

*Н. Д. КОШЕВОЙ*, зав. каф., докт. техн. наук, проф., НАУ  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков

*Е.М. КОСТЕНКО*, канд. техн. наук, проф., проректор, Полтавская  
государственная аграрная академия

## **ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПОПКОРНА В МИКРОВОЛНОВОЙ ПЕЧИ**

На прикладі дослідження технологічного процесу приготування попкорну в мікрохвильовій печі показана ефективність оптимального за вартісними витратами планування експерименту. При цьому використовувалися наступні методи оптимізації планів багатofакторних експериментів: аналіз перестановок рядків початкової матриці планування експерименту, випадковий пошук, метод гілок і меж. Кращі результати отримані при використанні метода гілок і меж.

На примере исследования технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. При этом использовались следующие методы оптимизации планов многофакторных экспериментов: анализ перестановок строк исходной матрицы планирования эксперимента, случайный поиск, метод ветвей и границ. Лучшие результаты получены при использовании метода ветвей и границ.

**Постановка проблемы.** При решении задач оптимизации и управления различными технологическими процессами возникает проблема получения их математических моделей. При этом целесообразно получать эти модели при минимальных стоимостных затратах, что особенно важно при исследовании дорогостоящих процессов. Решить эту задачу можно с привлечением методов оптимального по стоимостным и временным затратам планирования эксперимента [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известны примеры применения этих методов для исследования технологических процессов [1,2].

В работе [3] приведены результаты исследования технологического процесса изготовления попкорна в микроволновой печи с привлечением классических методов планирования эксперимента. Недостатком этих методов является то, что не учитывается стоимость проведения экспериментов по синтезированным планам, т.е. опыты считаются равноценными.

**Цель работы:** синтезировать оптимальные по стоимостным затратам планы эксперимента для исследования технологического процесса изготовления попкорна и оценить эффективность этих планов.

**Основные результаты исследований.** При исследовании технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи [3] в качестве доминирующих факторов, влияющих на качество попкорна, были выбраны:  $X_1$  – цена пакета кукурузы для приготовления попкорна, усл. ед.;  $X_2$  – время приготовления, мин;  $X_3$  – мощность микроволновой печи, средняя или высокая;  $X_4$  – наличие предварительного подогрева;  $X_5$  – наличие поднятия подноса. В качестве критериев оптимизации были выбраны: количество кукурузы, которая остается нераскрытой; вкусовое качество попкорна. Исходный план эксперимента для исследования данного технологического процесса [3] приведен в табл. 1.

Проведем оптимизацию исходного плана эксперимента по суммарной стоимости его реализации. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 2. С помощью пакета прикладных программ [4] получены оптимальные по стоимости проведения планы эксперимента. При этом использовались следующие методы оптимизации планов многофакторных экспериментов: а) анализ перестановок строк исходной матрицы планирования эксперимента (проанализировано 2000000 вариантов); б) случайный поиск (проанализировано 2102569 вариантов). Матрицы планирования этих планов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходный и оптимальные планы эксперимента

Исходный план						Оптимальный план (анализ перестановок)						Оптимальный план (случайный поиск)					
Но- мер опы- та	Обозначение факторов					Но- мер опы- та	Обозначение факторов					Но- мер опы- та	Обозначение факторов				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
1	-1	-1	+1	-1	-1	6	-1	+1	-1	-1	-1	17	-1	-1	-1	+1	-1
2	-1	-1	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1	-1	+1	10	-1	0	+1	+1	-1
3	-1	+1	-1	+1	+1	8	+1	0	+1	+1	+1	13	+1	-1	+1	+1	-1
4	-1	-1	+1	+1	+1	9	+1	-1	-1	-1	-1	8	+1	0	+1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	-1	10	-1	0	+1	+1	-1	4	-1	-1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	-1	-1	5	+1	+1	+1	-1	-1	1	-1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	+1	11	+1	0	+1	-1	-1	7	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	0	+1	+1	+1	1	-1	-1	+1	-1	-1	14	+1	-1	+1	-1	+1
9	+1	-1	-1	-1	-1	12	-1	-1	-1	-1	+1	5	+1	+1	+1	-1	-1
10	-1	0	+1	+1	-1	4	-1	-1	+1	+1	+1	11	+1	0	+1	-1	-1
11	+1	0	+1	-1	-1	13	+1	-1	+1	+1	-1	15	+1	-1	-1	+1	+1
12	-1	-1	-1	-1	+1	14	+1	-1	+1	-1	+1	2	-1	-1	-1	+1	-1
13	+1	-1	+1	+1	-1	15	+1	-1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	-1	-1
14	+1	-1	+1	-1	+1	16	+1	+1	-1	+1	-1	12	-1	-1	-1	-1	+1
15	+1	-1	-1	+1	+1	17	-1	-1	-1	+1	-1	3	-1	+1	-1	+1	+1
16	+1	+1	-1	+1	-1	2	-1	-1	-1	+1	-1	16	+1	+1	-1	+1	-1
17	-1	-1	-1	+1	-1	3	-1	+1	-1	+1	+1	18	+1	+1	-1	-1	+1
18	+1	+1	-1	-1	+1	18	+1	+1	-1	-1	+1	9	+1	-1	-1	-1	-1

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному путем перестановки строк матрицы, составляет 52,25 усл. ед. (вариант плана 396929), в то время как стоимость исходного плана 71,78 усл. ед., а максимальная стоимость равна 109,48 усл. ед. (вариант плана 1246128).

