

УДК 519.24

Н. Д. КОШЕВОЙ, А. А. БЕЛЯЕВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАНОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА

*Разработаны метод и программа для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием метода роя частиц. Композиционные планы второго порядка используют при построении квадратичных математических моделей исследуемых объектов и систем. Проведен анализ известных методов синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам композиционных планов второго порядка. Работоспособность алгоритма проверялась при исследовании процесса термической обработки пористого материала, а также режимов обслуживания комплекса технических систем. Показана его эффективность в сравнении со следующими методами: последовательного приближения, ветвей и границ и табу-поиска.*

**Ключевые слова:** оптимальный план, рой частиц, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, выигрыш.

### Постановка проблемы

Наиболее важной составной частью научных исследований являются эксперименты. Это один из основных способов получить новые научные знания. В основе этого способа лежит эксперимент, представляющий собой научно поставленный опыт или наблюдение явления в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за его ходом, управлять им, воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий. От обычного, обыденного, пассивного наблюдения эксперимент отличается активным воздействием исследователя на изучаемое явление.

Планирование эксперимента - раздел математической статистики, изучающий методы организации совокупности опытов с различными условиями для получения наиболее достоверной информации о свойствах исследуемого объекта при наличии неконтролируемых случайных возмущений. Применение планирования эксперимента делает поведение экспериментатора целенаправленным и организованным, существенно способствует повышению производительности его труда и надежности полученных результатов. Важным достоинством метода является его универсальность, пригодность в огромном большинстве областей исследования.

Экспериментальные методы исследования широко применяют для оптимизации производственных процессов. Одной из главных целей эксперимента является получение максимального количества информации о влиянии исследуемых факторов на производственный процесс. Далее строится матема-

тическая модель исследуемого объекта. При этом получить эти модели необходимо при минимальных стоимостных и временных затратах. Особенно это важно при исследовании длительных и дорогостоящих процессов.

Задача оптимизации планов по стоимости (временным затратам) эксперимента является NP-полной, т.е. для своего решения требует времени и большого количества вычислений, быстро растущих с увеличением размерности задачи. Поэтому полный перебор всех возможных вариантов решения является затруднительным. В связи с этим необходимо находить решения с помощью приближенных алгоритмов.

### Анализ исследований и публикаций

Возможно применение методов комбинаторной оптимизации [1-3]. Известно использование метода ветвей и границ [4] и последовательного приближения для оптимизации композиционных планов второго порядка, которые используют при построении квадратичных математических моделей исследуемых объектов, в том числе процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами [5]. Известны примеры применения для синтеза оптимальных по стоимости (или времени реализации) планов факторного эксперимента таких методов, как полный перебор, случайный поиск, метод ветвей и границ, последовательного приближения [6-8]. Поэтому целесообразно выполнить моделирование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами

и исследование режима обслуживания комплекса технических систем методом роя частиц и провести сравнительный анализ результатов с методами ветвей и границ, последовательного приближения, табу-поиска.

### Цель статьи

Разработка метода и программного обеспечения для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма роя частиц и проведение сравнительного анализа разработанного метода с методами ветвей и границ, последовательного приближения, табу-поиска.

### Основные материалы исследования

Планы второго порядка позволяют сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, который содержит большее число членов, чем неполный квадратичный полином, сформированный по планам первого порядка, и поэтому требуют большего числа выполняемых опытов. В ортогональном центральном композиционном планировании (ОЦКП) к ядру, представляющему собой план полного факторного эксперимента (ПФЭ)  $2^k$ , добавляется центральная точка ( $x_i = 0, i = 1, 2, \dots, k$ ) и по две так называемые «звездные точки» для каждого фактора ( $x_i = \pm\alpha, x_j = 0$  при  $j$  не равно  $i$ ). В результате общее число опытов в ОЦКП составит  $n = 2^k + 2k + 1$ , т.е. будет существенно меньше, чем, например, в плане ПФЭ  $3^k$  при  $k > 2$ . Таким образом, общее число точек в планах приведено в табл. 1.

