

doi: 10.32620/oikit.2019.86.13

УДК 519.24

Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, В.В. Муратов

## **Оптимизация композиционных планов эксперимента методом прыгающих лягушек**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Композиционные планы второго порядка применяют при построении квадратичных математических моделей исследуемых объектов и систем. К ним относятся планы ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) и ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП). В качестве критериев оптимизации этих планов выбраны: стоимость реализации плана эксперимента, время его проведения.

Разработаны метод и программное обеспечение для оптимизации по стоимостным и временным затратам композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма прыгающих лягушек. Программное обеспечение реализовано на языке C<sup>++</sup>. Все необходимые расчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2.60 GHz. Необходимый объем памяти – 26 Мб. Количество факторов и стоимости переходов уровней факторов вводятся с клавиатуры, либо задаются в файле.

Реализация метода прыгающих лягушек требует небольшого объема памяти ЭВМ и имеет высокое быстродействие решения задачи.

Проведен анализ известных методов синтеза оптимальных по стоимостным и временным затратам композиционных планов второго порядка и показана его эффективность по сравнению со следующими методами: роя частиц, табу-поиска, ветвей и границ, последовательного приближения. С помощью разработанного метода и программного обеспечения для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма прыгающих лягушек можно достичь высоких выигрышей по сравнению с начальным планом эксперимента, оптимальных или близких к оптимальным результатов в сравнении с методами роя частиц, табу-поиска, ветвей и границ, последовательного приближения, а также высокого быстродействия решения задачи оптимизации по сравнению с разработанными ранее методами оптимизации композиционных планов эксперимента. Работоспособность разработанного метода проверена при исследовании процесса термической обработки пористого материала, а также режимов обслуживания комплекса технических систем.

Показано, что для оптимизации планов ОЦКП и РЦКП целесообразно использование метода прыгающих лягушек. Дальнейшие работы будут направлены на применение этого метода при исследовании разнообразных технических систем.

**Ключевые слова:** оптимальный план, метод прыгающих лягушек, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, время, выигрыш.

### **Введение**

Наиболее важной составной частью научных исследований являются эксперименты. Это один из основных способов получить новые научные знания. Планирование эксперимента делает поведение экспериментатора целенаправленным и организованным, способствует существенному повышению производительности его труда и надежности полученных результатов. Важным преимуществом метода является его универсальность, пригодность в огромном большинстве областей исследования [1]. 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 математическая модель исследуемого объекта. При этом получить такие модели необходимо при минимальных стоимостных и временных затратах, что особенно важно при исследовании длительных и дорогостоящих процессов [2 – 3].

Объект исследования: технологические процессы и системы, позволяющие осуществление активного эксперимента.

Предмет исследования: методы оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов эксперимента, основанные на применении алгоритма прыгающих лягушек [4].

Цель исследования: разработка метода и программного обеспечения для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма прыгающих лягушек и проведение сравнительного анализа разработанного метода с методами роя частиц [5], табу-поиска [6], ветвей и границ [7], последовательного приближения [7].

По результатам сравнения выдаются рекомендации для использования разработанного метода.

### **1. Постановка задачи**

Задача нахождения минимальной стоимости проведения эксперимента методом полного перебора является NP – трудной, и точное решение можно найти только для небольшого количества факторов. Для количества факторов  $k > 3$  число перестановок в матрице планирования эксперимента резко увеличивается и на современном уровне развития вычислительной техники точно решить задачу невозможно. В связи с этим становятся актуальными разработка и исследование приближенных методов оптимизации.

### **2. Анализ исследований и публикаций**

Возможно применение методов комбинаторной оптимизации. Известно использование методов роя частиц [5], табу-поиска [6], ветвей и границ [7] и последовательного приближения [7] 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. Кроме того, известны примеры применения для синтеза оптимальных по стоимости (или времени реализации) планов факторного эксперимента таких методов, как метод обезьяньего поиска [8], метод прыгающих лягушек [9], полный перебор [10], случайный поиск [10]. Поэтому целесообразно выполнить исследование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами и режима обслуживания комплекса технических систем с использованием метода прыгающих лягушек.