Таблица 2. Стоимости изменений значений уровней факторов

Фактор	Стоимость изменений, усл. ед.					
	из «-1» в «+1»	из «+1» в «-1»	из «0» в «+1»	из «+1» в «0»	из «0» в «-1»	из «-1» в «0»
X <sub>1</sub>	1,79	1,25	0	0	0	0
X <sub>2</sub>	0,6	0,4	0,1	0,01	0,01	0,1
X <sub>3</sub>	5,0	3,0	0	0	0	0
X <sub>4</sub>	2,0	1,0	0	0	0	0
X <sub>5</sub>	0,5	0,5	0	0	0	0

Таким образом, имеем выигрыш в стоимости реализации эксперимента по исследованию технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи в 1,37 раза по сравнению с исходным планом и в 2,1 раза по сравнению с планом с максимальной стоимостью.

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному методом случайного поиска, составляет 31,71 усл. ед. (вариант плана 548591), в то время как максимальная стоимость равна 112,21 усл. ед. (вариант плана 587711). Таким образом, имеем выигрыш в стоимости реализации эксперимента по исследованию процесса приготовления попкорна в 2,26 раза по сравнению с исходным планом и в 3,54 раза по сравнению с планом с максимальной стоимостью.

Целесообразно распространить применение метода ветвей и границ [5] на решение задачи оптимизации исходного плана эксперимента для исследования технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи. Для этой цели использовались алгоритмы и программное обеспечение, реализующее оптимизацию композиционных планов второго порядка. При этом первый из алгоритмов реализует поиск оптимального плана методом ветвей и границ «в лоб», а второй алгоритм основан на получении первой и последней строки матрицы планирования методом прямого перебора, а затем полученный план оптимизируется методом ветвей и границ.

При использовании первого алгоритма получен оптимальный план, стоимость реализации которого составляет 21,07 усл. ед., а выигрыш в 3,41 раза по сравнению с исходным планом эксперимента. Оптимальный план эксперимента представлен в табл. 3.

Таблица 3. Оптимизированный с помощью первого алгоритма план эксперимента

Номер опыта	Обозначение факторов				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
7	-1	+1	+1	-1	+1
1	-1	-1	+1	-1	-1
4	-1	-1	+1	+1	+1
10	-1	0	+1	+1	-1
13	+1	-1	+1	+1	-1
8	+1	0	+1	+1	+1
14	+1	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	+1	-1	-1
11	+1	0	+1	-1	-1
9	+1	-1	-1	-1	-1
18	+1	+1	-1	-1	+1
16	+1	+1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	+1	+1
2	-1	-1	-1	+1	-1
17	-1	-1	-1	+1	-1
6	-1	+1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	+1

При использовании второго алгоритма получен оптимальный план, стоимость реализации которого составляет 20,61 усл. ед., а выигрыш в 3,48 раза по сравнению с исходным планом. Оптимальный план эксперимента приведен в табл. 4.

Таблица 4. Оптимизированный с помощью второго алгоритма план эксперимента

Номер опыта	Обозначение факторов				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
13	+1	-1	+1	+1	-1
8	+1	0	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	+1
10	-1	0	+1	+1	-1
1	-1	-1	+1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	+1
14	+1	-1	+1	-1	+1
11	+1	0	+1	-1	-1
5	+1	+1	+1	-1	-1
18	+1	+1	-1	-1	+1
9	+1	-1	-1	-1	-1
15	+1	-1	-1	+1	+1
16	+1	+1	-1	+1	-1
17	-1	-1	-1	+1	-1
2	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	+1	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	+1

**Выводы.** На примере исследования технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Лучшие результаты получены при использовании метода ветвей и границ (алгоритм 2).

**Список литературы:** 1. Кошевой Н.Д. Метод итерационного планирования оптимальных по стоимостным и временным затратам экспериментов / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2009.– Вип. 19.– С.44-48. 2. Koshevoy N.D. Appraisal of optimum efficiency by cost expenses of the experiment's planning / N.D. Koshevoy, V.A. Dergachev, E.M. Kostenko // Вісник Черкаського державного технологічного університету: спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ, 2009.– С.132-134. 3. Anderson Mark J. Applying DOE to Microwave Popcorn. Design of experiment identifies which factors matter and which ones don't, as well as helping find optimal settings / Mark J. Anderson, Hank P. Anderson // PI Quality, July / August 1993, p.p. 1-3. 4. Кошовий М.Д., Костенко О.М. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних планів багатofакторного експерименту». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №29920. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України 17.08.2009 р. 5. Кошевой Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка / Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.С. Чуйко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2010. – Вип. 25.– С.95-101.

*Поступила в редколлегию 01.10.2010*