В ОЦКП каждый фактор фиксируется, в общем случае, на пяти уровнях ( $-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha$ ). Значения параметров ОЦКП при числе факторов  $k$  представлены в табл. 2.

Разработаны метод и программа для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма роя частиц. В работе [9] для выявления влияния характеристик термических режимов обработки на механические свойства обрабатываемого материала строили мате-

матическую модель процесса термической обработки пористого материала. В качестве показателей процесса, характеризующих поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок, были взяты модуль упругости  $Y_1$  и прочность материала  $Y_2$ . В качестве факторов, характеризующих термический режим обработки, были взяты температура термического процесса  $X_1$ , время термического воздействия  $X_2$ , влажность материала  $X_3$  и пористость материала  $X_4$ .

Стоимости и время изменений значений уровней факторов приведены в табл.3. Стоимость реализации эксперимента по исходному плану составляет  $S_{исх} = 3025$  усл. ед., а время –  $t_{исх} = 97561$  с.

Исходный план ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП), в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл.4.

Оптимизацию планов многофакторного эксперимента осуществляли с использованием следующих критериев:

1. Суммарная стоимость проведения эксперимента:

$$S_{общ} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=2}^k S_{i,j} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $n$  – количество опытов;

$k$  – количество факторов;

$S_{i,j}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте.

2. Суммарное время проведения эксперимента:

$$t_{общ} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $t_{i,j}$  – время установки  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте.

Таблица 1

Общее число точек в плане ОЦКП

k	2	3	4	5	6
ОЦКП	9	15	25	43	77
ПФЭ $3^k$	9	27	81	243	729

Таблица 2

Значения параметров ОЦКП

k	2	3	4	5	6
$\alpha$	1	1,215	1,414	1,596	1,761

Таблиця 3

Стоимости и время изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений уровней факторов, усл.ед.	Обозначение факторов				Время изменений уровней факторов, с	Обозначение факторов			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
из «-α» в «-1»	40	10	2	3	из «-α» в «-1»	720	1	60	60
из «-α» в «0»	140	30	7	2,5	из «-α» в «0»	2520	3	210	60
из «-α» в «+1»	240	50	12	2	из «-α» в «+1»	4320	5	360	60
из «-α» в «+α»	280	58	14	1,8	из «-α» в «+α»	5040	5,8	420	60
из «-1» в «-α»	20	2	6	4,2	из «-1» в «-α»	1440	0,2	120	60
из «-1» в «0»	100	30	5	2,5	из «-1» в «0»	1800	3	150	60
из «-1» в «+1»	200	50	10	2	из «-1» в «+1»	3600	5	300	60
из «-1» в «+α»	240	58	12	1,8	из «-1» в «+α»	4320	5,8	360	60
из «0» в «-α»	70	2	21	4,2	из «0» в «-α»	5040	0,2	420	60
из «0» в «-1»	50	10	15	3	из «0» в «-1»	3600	1	300	60
из «0» в «+1»	100	50	5	2	из «0» в «+1»	1800	5	150	60
из «0» в «+α»	140	58	7	1,8	из «0» в «+α»	2520	5,8	210	60
из «+1» в «-α»	120	2	36	4,2	из «+1» в «-α»	8640	0,2	720	60
из «+1» в «-1»	100	10	30	3	из «+1» в «-1»	7200	1	600	60
из «+1» в «0»	50	30	15	2,5	из «+1» в «0»	3600	3	150	60
из «+1» в «+α»	40	58	2	1,8	из «+1» в «+α»	720	5,8	60	60
из «+α» в «-α»	140	2	42	4,2	из «+α» в «-α»	10080	0,2	840	60
из «+α» в «-1»	120	10	36	3	из «+α» в «-1»	8640	1	720	60
из «+α» в «0»	70	30	21	2,5	из «+α» в «0»	5040	3	420	60
из «+α» в «+1»	20	50	6	2	из «+α» в «+1»	1440	5	120	60