### **3. Основные материалы исследования**

Для решения поставленной задачи разработаны метод и программа его реализации для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма прыгающих лягушек [4].

Сущность метода прыгающих лягушек для оптимизации композиционных планов второго порядка и программы, обеспечивающей его реализацию, заключается в следующем. В начале работы программы вводится количество факторов  $k$ , после чего осуществляется ввод стоимостей (времен) переходов между уровнями и строится матрица планирования эксперимента, в которой к ядру, представляющему собой план полного (дробного) факторного эксперимента, добавляются центральные точки ( $x_i = 0$ ;  $i = 1, 2, \dots, k$ ) и по две так называемые «звездные точки» для каждого из факторов ( $x_i = \pm\alpha$ ;  $x_j = 0$  при  $j \neq i$ ) в зависимости от типа центрального композиционного планирования. Затем вычисляется начальная стоимость (время) проведения эксперимента и происходит генерация матрицы сумм стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов. Выполняется сортировка столбцов по индексам и генерация массивов индексов для сумм стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов. Затем осуществляются перестановки столбцов в соответствии с массивом индексов для сумм стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов. Выполняется построчный перебор между всеми блоками столбцов (мемплексов, в которых перемещается лягушка) и определяется начальная точка для дальнейшего перебора, исходя из наименьшей суммы стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов. Кроме того, программой выполняется поиск в рамках блока столбца, в котором находится лягушка, по минимальному значению суммы стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов, после чего происходит переход на следующую строку матрицы планирования и сравнение с предыдущей. Осуществляется поиск в блоке столбца с наименьшим значением суммы стоимостей (времен) переходов между уровнями и установление соответствующего блока (перестановка местами в матрице планирования эксперимента). После реализации необходимых перестановок выполняют: построение оптимальной матрицы планирования эксперимента; расчет общей стоимости (времени) реализации эксперимента; расчет величины выигрыша  $B$ ; расчет времени  $t$ , затраченного на оптимизацию плана полного факторного эксперимента с использованием метода прыгающих лягушек.

В работе [9] были разработаны метод и программное обеспечение для оптимизации планов полного факторного эксперимента по стоимостным (временным) затратам с помощью алгоритма прыгающих лягушек. Программное обеспечение для оптимизации композиционных планов второго порядка изменено в следующих модулях: генерация исходной матрицы планирования эксперимента, ввод стоимостей (времен) переходов между уровнями для каждого из факторов с учетом «звездных точек» для выбранного типа центрального композиционного планирования и выполнение перестановок для получения оптимизированных планов методом прыгающих лягушек.

Программное обеспечение реализовано на языке программирования C++. Все необходимые расчеты выполнены на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2.60 GHz. Необходимый объем памяти – 26 Мб. Количество факторов и стоимости переходов уровней факторов вводятся с клавиатуры либо задаются в файле. Реализация метода прыгающих лягушек требует небольшого объема памяти ЭВМ и имеет высокое быстродействие решения задачи. Разработанное программное обеспечение состоит из следующих модулей: ввод данных, построение исходной матрицы

планирования эксперимента, построение матрицы сумм стоимостей (времен) изменения значений уровней факторов, оптимизация методом прыгающих лягушек, построение оптимальной матрицы планирования эксперимента, расчет выигрыша В.

В работе [10] для выявления влияния характеристик термических режимов обработки на механические свойства обрабатываемого материала оптимизировали план 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, выбраны температура термического процесса  $X_1$ , время термического воздействия  $X_2$ , влажность материала  $X_3$  и пористость материала  $X_4$ .

Стоимости и время изменения значений уровней факторов приведены в табл. 1. Стоимость реализации эксперимента по исходному плану составляет  $S_{исх} = 3025$  усл. ед., а время реализации –  $t_{исх} = 97561$  с.

