

Оптимальное планирование эксперимента при исследовании технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи

КОШЕВОЙ Н.Д., ДЕРГАЧЕВ В.А., БУРЛЕЕВ О.Л., КОСТЕНКО Е.М.

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Проведена оптимизация планов эксперимента для исследования технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи. Оптимизация осуществлялась следующими методами: анализ перестановок, случайный поиск, метод ветвей и границ, метод ветвей и границ с применением ограничения по дополнительному критерию. Представлен сравнительный анализ полученных результатов.
 Ключевые слова: оптимизация, анализ, метод ветвей и границ, план эксперимента.

Проведено оптимізацію планів експерименту для дослідження технологічного процесу приготування попкорна в мікрохвильовій печі. Оптимізація здійснювалася наступними методами: аналіз перестановок, випадковий пошук, метод гілок і меж, метод гілок і меж із застосуванням обмеження по додатковому критерію. Представлений порівняльний аналіз отриманих результатів.
 Ключові слова: оптимізація, аналіз, метод гілок та меж, план експерименту.

Plans of experiment optimization for research of popcorn microwave preparation technological process is conducted. Optimization was carried out by the followings methods: analysis of transpositions, random search, branch-and-bound, branch-and-bound with the use of limitation on an additional criterion. The comparative analysis of the got results is presented.
 Keywords: optimization, analysis, method of branches and bound, plan of experiment.

Постановка проблемы. При решении задач оптимизации и управления различными объектами возникает проблема получения математических моделей указанных объектов. При этом целесообразно получать эти модели при минимальных стоимостных и временных затратах. 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: X1 – цена пакета кукурузы для приготовления попкорна, усл. ед.; X2 – время приготовления, мин.; X3 – мощность микроволновой печи, средняя или высокая; X4 – наличие предварительного подогрева; X5 – 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.

Таблица 1. Исходный план эксперимента

№ опыта	X1	X2	X3	X4	X5
1	-1	-1	1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	1	1
4	-1	-1	1	1	1
5	1	1	1	-1	-1
6	-1	1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	1
8	1	0	1	1	1
9	1	-1	-1	-1	-1
10	-1	0	1	1	-1
11	1	0	1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	1
13	1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	-1	1
15	1	-1	-1	1	1
16	1	1	-1	1	-1
17	-1	-1	-1	1	-1
18	1	1	-1	-1	1

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»
X1	1,79	1,25	-	-	-	-
X2	0,6	0,4	0,1	0,01	0,01	0,01
X3	5,0	3,0	-	-	-	-
X4	2,0	1,0	-	-	-	-
X5	0,5	0,5	-	-	-	-

С помощью пакетов прикладных программ [4, 5] 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); случайный поиск (проанализировано 2102569 вариантов); метод ветвей и границ; метод ветвей и границ с ограничением по дополнительному критерию. Матрицы планирования, полученные этими методами, представлены в табл. 3, 4, 5.

Таблица 3. Оптимальный план эксперимента полученный анализом перестановок

Анализ перестановок					
№ опыта	Обозначение факторов				
	X1	X2	X3	X4	X5
6	-1	1	-1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	1
8	1	0	1	1	1
9	1	-1	-1	-1	-1
10	-1	0	1	1	-1
5	1	1	1	-1	-1
11	1	0	1	-1	-1
1	-1	-1	1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	1
4	-1	-1	1	1	1
13	1	-1	1	1	-1
14	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
18	1	1	-1	-1	1

Таблица 4. Оптимальные план эксперимента полученный случайным поиском

Случайный поиск					
№ опыта	Обозначение факторов				
	X1	X2	X3	X4	X5
17	-1	-1	-1	1	-1
10	-1	0	1	1	-1
13	1	-1	1	1	-1
8	1	0	1	1	1
4	-1	-1	1	1	1
1	-1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	1
14	1	-1	1	-1	1
5	1	1	1	-1	-1
11	1	0	1	-1	-1
15	1	-1	-1	1	1
2	-1	-1	-1	1	-1
6	-1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1	1
16	1	1	-1	1	-1
18	1	1	-1	-1	1
9	1	-1	-1	-1	-1

Стоимость реализации экспериментов по плану, полученному путем перестановки строк матрицы, составляет 52,25 усл. ед. (вариант плана 396929), в то время как стоимость исходного плана 71,8 усл. ед., а максимальная стоимость равна 109, 48 усл. ед. (вариант плана 1246128). Таким образом, имеем выигрыш в стоимости реализации эксперимента по исследованию технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи в 1,37 раза по сравнению с исход-

ным планом и в 2,1 по отношению к плану с максимальной стоимостью.