Таблиця 4

Исходный и оптимальные планы ОЦКП

Исходный план					Оптимальный план 1					Оптимальный план 2				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	4	-1	-1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	17	-α	0	0	0	6	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	-1	+1	25	0	0	0	0	17	-α	0	0	0
6	-1	+1	-1	+1	22	0	0	+α	0	3	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	21	0	0	-α	0	4	-1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	20	0	+α	0	0	8	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	11	+1	-1	+1	-1	7	+1	-1	-1	+1
10	-1	+1	+1	-1	12	-1	-1	+1	-1	22	0	0	+α	0
11	+1	-1	+1	-1	15	+1	-1	-1	-1	12	-1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1	7	+1	-1	-1	+1	10	-1	+1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1	8	-1	-1	-1	+1	9	+1	+1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	21	0	0	-α	0
15	+1	-1	-1	-1	18	+α	0	0	0	19	0	-α	0	0
16	-1	-1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1	24	0	0	0	+α
17	-α	0	0	0	9	+1	+1	+1	-1	23	0	0	0	-α
18	+α	0	0	0	16	-1	-1	-1	-1	25	0	0	0	0
19	0	-α	0	0	13	+1	+1	-1	-1	20	0	+α	0	0
20	0	+α	0	0	24	0	0	0	+α	11	+1	-1	+1	-1
21	0	0	-α	0	23	0	0	0	-α	15	+1	-1	-1	-1
22	0	0	+α	0	19	0	-α	0	0	16	-1	-1	-1	-1
23	0	0	0	-α	5	+1	+1	-1	+1	18	+α	0	0	0
24	0	0	0	+α	6	-1	+1	-1	+1	14	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	2	-1	+1	+1	+1	13	+1	+1	-1	-1

С помощью прикладной программы, реализующей метод роя частиц, оптимизируем исходный план проведения эксперимента по критерию минимальной стоимости проведения эксперимента (1). В результате был получен оптимальный план эксперимента, представленный в табл.4. Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет  $S_{\text{опт},1}=511$  усл. ед., а время –  $t_{\text{опт},1}=11820$  с. Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет  $V_{S1}=5,92$  по сравнению с исходным планом, а во времени –  $V_t=8,25$ .

Аналогично проведем оптимизацию исходного плана методом роя частиц по критерию минимального времени реализации эксперимента (2). Полученный план проведения эксперимента представлен в табл. 4. Время реализации эксперимента по этому плану составляет –  $t_{\text{опт},2}=7225$  с, а стоимость –  $S_{\text{опт},2}=698,6$  усл. ед. Таким образом, выигрыши во времени реализации эксперимента составляет  $V_{t2}=4,33$  по сравнению с исходным планом, а в стоимости –  $V_{S2}=13,5$ .

Сравнение результатов, полученных методами роя частиц, табу-поиска, методом ветвей и границ и методом последовательного приближения приведено в табл. 5.

Таким образом, метод роя частиц позволяет получить выигрыши большие, чем при использовании следующих методов: ветвей и границ, последовательного приближения, табу-поиска. Однако он обладает гораздо более низкими показателями (время решения 0,42 с) быстродействия по сравнению с методом последовательного приближения (время решения близко к 0 с). Требуемый объем памяти для работы программы, реализующей метод роя частиц составляет 47 Мб. Объем памяти ЭВМ, необходимый для работы программы, реализующей метод ветвей и границ – 147 Мб, методом табу-поиска – 38 Мб, а последовательного приближения – 10 Мб. Таким образом, метод роя частиц требует немного большего объема памяти ЭВМ и имеет несколько большее время решения задачи по сравнению с методом последовательного приближения. Однако, как видно из табл. 5, метод роя частиц позволяет полу-

чать большие выигрыши в стоимости и времени реализации эксперимента.

