

УДК 621.454.3-66:519.242

doi: 10.32620/akt.2020.2.07

Н. Д. КОШЕВОЙ¹, А. Л. КИРИЧЕНКО², С. А. БОРИСЕНКО², В. В. МУРАТОВ¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина*² *ГП «НПО «ПХЗ», Павлоград, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА РАБОЧЕЙ СМЕСИ ПОРОШКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО СМЕСЕВОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА**

При исследовании влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики твердого смесового ракетного топлива (ТСРТ) предложена оптимизация с применением метода прыгающих лягушек для построения оптимальных по времени планов эксперимента. Известно, что доля продукта фракционного агента (ФА) в составе ТСРТ является наибольшей и составляет до 80 %. Следовательно, продукт ФА оказывает одно из наибольших влияний на весь спектр физико-химических свойств ТСРТ. Таким образом, задача определения влияния продукта ФА на свойства ТСРТ является весьма актуальной. Применение методов планирования эксперимента позволяет сократить временные и стоимостные затраты при исследовании различных технологических процессов, приборов и систем. Минимизация количества переходов уровней факторов в плане эксперимента, в свою очередь, приводит к уменьшению времени (стоимости) его реализации. Цель работы – оптимизация по временным затратам планов полного факторного эксперимента методом прыгающих лягушек. Для этого предложен метод построения оптимальной по времени реализации матрицы планирования эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек. В методе прыгающих лягушек выполняется определение успешной лягушки по наименьшему времени переходов между уровнями для каждого из факторов. После этого выполняются перестановки лягушек. Лягушка стремится к наиболее успешной и при условии нахождения поблизости, остается в текущем местоположении. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, которое использовано для проведения вычислительных экспериментов по изучению свойств этого метода при исследовании влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики твердого смесового ракетного топлива. Получены оптимальные по времени реализации планы эксперимента, а также приведены выигрыши в результатах оптимизации по сравнению с исходным временем проведения эксперимента. Проведен полный факторный эксперимент по изучению влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики ТСРТ, на основании которого выданы рекомендации относительно влияния фракционного состава рабочей смеси порошков и содержания жидко-вязких компонентов в композиции на свойства ТСРТ. Также построены математические модели, коэффициенты которых характеризуют влияние содержания жидко-вязких компонентов в композиции на свойства ТСРТ. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и реализующего его программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать его для применения на практике при построении оптимальных матриц планирования эксперимента.

Ключевые слова: оптимизация; планирование эксперимента; твердое смесовое ракетное топливо; рабочая смесь порошков; оптимальный план; метод прыгающих лягушек; время.

Номенклатура

k – количество факторов объекта, введенных в исследование;

t – время работы программы, с;

V – выигрыш;

n – количество опытов в матрице планирования эксперимента и матрице времен переходов между уровнями факторов;

$t_{\text{мин}}$ – минимальное время проведения эксперимента, час;

$t_{\text{исх}}$ – исходное время выполнения эксперимента, час;

$t_{\text{опт}}$ – время реализации оптимальной матрицы пла-

нирования эксперимента, час;

$t_{\text{общ}}$ – общее время проведения эксперимента, час;

t_{ij} – время перехода от i -го опыта к j -му, час;

X_i – значение i -го фактора исследуемого процесса;

b_j – коэффициенты математической модели.

Введение

Практические опыты проведены в рамках работ по определению влияния фракционного состава рабочей смеси порошков (РСП) и содержания жидко-вязких компонентов (ЖВК) в композиции на свойства твердого смесового ракетного топлива (ТСРТ),

на основании результатов экспериментальных исследований, выполненных в опытно-исследовательской лаборатории по изготовлению твердотопливных композиций. Полученные экспериментальные результаты были использованы для отработки рецептур и технологии изготовления ТСРТ.

Экспериментальные методы исследования широко применяют для оптимизации производственных процессов [3–5]. 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 получать модели целесообразно при минимальных временных и стоимостных затратах. Особенно это важно при исследовании длительных и дорогостоящих процессов. Задача оптимизации планов по времени (стоимости) реализации эксперимента является NP-полной, т.е. для своего решения требует затрат 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.

Постановка задачи

Известны методы, основанные на определении содержания жидко-вязких компонентов, влиянии продуктов на физико-химические свойства ТСРТ [7]. В известных источниках [8] в явном виде не приведены математические модели влияния фракционного состава РСП на характеристики ТСРТ. Для оптимизации влияния фракционного состава РСП на характеристики ТСРТ целесообразно использовать методы планирования эксперимента [9], которые позволяют определить математические модели и проверить эффективность реализации серии лабораторных опытов. Также, задачами работы является минимизация времени при определении влияния фракционного состава на характеристики ТСРТ, отработка рецептур и технологии изготовления ТСРТ.

Наиболее важной составной частью научных исследований являются эксперименты. Это один из основных способов получить новые научные знания. 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 слу-

чайных возмущений [5 – 7]. 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.

При осуществлении перестановок в матрице планирования эксперимента, время проведения эксперимента находится по следующей формуле:

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

Необходимо найти оптимальный или близкий к оптимальному план эксперимента, для которого суммарное время проведения эксперимента является минимальным или приближенным к минимальному. С увеличением числа факторов k количество преобразований значительно возрастает. В связи с этим необходимо находить решения с помощью приближенных алгоритмов, например, таких, как алгоритм прыгающих лягушек [12]. При этом задан исходный план эксперимента и матрица времен переходов уровней факторов.

