1x_2 + 0,03x_1^2 + 0,10x_2^2, \\ y_6 &= 35,71 - 1,00x_1 - 1,77x_2 - 0,4x_1x_2 - 0,37x_1^2 + 0,73x_2^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Графічну інтерпретацію залежностей для перших двох критеріїв у вигляді поверхонь відгуку та ліній рівня подано на рисунках 1-2.

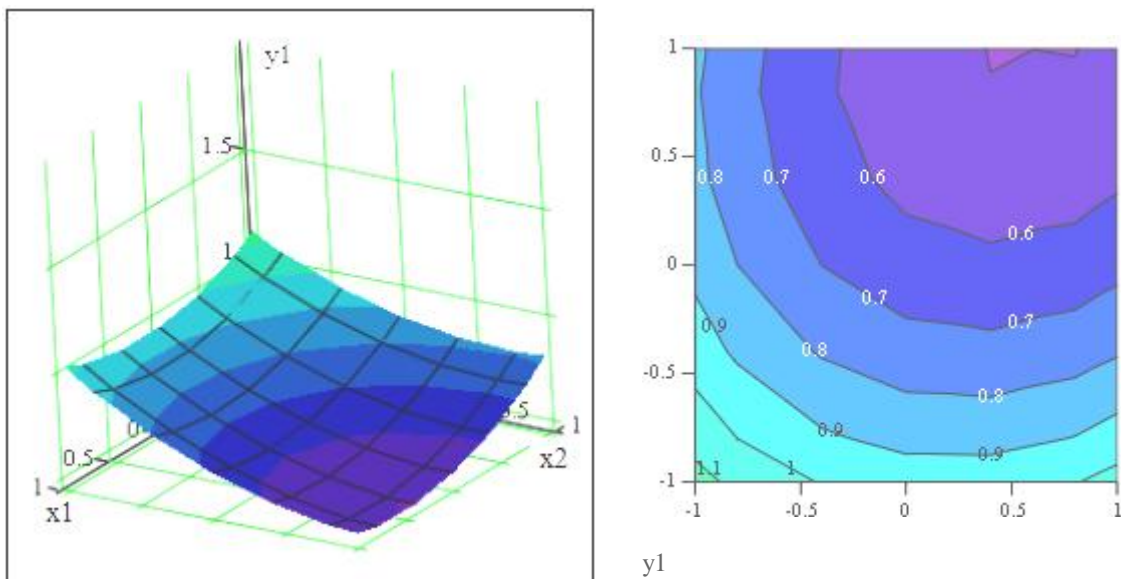


Рис.1. Поверхня відгуку та лінії рівня для кислотного числа.

Аналіз графіків поверхонь відгуку та ліній рівня показав, що мінімальні значення досліджуваних показників перебувають в області

факторних значень експерименту. Це дозволило для знаходження екстремумів використати методи класичного аналізу.

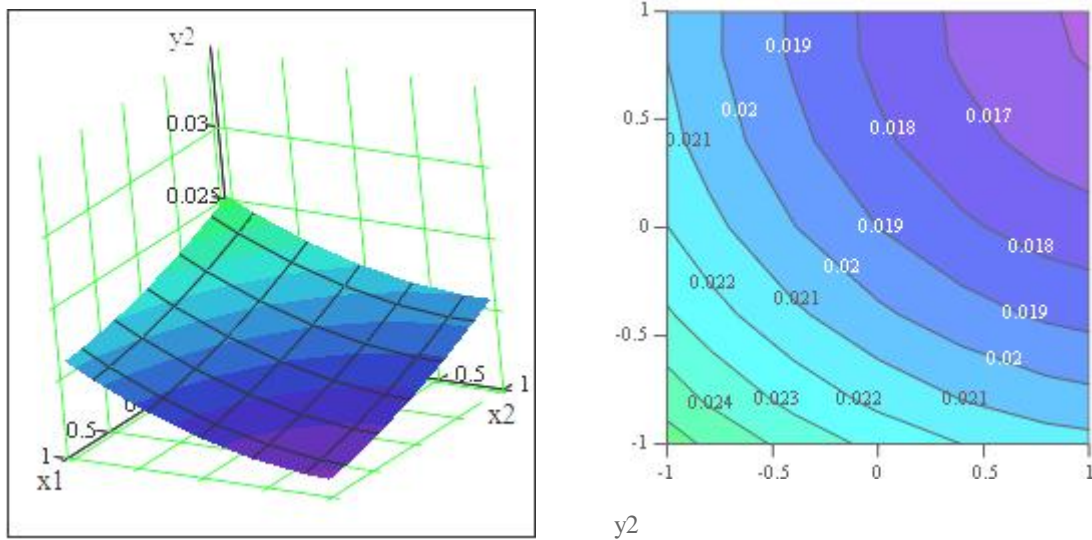


Рис. 2. Поверхня відгуку та лінії рівня для йодного числа.