В работе [10] с применением методов планирования экспериментов выполнено исследование, моделирование и оптимизация обслуживания комплекса технических систем, которые представляют собой распределенные ЭВМ, а также режима работы оператора по обслуживанию этого комплекса. Недостатком этого исследования является то, что не учитывалось время, затрачиваемое на проведение эксперимента.

Для исследования режима обслуживания комплекса технических систем параметром оптимизации является численное значение  $Y$ , отражающее длительность обслуживания одной системы. Необходимо найти условия работы оператора, при которых простои системы на обслуживание будут минимальными.

Доминирующими факторами, влияющими на этот показатель, были выбраны:  $X_1$  – число систем, обслуживаемых оператором на протяжении рабочей смены;  $X_2$  – среднее время обслуживания одной системы;  $X_3$  – время подготовки к обслуживанию очередной системы, мин;  $X_4$  – продолжительность рабочей смены, ч.  $Y=f(X_1, X_2, X_3, X_4)$

Временные изменения значений уровней факторов приведены в табл. 6.

Исходный план ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП), в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл. 7.

Проведем оптимизацию начального плана РЦКП по критерию суммарного времени реализации эксперимента. Временные затраты на реализацию экспериментов составляют 3604 минуты для начального плана; 1996 минут для оптимального плана, полученного методом роя частиц. При этом имеем выигрыш во временных затратах на реализацию эксперимента в 1,81 раза по сравнению с начальным планом. В то время как при использовании метода ветвей и границ выигрыш составлял 1,5 раза, а метода табу-поиска - 1,69.

Таблица 5

Сравнительный анализ результатов оптимизации

Выигрыши	Метод роя частиц		Метод табу-поиска		Метод ветвей и границ		Метод последовательного приближения	
	$V_S$	$V_t$	$V_S$	$V_t$	$V_S$	$V_t$	$V_S$	$V_t$
По стоимости реализации эксперимента	5,92	8,25	5,49	7,69	5,47	7,33	5,47	7,24
По времени реализации эксперимента	4,33	13,5	4,14	12,63	3,54	12,58	3,54	12,34

Таблица 6

Временные изменения значений уровней факторов

Временные изменения значений уровней факторов, ч	Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
из «-α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «-α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «-α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «-α» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «-1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «-1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «-1» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «-1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «0» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «0» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «0» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «0» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «+1» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «+1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «+1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+α» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «+α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «+α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «+α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0

Таблица 7

Исходный и оптимальные планы РЦКП

Исходный план					Оптимальный план (метод ветвей и границ)					Оптимальный план (рой частиц)				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	-1	-1	-1	-1	24	0	0	0	+α	1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	11	-1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1	11	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1	23	0	0	0	-α
5	-1	-1	+1	-1	12	+1	+1	-1	+1	18	+α	0	0	0
6	+1	-1	+1	-1	10	+1	-1	-1	+1	22	0	0	+α	0
7	-1	+1	+1	-1	14	+1	-1	+1	+1	25	0	0	0	0
8	+1	+1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1	12	+1	+1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	3	-1	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	4	+1	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	8	+1	+1	+1	-1	21	0	0	-α	0
16	+1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1	19	0	-α	0	0
17	-α	0	0	0	2	+1	-1	-1	-1	20	0	+α	0	0
18	+α	0	0	0	17	-α	0	0	0	17	-α	0	0	0
19	0	-α	0	0	18	+α	0	0	0	16	+1	+1	+1	+1
20	0	+α	0	0	19	0	-α	0	0	15	-1	+1	+1	+1
21	0	0	-α	0	20	0	+α	0	0	13	-1	-1	+1	+1
22	0	0	+α	0	21	0	0	-α	0	5	-1	-1	+1	-1
23	0	0	0	-α	22	0	0	+α	0	7	-1	+1	+1	-1
24	0	0	0	+α	25	0	0	0	0	3	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	26	0	0	0	0	26	0	0	0	0