Таблица 1

Стоимости и время изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений уровней факторов, усл. ед.	Обозначение факторов				Время изменений уровней факторов, с	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
из «-а» в «-1»	40	10	2	3	из «-а» в «-1»	720	1	60	60
из «-а» в «0»	140	30	7	2,5	из «-а» в «0»	2520	3	210	60
из «-а» в «+1»	240	50	12	2	из «-а» в «+1»	4320	5	360	60
из «-а» в «+а»	280	58	14	1,8	из «-а» в «+а»	5040	5,8	420	60
из «-1» в «-а»	20	2	6	4,2	из «-1» в «-а»	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 «+а»	240	58	12	1,8	из «-1» в «+а»	4320	5,8	360	60
из «0» в «-а»	70	2	21	4,2	из «0» в «-а»	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 «+а»	140	58	7	1,8	из «0» в «+а»	2520	5,8	210	60
из «+1» в «-а»	120	2	36	4,2	из «+1» в «-а»	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 «+а»	40	58	2	1,8	из «+1» в «+а»	720	5,8	60	60
из «+а» в «-а»	140	2	42	4,2	из «+а» в «-а»	10080	0,2	840	60
из «+а» в «-1»	120	10	36	3	из «+а» в «-1»	8640	1	720	60
из «+а» в «0»	70	30	21	2,5	из «+а» в «0»	5040	3	420	60
из «+а» в «+1»	20	50	6	2	из «+а» в «+1»	1440	5	120	60

Оптимизацию планов многофакторного эксперимента осуществляли с

использованием следующих критериев:

1) суммарная стоимость проведения эксперимента:

$$S_{общ} = \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^k S_{ij} \rightarrow \min,$$

где  $n$  – количество опытов;

$k$  – количество факторов;

$S_{ij}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в  $j$ -м опыте;

2) суммарное время проведения эксперимента:

$$t_{общ} = \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^k t_{ij} \rightarrow \min,$$

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

С помощью программного обеспечения, реализующего метод прыгающих лягушек, оптимизируем исходный план проведения эксперимента по критерию минимальной стоимости проведения эксперимента. В результате был получен оптимальный план эксперимента. Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет  $S_{опт,1} = 539,5$  усл. ед., а время –  $t_{опт,1} = 10420$  с. Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет  $V_{S1} = 5,6$  по сравнению с исходным планом, а во времени –  $V_{t1} = 9,36$ . Аналогично проведем оптимизацию исходного плана методом прыгающих лягушек по критерию минимального времени реализации эксперимента.

Время реализации эксперимента по этому плану составляет  $t_{опт,2} = 7690$  с, а стоимость  $S_{опт,2} = 732,5$  усл. ед. Таким образом, выигрыши во времени реализации эксперимента составляет  $V_{t2} = 12,69$  по сравнению с исходным планом, а в стоимости  $V_{S2} = 4,13$ .

Полученные планы проведения экспериментов ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходный и оптимальный планы ОЦКП

Исходный план					Оптимальный план 1 (метод прыгающих лягушек)					Оптимальный план 2 (метод прыгающих лягушек)				
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	23	0	0	0	-α
2	+1	-1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1	13	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1	14	+1	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	-1	10	+1	-1	-1	+1	16	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	14	+1	-1	+1	+1	12	+1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1	15	-1	+1	+1	+1
7	-1	+1	+1	-1	9	-1	-1	-1	+1	11	-1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	11	-1	+1	-1	+1	9	-1	-1	-1	+1
9	-1	-1	-1	+1	12	+1	+1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	22	0	0	+α	0	22	0	0	+α	0

Исходный план					Оптимальный план 1 (метод прыгающих лягушек)					Оптимальный план 2 (метод прыгающих лягушек)				
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>
11	-1	+1	-1	+1	19	0	-α	0	0	19	0	-α	0	0
12	+1	+1	-1	+1	20	0	+α	0	0	20	0	+α	0	0
13	-1	-1	+1	+1	17	-α	0	0	0	18	+α	0	0	0
14	+1	-1	+1	+1	25	0	0	0	0	25	0	0	0	0
15	-1	+1	+1	+1	21	0	0	-α	0	21	0	0	-α	0
16	+1	+1	+1	+1	18	+α	0	0	0	17	-α	0	0	0
17	-α	0	0	0	7	-1	+1	+1	-1	5	-1	-1	+1	-1
18	+α	0	0	0	8	+1	+1	+1	-1	6	+1	-1	+1	-1
19	0	-α	0	0	2	+1	-1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
20	0	+α	0	0	6	+1	-1	+1	-1	4	+1	+1	-1	-1
21	0	0	-α	0	5	-1	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1	-1
22	0	0	+α	0	1	-1	-1	-1	-1	3	-1	+1	-1	-1
23	0	0	0	-α	3	-1	+1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
24	0	0	0	+α	4	+1	+1	-1	-1	2	+1	-1	-1	-1
25	0	0	0	0	23	0	0	0	-α	24	0	0	0	+α