Далі визначили ступінь оптимізації за отриманими функціями відгуку. Для цього використовували показник якості параметрів оптимізації ε_y і показник крутизни поверхонь відгуку ξ_y .

$$\varepsilon_y = \left| \frac{\bar{y}}{y_{opt} - \bar{y}} \right|; \quad \xi_y = \left| \frac{y_{opt} - y_{nopt}}{y_{opt}} \right|, \quad (2)$$

де \bar{y} – середнє арифметичне значення досліджених параметрів;

y_{opt} – оптимальне значення параметра; y_{nopt} – неоптимальне значення параметра в області дослідження зміни факторів.

Таблиця 2 – Показники параметрів оптимізації

Режим	Параметр оптимізації	Показник				
		y_{opt}	y_{nopt}	\bar{y}	ξ_y	ε_y
$v \uparrow - 1,$ $v \downarrow - 5$	y_1	0,51	1,125556	0,019778	1,21179	0,040436
	y_2	0,015306	0,024972	0,019778	0,631579	4,42236
	y_3	22,52778	30,02778	26,72222	0,332922	6,370861
	y_4	227,8194	238,9861	233,5556	0,049015	40,71671
	y_5	2,379444	3,129444	2,735556	0,3152	7,681747
	y_6	32,91111	38,44444	35,95556	0,16813	11,81022

Виходячи з наведених вище даних, для параметра оптимізації вибрано параметр y_1 при фіксованих значеннях y_2 і y_3 . Відповідно складено функцію цілі і систему рівнянь Лагранжа:

$$\begin{aligned}
 F &= 0,64 - 0,1x_1 - 0,21x_2 - 0,05x_1x_2 + 0,13x_1^2 + 0,10x_2^2 + \\
 &+ \lambda_1(0,019 - 0,002x_1 - 0,003x_2 - 0,0003x_1x_2 + 0,001x_1^2 + 0,001x_2^2 - x_2) + \\
 &\quad + \lambda_2(27,11 - 1,75x_1 - 2x_2 - 0,25x_1x_2 - 0,92x_1^2 + \\
 &\quad + 0,33x_2^2 - x_3) + \lambda_3(x_1^2 + x_2^2 - R^2) + \lambda_3(x_1^2 + x_2^2 - R^2) \\
 \frac{\partial F}{\partial x_1} &= -0,1 - 0,05x_2 + 0,25x_1 + \lambda_1(-0,002 - 0,0003x_2 + 0,001x_1) \\
 &\quad + \lambda_2(-1,75 - 0,25x_2 - 1,83x_1) + 2\lambda_3x_1
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial x_2} &= -0,21x_2 - 0,05x_1 + 0,20x_2 + \lambda_1(-0,003 - 0,0003x_1 + 0,002x_2) + \\
 &\quad + \lambda_2(-2,00 - 0,25x_1 + 0,67) + 2\lambda_3x_2
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_1} = 0,019 - 0,002x_1 - 0,003x_2 - 0,0003x_1x_2 + 0,0007x_1^2 + 0,001x_2^2 - x_2$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_2} = 27,11 - 1,75x_1 - 2,00x_2 - 0,25x_1x_2 - 0,92x_1^2 + 0,33x_2^2 - x_3$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_3} = x_1^2 + x_2^2 - R.$$

Оптимізація здійснювалась у покроковому режимі для значень $0 \leq R \leq 1.0$, в інтегрованому пакеті MAPLE 13.