Продолжение табл. 7

Исходный план					Оптимальный план (метод ветвей и границ)					Оптимальный план (рой частиц)				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
26	0	0	0	0	27	0	0	0	0	27	0	0	0	0
27	0	0	0	0	28	0	0	0	0	28	0	0	0	0
28	0	0	0	0	29	0	0	0	0	29	0	0	0	0
29	0	0	0	0	30	0	0	0	0	30	0	0	0	0
30	0	0	0	0	31	0	0	0	0	31	0	0	0	0
31	0	0	0	0	23	0	0	0	-α	24	0	0	0	+α

### Выводы

Разработаны метод и программа, реализующие оптимизацию композиционных планов второго порядка с применением алгоритма роя частиц. Доказана их работоспособность и эффективность при исследовании процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами и процесса обслуживания комплекса технических систем.

Поиск оптимального или близкого к оптимальному плану, полученного этим методом, реализуется за меньшее время счёта, чем при методе ветвей и границ. Показано, что для оптимизации планов ОЦКП и РЦКП целесообразно использование алгоритма роя частиц.

### Литература

1. Hoskins, D. S. *Combinatorics and Statistical Inferecing [Text]* / D. S. Hoskins // *Applied Optimal Designs*. – 2007. – No. 4. – P. 147-179.

2. Morgan, J. P. *Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics [Text]* / J. P. Morgan // *Journal of the American Statistical Association*. – 2005. – Vol.100, No. 471. – P. 1092-1093.

3. Bailey, R. A. *Combinatorics of optimal designs [Text]* / R. A. Bailey, P. G. Cameron // *Surveys in Combinatorics*. – 2009. – Vol. 365. – P. 19-73.

4. Кошевой, Н. Д. *Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка [Текст]* / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. С. Чуйко // *Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка*. – 2010. – Вип. 25. – С. 95-101.

5. Кошевой, Н. Д. *Применение методов ветвей и границ и последовательного приближения для оптимизации моделирования процесса получения пористых материалов [Текст]* / Н. Д. Кошевой, А. С. Чуйко, Е. М. Костенко // *Оптимізація виробничих процесів : зб. наук. пр. Севастопольського нац. техн. ун-ту*. – 2011. – Вип. 13. – С. 69-74.

6. *Application of optimal planning methodologies for investigation of technological processes, devices and systems [Text]* / Irina Kirichenko, Nikolay Koshevoy,

Elena Kostenko, Victoriia Rozhnova // *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. – Lublin, 2013. – Vol. 13, No. 3. – P. 90–97.

7. *Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment [Text]* / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroclin // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – Vol. 70, No. 8. – P. 731–734.

8. *Investigation into optoelectronic aviation angle meter by the design – of – experiments method [Text]* / A. S. Oganesyanyan, M. V. Thehovskiy, N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2010. – Vol. 69, No. 9. – P. 841–847.

9. Соколовская, Е. И. *Моделирование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами [Текст]* / Е. И. Соколовская // *Математическое моделирование*. – 2010. – № 1(22). – С. 43-45.

10. Барабацук, В. И. *Планирование эксперимента в технике [Текст]* / В. И. Барабацук, Б. П. Крендер, В. И. Мирошниченко. – К. : Техника, 1984. – 200 с.

### References

1. Hoskins, D. S. *Combinatorics and Statistical Inferecing. Applied Optimal Designs*, vol. 4, 2007, pp. 147-179.

2. Morgan, J. P. *Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. Journal of the American Statistical Association*, vol. 100, no. 471, 2005, pp. 1092-1093.

3. Bailey, R. A., Cameron, P. G. *Combinatorics of optimal designs. Surveys in Combinatorics*, vol. 365, 2009, pp. 19-73.