Сравнение результатов, полученных методами прыгающих лягушек, роя частиц, табу-поиска, ветвей и границ и последовательного приближения, приведено в табл. 3. Таким образом, метод прыгающих лягушек позволяет получить выигрыши, близкие к значениям при использовании следующих методов: роя частиц, ветвей и границ, табу-поиска [5 – 7]. Кроме того, он обладает высокими показателями быстродействия. Требуемый объем памяти для работы программы, реализующей метод прыгающих лягушек, составляет 26 Мб. Объем памяти ЭВМ, необходимый для работы программы, реализующей метод роя частиц, — 47 Мб, метод ветвей и границ – 147 Мб, метод табу-поиска – 38 Мб, а последовательного приближения – 10 Мб. Таким образом, метод прыгающих лягушек требует небольшого объема памяти ЭВМ и имеет высокое быстродействие решения задачи. Как видно из табл. 3, метод прыгающих лягушек позволяет получать большие или близкие к выигрышам, получаемым при использовании метода роя частиц в стоимости и времени реализации эксперимента.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов оптимизации планов ОЦКП

Выигрыши	Метод прыгающих лягушек		Метод роя частиц		Метод табу-поиска		Метод ветвей и границ		Метод последовательного приближения	
	B <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>t</sub>
По стоимости реализации эксперимента	5,6	9,36	5,92	8,25	5,49	7,33	5,47	7,33	5,47	7,24
По времени реализации эксперимента	4,13	12,69	4,33	13,5	4,14	12,63	3,54	12,58	3,54	12,34

В табл. 4 приведен сравнительный анализ результатов оптимизации по времени счета разработанного программного обеспечения.

Таблица 4

Сравнительный анализ результатов оптимизации по времени счета разработанных программ

Метод	Метод прыгающих лягушек	Метод роя частиц	Метод табу-поиска	Метод ветвей и границ	Метод последовательного приближения
Время счета, с	0,001	0,42	0,3	0,01	0,05

В работе [10] с применением методов планирования экспериментов выполнена оптимизация планов обслуживания комплекса технических систем, которые представляют собой распределенные ЭВМ, а также режима работы оператора по обслуживанию этого комплекса. 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.

Временные изменения значений уровней факторов приведены в табл. 5. Исходный план ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП), в соответствии с которым проводили исследование, дан в табл. 6.

Таблица 5

Временные изменения значений уровней факторов

Временные изменения значений уровней факторов, ч	Обозначение факторов			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
из «-а» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «-а» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «-а» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «-а» в «+а»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «-1» в «-а»	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 «+а»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «0» в «-а»	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 «+а»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+1» в «-а»	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 «+а»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+а» в «-а»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «+а» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «+а» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «+а» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0

Таблица 6

## Исходный и оптимальный планы РЦКП

Исходный план					Оптимальный план (метод прыгающих лягушек)					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	15	-1	+1	+1	+1	9	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	16	+1	+1	+1	+1	11	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	10	+1	-1	-1	+1	23	0	0	0	-α
5	-1	-1	+1	-1	14	+1	-1	+1	+1	18	+α	0	0	0
6	+1	-1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1	22	0	0	+α	0
7	-1	+1	+1	-1	13	-1	-1	+1	+1	25	0	0	0	0
8	+1	+1	+1	-1	9	-1	-1	-1	+1	14	+1	-1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	1	-1	-1	-1	-1	10	+1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	11	-1	+1	-1	+1	12	+1	+1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1	7	-1	+1	+1	-1	2	+1	-1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	3	-1	+1	-1	-1	4	+1	+1	-1	-1
13	-1	-1	+1	+1	12	+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	5	-1	-1	+1	-1	20	0	+α	0	0
18	+α	0	0	0	23	0	0	0	-α	17	-α	0	0	0
19	0	-α	0	0	21	0	0	-α	0	16	+1	+1	+1	+1
20	0	+α	0	0	22	0	0	+α	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	19	0	-α	0	0	5	-1	-1	+1	-1
23	0	0	0	-α	18	+α	0	0	0	7	-1	+1	+1	-1
24	0	0	0	+α	17	-α	0	0	0	3	-1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	25	0	0	0	0	26	0	0	0	0
26	0	0	0	0	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	24	0	0	0	+α