Таблиця 3 – Відносні відхилення значень параметрів оптимізації у двох режимах зміни тиску (МПа/с) при $n=3$, $P_{\max} = 320$ МПа

Параметр оптимізації	Показник			
	$y_{\text{ідо}}$	y_{δ}	Δy	$\xi_y, \%$
y_1	0,43	0,78	0,35	81,2
y_2	0,014	0,016	0,002	14,3
y_3	21,50	24,27	2,77	12,9
y_1	0,40	0,57	0,17	42,5
y_2	0,013	0,015	0,002	15,4
y_3	20,59	21,97	1,38	6,7

Отримані оптимальні (мінімальні в нашому випадку) значення функцій відгуку можуть досягатися при $n = 4 \div 5$ і $P_{\max} = 340 \div 350$, що

не є раціональним з технологічної точки зору. Тому у таблиці 3 наведено результати аналізу значень показників процесу при значеннях керованих факторів, які є близькими до оптимальних для більш раціональних режимів.

У зв'язку з цим було прийняте рішення звузити діапазони зміни факторів планування експерименту та значень швидкості підняття та зниження тиску за умови знаходження значення параметрів оптимізації в отриманих діапазонах.

У результаті аналізу значень факторів та параметрів у проведених додаткових експериментах приходимо до таких оптимальних режимів обробки вершкового масла високим циклічним тиском (наведено натуральні величини факторів):

Таблиця 4 – Оптимальні режими обробки вершкового масла високим циклічним тиском

Параметр	Позначення	Значення
Величина максимального тиску, МПа	P_{\max}	320–340
Кількість циклів навантаження	n	2–3
Швидкість підйому тиску, МПа/с	$v \uparrow$	7–10
Швидкість скидання тиску, МПа/с	$v \downarrow$	15–25
Кислотне число	y_1	0,51–0,57
Йодне число	y_2	0,014–0,016

Експериментальні значення параметрів оптимізації не виходять за межі відповідних довірчих інтервалів, отриманих розрахунковим шляхом, що вказує на достовірність і надійність отриманих результатів.

Наведені результати досліджень, як і попередні [3-5], ще раз підтверджують ефективність запропонованої методології та перспективність такого підходу в моделях прогнозування і оптимізації параметрів технологічних процесів харчової технології.

Таким чином, можна зробити такі *висновки*:

Розроблено структурно-параметричну модель прогнозування якості готового продукту при оптимальних параметрах з урахуванням параметрів біосировини та особливостей технологічного процесу обробки високим тиском напівфабрикатів.

Розроблено алгоритм математичного моделювання та компромісної багатокритеріальної оптимізації процесу обробки напівфабрикатів.

Запропоновану методологію дослідження може бути поширено для знаходження оптимальних параметрів інших технологічних процесів харчової технології. У подальшому планується удосконалення наведеної методології з використанням теорії нечітких множин, концепції недовизначених моделей та інтервального аналізу.

Література:

1. *Радченко С.Г.* Особенности использования статистической методологии в моделировании сложных систем и процессов / С.Г. Радченко [Текст] // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільського гос-ва ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСГ, 2008. – Вип. 68. – С. 249-252.
2. *Дрейпер Н.Р.* Прикладной регрессионный анализ: 3-е изд.: пер. с англ. / Н.Р. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
3. *Магомедов Г.О.* Совершенствование технологии мучных кондитерских изделий: Монография / Г.О. Магомедов, А.Я. Олейникова, Т.А. Шевякова; Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж: ВГТА, 2008. – 200 с.
4. *Лавріненко Н.М.* Оптимізація піноутворювальної здатності та стійкості піни [Текст] / Н.М. Лавріненко, Н.А. Гніцевич, О.І. Бескровний, Н.А. Федотова // Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського № 1(49), 2011. серія Технічні науки. – Донецьк: 2011.– С. 121-130.
5. *Сукманов В.О.* Оптимізація параметрів процесу обробки високим тиском пасти з пряних трав / В.О. Сукманов, О.І. Бескровний, С.І. Охременко [Текст] // Прогресивні техніка і технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі; [редкол.: О.І. Черевко (відпов ред.) та ін.]. – Харків, 2012. – Вип. 1 (15). – С. 405-414.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Бескровный А.И.

Аннотация – в работе предложено и продемонстрировано применение усовершенствованного экспериментально-статистического метода для моделирования и оптимизации технологических процессов пищевой технологии.

IMPROVEMENT QUALITY MODEL OPTIMIZATION OF FOOD TECHNOLOGY

O. Beskrovnyu

Summary

The work proposed and demonstrated the use of advanced experimental and statistical methods for modeling and optimization of Food Technology process.