4. Koshevoj, N. D., Kostenko, E. M., Chujko, A. S. *Primenenie metoda vetvej i granic dlja optimizacii kompozicionnyh planov vtorogo porjadka [Application of the method of branches and borders to optimize composite designs of the second order]. Kiev, Zb. nauk. pr. vijs'k. in-tu Ky'ivsk'ogo nacz. un-tu im. Tarasa Shevchenka*, 2010, vol. 25, pp. 95-101.

5. Koshevoj, N. D., Kostenko, E. M., Chujko, A. S. *Primenenie metodov vetvej i granic i posledovatel'nogo priblizhenija dlja optimizacii modelirovanija processa poluchenija poristyh materialov [Application*

of the branch and bound and consistent approach to optimize the modeling process for producing a porous material]. *Opty`mizaciya vy`robny`chy`x procesiv: Zb. nauk. pr. Sevastopol'skogo nac. tehn. un-tu.* 2011, vol. 13, pp. 69-74.

6. Kirichenko, I., Koshevoy, N., Kostenko, E., Rozhnova, V. Application of optimal planning methodologies for investigation of technological processes, devices and systems. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture.* Lublin, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 90–97.

7. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M., Gordienko, V. A., Syroklin, V. P. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2011, vol. 70, no. 8, pp. 731–734.

8. Oganessian, A. S., Thehovskiy, M. V., Koshevoy, N. D., Gordienko, V. A. Investigation into optoelectronic aviation angle meter by the design – of – experiments method. *Telecommunications and Radio Engineering,* 2010, vol. 69, no. 9, pp. 841–847.

9. Sokolovskaja, E. I. Modelirovanie processa poluchenija poristyh materialov s optimal'nymi mehanicheskimi svojstvami [Simulation process of producing porous materials with optimum mechanical properties]. *Matematicheskoe modelirovanie.* 2010, no. 1(22), pp. 43–45.

10. Barabashhuk, V. I., Kreder, B. P., Miroshnichenko, V. I. *Planirovanie jeksperimenta v tehnikе* [Planning the experimental technique]. Kyiv, 1984, Tehnika Publ.. 200 p.

*Поступила в редакцію 2.02.2017, рассмотрена на редколлегии 16.02.2017*

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОЮ ЧАСТИНОК ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПЛАНІВ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

*М. Д. Кошовий, А. А. Беляєва*

Розроблено метод і програму для оптимізації композиційних планів другого порядку з використання методу рою частинок. Композиційні плани другого порядку використовують при побудові квадратичних математичних моделей досліджуваних об'єктів і систем. Проведено аналіз відомих методів синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами композиційних планів другого порядку. Працездатність алгоритму перевірялася при дослідженні процесу термічної обробки пористого матеріалу, а також режимів обслуговування комплексу технічних систем. Показано його ефективність в порівнянні з наступними методами: послідовного наближення, гілок і меж, табу-пошуку.

**Ключові слова:** оптимальний план, рій частинок, оптимізація, планування експерименту, вартість, виграш.

### APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION OF COMPOSITE SECOND ORDER PLANS

*N. D. Koshevoy, A. A. Beliaieva*

Develop methods and software for the optimization of composite second order plans using the method of particle swarm. Composite second-order plans for use in the construction of quadratic mathematical models of the objects and systems. Analysis of the known methods of synthesis of optimal cost and time plans composite second order. Efficiency of the algorithm was tested in the study of the thermal treatment process of the porous material and the regimes of the technical system maintenance. Demonstrated its effectiveness in comparison with the following methods: successive approximation, branch and bound and taboo search.

**Keywords:** optimal plan, particle swarm optimization, experimental design, cost, win.

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kafedraapi@ukr.net.

**Беляева Анна Андреевна** – аспирант каф. авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: annet1607@mail.ru.

**Koshevoy Nikolay Dmitrievich** – Dr. Sc. in technology, prof., Head of the Department of aircraft instruments and measurements, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: kafedraapi@rambler.ru.

**Beliaieva Anna Andreevna** – post-graduate student of Department of aircraft instruments and measurements, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: annet1607@mail.ru.