Проведем оптимизацию начального плана РЦКП по критерию суммарного времени реализации эксперимента. Временные затраты на реализацию экспериментов составляют 3604 минуты для начального плана; 2052 минуты для оптимального плана, полученного методом прыгающих лягушек.

В табл. 6 также отображены оптимальные планы, полученные методами прыгающих лягушек и роя частиц. При этом имеем выигрыш во временных затратах на реализацию эксперимента в 1,76 раза по сравнению с начальным



планом эксперимента, в то время как при использовании метода роя частиц выигрыш составлял 1,81 раза [5], метода ветвей и границ — 1,5 раза [7], а метода табу-поиска — 1,69 [6].

В табл. 7 приведен сравнительный анализ результатов оптимизации плана РЦКП, а в табл. 8 — сравнительный анализ по времени счета разработанного программного обеспечения по оптимизации плана РЦКП.

Таблица 7

Сравнительный анализ результатов оптимизации плана РЦКП

Выигрыши	Метод прыгающих лягушек	Метод роя частиц	Метод табу-поиска	Метод ветвей и границ	Метод последовательного приближения
	$V_t$	$V_t$	$V_t$	$V_t$	$V_t$
По времени реализации эксперимента	1,76	1,81	1,69	1,5	1,59

Таблица 8

Сравнительный анализ результатов оптимизации плана РЦКП по времени счета

Метод	Метод прыгающих лягушек	Метод роя частиц	Метод табу-поиска	Метод ветвей и границ	Метод последовательного приближения
Время счета, с	0,001	0,42	0,25	0,03	0,05

### Выводы

Разработаны метод и программное обеспечение, реализующие оптимизацию композиционных планов второго порядка с применением метода прыгающих лягушек. Доказаны его 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 плана, полученного этим методом, дает большие выигрыши по стоимостным (временным) затратам, чем при использовании методов табу-поиска, ветвей и границ, последовательного приближения, а также реализуется за меньшее время счёта, чем при методе роя частиц. Показано, что для оптимизации планов ОЦКП и РЦКП целесообразно использование метода прыгающих лягушек.

### Список литературы

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Koshevoy, N. D. Optimum planning of an experiment in manufacturing the electronic equipment / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroklyn // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – Vol.70. – №8. – p. 731-734. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V70.i8.60.
3. Koshevoy, N. D. Optimization for the design of technological processes / N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko, Ye. A. Sukhobrus // Telecommunications and

Radio Engineering. – 2014. – Vol.73. – №15. – p. 1383-1386. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V73.i15.60.

4. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие / А. П. Карпенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.

5. Кошевой, Н.Д. Применение алгоритма оптимизации роением частиц для минимизации стоимости проведения многофакторного эксперимента / Н. Д. Кошевой, А. А. Беляева // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2018. – №1. – С. 41 – 49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.

6. Кошевой, Н. Д. Сравнительный анализ методов оптимизации при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко, А. А. Беляева // Радиоэлектроника, информатика та управління. – 2018. – №4. – С. 179-188. DOI:10.15588/1607-3274-2018-4-17.

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

8. Кошовий, М. Д. Застосування алгоритму мавпячого пошуку для оптимізації планів повного факторного експерименту / М. Д. Кошовий, В.В. Муратов // Збірник наукових праць Військового інституту Київського Національного університету імені Тараса Шевченка. – 2018. – №61. – С. 61-70.

9. Кошевой, Н. Д. Применение алгоритма прыгающих лягушек для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента / Н. Д. Кошевой, В. В. Муратов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2018. – №4. – С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2018.4.05>.