Таблица 5. Оптимальный план эксперимента полученный методом ветвей и границ

№ опыта	Метод ветвей и границ				
	Обозначение факторов				
	X1	X2	X3	X4	X5
16	1	1	-1	1	-1
15	1	-1	-1	1	1
2	-1	-1	-1	1	-1
17	-1	-1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	1	1
6	-1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-1	-1	1
18	1	1	-1	-1	1
9	1	-1	-1	-1	-1
11	1	0	1	-1	-1
5	1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	-1	1
8	1	0	1	1	1
13	1	-1	1	1	-1
10	-1	0	1	1	-1
4	-1	-1	1	1	1
7	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1

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 по отношению к плану с максимальной стоимостью.

Стоимость реализации эксперимента по плану, полученному методом ветвей и границ, составляет 22,17 усл. ед. Выигрыш по стоимости осуществления эксперимента по исследованию процесса приготовления попкорна составил 3,16 раза.

Недостатком всех вышеперечисленных методов является то, что в них учитывается только один критерий оптимизации плана – стоимость. Однако в действительности любая задача оптимизации многокритериальная. Поэтому, чтобы более адекватно отобразить этот процесс, целесообразно ввести дополнительный критерий ограничения. Особенно это актуально в условиях рыночной конкуренции, когда необходимо провести исследование с минимальными затратами без превышения срока, выделенного на его осуществление. Таким образом, применим к исследованию процесса приготовления попкорна метод ветвей и границ с введением ограничения дополнительного критерия. В качестве дополнительного критерия ограничения возьмем время, затрачиваемое на реализацию плана эксперимента. Матрица времен при переходе уровней факторов приведена в табл.6.

С помощью указанного метода были получены:

- основной оптимальный план (табл. 7) при временном ограничении $t_{огр} = 70$ мин;
- альтернативные оптимальные планы MinFirst – с минимальным значением основного критерия (табл. 8) и MinSecond – с минимальным значением

дополнительного критерия (табл. 9) при превышении заданного ограничения ($t_{огр} = 60$ мин.)

Таблица 6. Матрица времен при переходе уровней факторов

Фактор	Время, мин.					
	из «-1» в «1»	из «1» в «-1»	из «0» в «1»	из «1» в «0»	из «0» в «-1»	из «-1» в «0»
X1	0	0	0	0	0	0
X2	6	4	6	0	4	0
X3	2	2	0	0	0	0
X4	4	0	0	0	0	0
X5	2	2	0	0	0	0

Таблица 7. Оптимальный план ($t_{огр} = 70$ мин.)

№ опыта	X1	X2	X3	X4	X5
3	-1	1	-1	1	1
6	-1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-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
2	-1	-1	-1	1	-1
17	-1	-1	-1	1	-1
10	-1	0	1	1	-1
4	-1	-1	1	1	1
8	1	0	1	1	1
13	1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	-1	1
11	1	0	1	-1	-1
5	1	1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1

Таблица 8. Альтернативный оптимальный план MinFirst ($t_{огр} = 60$ мин.)

№ опыта	Обозначение факторов				
	X1	X2	X3	X4	X5
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
18	1	1	-1	-1	1
9	1	-1	-1	-1	-1
11	1	0	1	-1	-1
5	1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	-1	1
8	1	0	1	1	1
13	1	-1	1	1	-1
10	-1	0	1	1	-1
4	-1	-1	1	1	1
7	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1

Таблица 9. Альтернативный оптимальный план MinSecond ($t_{огр} = 60$ мин.)

№ опыта	Обозначение факторов				
	X1	X2	X3	X4	X5
3	-1	1	-1	1	1
6	-1	1	-1	-1	-1
12	-1	-1	-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
17	-1	-1	-1	1	-1
2	-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
11	1	0	1	-1	-1
5	1	1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1

Стоимости полученных планов, выигрыши, а также заданные ограничения и рассчитанные значения дополнительного критерия представлены в табл.10 .

Таблица 10. Результаты оптимизации по методу ветвей и границ с введением ограничения по дополнительному критерию

исх. план	опт. план	Выигрыш	Ограничение (дополн. критерий), мин.	Значение дополн. критерия для опт. плана, мин.	Альтернатив. метод
71,8	22,71	3,16	60	90	minFirst
71,8	24	2,99	60	70	minSecond
71,8	24	2,99	70	70	-

Выводы

На примере исследования технологического процесса приготовления попкорна в микроволновой печи показана эффективность оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента. Применение метода ветвей и границ дало лучший выигрыш по стоимости – в 3,16 раза по сравнению с исходным планом. Однако тот факт, что при этом не учитывались временные затраты на проведение эксперимента, привел к необходимости использования метода ветвей и границ с введением ограничения на дополнительный критерий. При ограничении на время 70 мин. был получен оптимальный план с выигрышем по стоимости в 2,99 раза. Таким образом, эксперимент может быть осуществлен за 70 мин. при лучших стоимостных показателях по сравнению с остальными планами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошевой Н.Д. Метод итерационного планирования оптимальных по стоимостным и временным затратам