10. Кошевой, Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента: монография / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава : издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317 с.

## References

1. Adler, Ju. P. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij / Ju. P. Adler, E. V. Markova, Ju. V. Granovskij.– М.: Nauka, 1976. – 280 s.

2. Koshevoy, N. D. Optimum planning of an experiment in manufacturing the electronic equipment / N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroklyn // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – Vol.70. – №8. – p. 731-734. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V70.i8.60.

3. Koshevoy, N. D. Optimization for the design of technological processes / N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko, Ye. A. Sukhobrus // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol.73. – №15. – p. 1383-1386. DOI: 10.1615 / TelecomRadEng. V73.i15.60.

4. Karpenko, A. P. Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj: ucheb. posobie / A. P. Karpenko. – М.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2014. – 446 s.

5. Koshevoj, N. D. Primenenie algoritma optimizacii roem chastic dlja minimizacii stoimosti provedenija mnogofaktornogo jeksperimenta / N. D. Koshevoj, A. A. Beljaeva // Radiojelektronika, informatika, upravlenie. – 2018. – №1. – S. 41 – 49. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-5.

6. Koshevoj, N. D. Sravnitel'nyj analiz metodov optimizacii pri issledovanii vesoizmeritel'noj sistemy i termoreguljatora / N. D. Koshevoj, E. M. Kostenko, A. A. Beljaeva // Radioelektronika, informatika ta upravlinnja. – 2018. – №4. – S. 179-188. DOI:10.15588/1607-3274-2018-4-17.

7. Koshevoj, N. D. Primenenie metodov vetvej i granic i posledovatel'nogo priblizhenija dlja optimizacii modelirovanija processa poluchenija poristyh materialov / N. D. Koshevoj, A. S. Chujko, E. M. Kostenko // Optimizacija virobnichih procesiv : zb. nauk. pr. Sevastopol's'kogo nac. tehn. un-tu. – 2011. – Vyp. 13.– S. 69-74.

8. Koshovy`j, M. D. Zastosuvannya algory`tmu mavpyachogo poshuku dlya opty`mizaciyi planiv povnogo faktornogo ekspery`mentu / M. D. Koshovy`j, V. V. Muratov // Zbirny`k naukovy`x pracz` Vijs`kovogo insty`tutu Ky`yivs`kogo Nacional`nogo universy`tetu imeni Tarasa Shevchenka. – 2018. – #61. – S. 61-70.

9. Koshevoj, N. D. Primenenie algoritma prygajushhijh ljagushek dlja optimizacii po stoimostnym (vremennym) zatratam planov polnogo faktornogo jeksperimenta / N. D. Koshevoj, V. V. Muratov // Radioelektronni i komp'juterni sistemi. – 2018. – №4. – S. 53-61. DOI:<https://doi.org/10.32620/reks.2018.4.05>.

10. Koshevoj, N. D. Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie jeksperimenta: monografija / N. D. Koshevoj, E. M. Kostenko. – Poltava: izdatel' Shevchenko R. V., 2013. – 317 s.

Поступила в редакцию 05.12.2019, рассмотрена на редколлегии 06.12.2019

## **Оптимізація композиційних планів експерименту методом стрибаючих жаб**

Композиційні плани другого порядку використовують при побудові квадратичних математичних моделей досліджуваних об'єктів і систем. До них відносяться плани ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП) та ротатабельного центрального композиційного планування (РЦКП). В якості критеріїв оптимізації цих планів вибрані: вартість реалізації плану експерименту, час його виконання.

Розроблено метод і програмне забезпечення для оптимізації за вартістю та часовими витратами композиційних планів другого порядку з використанням методу стрибаючих жаб. Програмне забезпечення реалізовано на мові C<sup>++</sup>. Усі необхідні розрахунки використовувалися на комп'ютері з процесором Intel Pentium G620 з частотою 2.60 GHz. Необхідний обсяг пам'яті – 26 Мб. Кількість факторів і вартість переходів рівнів факторів вводяться із клавіатури або задаються у файлі.

Реалізація методу стрибаючих жаб потребує невеликого обсягу пам'яті ОВМ і має високу швидкодію рішення задачі.

Проведено аналіз відомих методів синтезу оптимальних за вартісними і часовими витратами композиційних планів другого порядку і показано його ефективність порівняно з такими методами: рою частинок, табу-пошуку, гілок і меж, послідовного наближення. За допомогою розроблених методу та програмного забезпечення для оптимізації композиційних планів другого порядку з використанням алгоритму стрибаючих жаб можна досягти високих вигравів порівняно з початковим планом експерименту, оптимальних або близьких до оптимальних результатів порівняно з методами рою частинок, табу-пошуку, гілок і меж, послідовного наближення, а також високої швидкодії

вирішення задачі оптимізації порівняно з розробленими раніше методами оптимізації композиційних планів експерименту. Працездатність розробленого методу перевірено при дослідженні процесу термічної обробки пористого матеріалу, а також режимів обслуговування комплексу технічних систем.

Показано, що для оптимізації планів ОЦКП і РЦКП доцільно використовувати метод стрибаючих жаб. Подальші роботи будуть направлені на застосування цього методу для дослідження різноманітних технічних систем.

**Ключові слова:** оптимальний план, метод стрибаючих жаб, оптимізація, планування експерименту, вартість, час, виграш.

## **Optimization of compositional experimental plans of the jumping frogs method**

The second order composition plans are using for the construction of quadratic mathematical models of the probed objects and systems. The plans of the ortogonal central composition planning (OCKP) and rotatable central composition planning (RCKP) behave to them. As criteria of optimization of these plans, cost of experiment plan realization, its time of leading through have been chosen.

The method and software for optimization in the cost and temporal expenses of second order composition plans with the use of spring-elastic frogs algorithm were developed. Software is realized in S++ language. All necessary calculations were executed on a computer with the processor of Intel Pentium G620 with frequency 2.60 Ghz. A necessary volume of memory is 26 Mb. Amount of factors and cost of factors levels transitions were entered with a keyboard, or set in a file.

Realization of spring-elastic frogs method requires the small volume of computer memory and has a high fast-acting decision of task.

The analysis of the known methods of synthesis of optimum on cost and temporal expenses composition the second order plans is conducted and its efficiency is rotined in comparison with the followings methods: swarm of particles, taboo-search, branches and scopes, progressive approximation. By developed method and software for optimization of composition the second order plans with the use of spring-elastic frogs' algorithm it is possible to attain the high winnings as compared to the initial plan of experiment, optimum or near to optimum results by comparison to the methods of swarm of particles, taboo-search, branches and scopes, progressive approximation, and also high fast-acting of decision of task of optimization as compared to the methods of optimization developed before. The capacity of the developed method is tested at research of process of porous material heat treatment, and also modes of maintenance of the technical systems complex.

It is proved that for optimization plans of OCKP and RCKP the use of spring-elastic frogs method is expedient. In future the results will be used for application of this method at research of the various technical systems.

**Keywords:** optimal plan, jumping frogs method, optimization, experiment planning, cost, time, gain.

### **Сведения об авторах:**

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

«Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, эл. почта: ndkoshevoy@rambler.ru, тел. 057-788-43-03, ORCID ID: 0000-0001-9465-4467.

**Костенко Елена Михайловна** – д-р техн. наук, профессор, Полтавская государственная аграрная академия, Полтава, Украина, эл. почта: kostenko@pdaa.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5997-342X.

**Муратов Виктор Владимирович** – аспирант кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, +38(093)-204-83-67, эл. почта: vmuratov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7684-5649.

#### **About the Authors:**

**Koshevoy Nikolay Dmitrievich** – Dr. Tech. Sciences, Professor, Head of the Department of Intelligent Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky «Kharkiv aviation institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: ndkoshevoy@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0001-9465-4467.

**Kostenko Elena Mihailovna** – Dr. Tech. Sciences, Professor, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine, e-mail: kostenko@pdaa.edu.ua. ORCID ID: 0000-0001-5997-342X.

**Muratov Viktor Vladimirovich** – Postgraduate student of the Department of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "Kharkiv aviation institute", Kharkiv, Ukraine, +38(093)-204-83-67, e-mail: vmuratov77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7684-5649.