Анализ исследований и публикаций

В данной работе реализуется разработка метода и программного обеспечения для оптимизации по временным затратам планов полного факторного эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек, а также минимизация времени при определении влияния фракционного состава на характеристики ТСРТ, отработка рецептур и технологии изготовления ТСРТ [7]. Известны комбинаторные методы оптимизации [3 – 6], но они не применяются для построения оптимальных по временным и стоимостным затратам планов многофакторных экспериментов [1, 2]. Известны также примеры построения многофакторных планов экспериментов, основанных на использовании следующих методов оптимизации: анализ перестановок [11]; метод последовательного приближения [11]; метод ветвей и границ [11]; случайный поиск (перестановка строк матрицы планирования) [11]; симплекс-метод; муравьиный алгоритм; генетический алгоритм [12]; метод отжига; жадный алгоритм; рой частиц; прыгающих лягушек [13]; обезьяний поиск [14]. Эффективность использования этих методов показана при исследовании различных технологических процессов, приборов и систем. Указанные методы имеют

как преимущества, так и недостатки. Например, при большом количестве факторов для полного перебора всех строк матрицы планирования эксперимента нужна значительная длительность времени, а другие методы позволяют получать оптимальный план эксперимента для ограниченного числа факторов k . При большом количестве факторов результаты оптимизации лишь приближаются к оптимальному плану эксперимента [15, 16]. Поэтому, целесообразно для сравнения результатов оптимизации применить разработанный метод прыгающих лягушек.

Основные результаты исследований

Известно, что доля продукта фракционного агента (ФА) в составе твердого смесового ракетного топлива (ТСРТ) является наибольшей и составляет до 80 %. Следовательно, продукт ФА оказывает одно из наибольших влияний на весь спектр физико-химических свойств ТСРТ. Таким образом, задача определения влияния продукта ФА на свойства ТСРТ является весьма актуальной. На основе каучука, суммарное содержание ЖВК от 19 до 23 %, с тремя вариантами РСП продукта ФА-3 и продукта ФА-6 (соотношение ФА-3/ФА-6 – 60/40; 50/50 и 40/60) в лабораторных условиях изготовлены и исследованы 24 образца твердотопливных композиций.

Разработаны метод и программное обеспечение оптимизации планов полного факторного эксперимента по стоимостным (временным) затратам с использованием алгоритма прыгающих лягушек.

Сущность применения метода прыгающих лягушек заключается в следующем:

Шаг 1. В начале работы алгоритма вводится количество факторов k .

Шаг 2. Осуществляется ввод времени переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 3. В зависимости от выбранного количества факторов строится матрица планирования эксперимента.

Шаг 4. Вычисление начального времени выполнения эксперимента.

Шаг 5. Генерация матрицы времен переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 6. Сортировка индексов и генерация массива индексов для времен переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 7. Перестановки в столбцах в соответствии с массивом индексов для времен переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 8. Выполнение перебора между всеми блоками столбцов (мемплексов, в которых перемещается лягушка).

Шаг 9. Определение начальной точки для дальнейшего перебора, исходя из наименьшей суммы времен переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 10. Выполнение поиска в рамках блока столбца, в котором находится лягушка по минимальному значению суммы времен переходов между уровнями для каждого из факторов.

Шаг 11. Переход на следующую строку матрицы планирования и сравнение с предыдущей. Осуществляется поиск в блоке столбца с наименьшим значением суммы переходов между уровнями и установление соответствующего блока (перестановка местами в матрице планирования эксперимента).

Шаг 12. Построение оптимальной матрицы планирования эксперимента.

Шаг 13. Расчет общего времени реализации эксперимента.

Шаг 14. Расчет величины выигрыша B как отношения исходного времени выполнения эксперимента $t_{исх}$ к времени реализации оптимальной матрицы планирования эксперимента $t_{опт}$

$$B = \frac{t_{исх}}{t_{опт}}$$

Шаг 15. Расчет времени t , затраченного на оптимизацию плана полного факторного эксперимента с использованием алгоритма прыгающих лягушек.

Программное обеспечение реализовано на языке программирования C++. Все необходимые просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2,60 GHz. Необходимый объем памяти – 37 МБ. Количество факторов и времена переходов вводятся с клавиатуры. Таким образом, реализация метода прыгающих лягушек требует небольшого объема памяти ЭВМ и имеет высокое быстродействие решения задачи. В структуру программного обеспечения входят следующие модули: ввода данных, построения матрицы планирования эксперимента, построения матрицы сумм времен изменения значений уровней факторов, оптимизации методом прыгающих лягушек, построения оптимальной матрицы планирования эксперимента, расчета выигрыша.

Для оптимизации технологического процесса предложено применение метода прыгающих лягушек при построении оптимальных по времени планов эксперимента с целью исследования влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики твердого смесового ракетного топлива. Выполнена оптимизация планов эксперимента с привлечением этого метода. Проведен полный факторный эксперимент по изучению влияния фракционного состава РСП на характеристики ТСРТ, на основании которого выданы рекомендации относительно влияния фракционного состава

рабочей смеси порошков и содержания жидко-вязких компонентов в композиции на свойства ТСРТ. Построены математические модели, коэффициенты которых характеризуют влияние содержания жидко-вязких компонентов в композиции на свойства ТСРТ.

Эксперименты

В качестве критериев оптимизации рассматривались следующие: вязкость, растекаемость, живучесть, напряжение при растяжении, относительная деформация, модуль упругости, параметр «С».

Определим факторы, с помощью которых можно воздействовать на оптимизируемый объект. Выбор факторов является очень ответственным этапом при подготовке к планированию эксперимента, от их удачного выбора зависит успех оптимизации. Факторами, влияющими на физико-механические свойства ТСРТ, были выбраны: X_1 – содержание компонента ЖВК; X_2 – содержание компонента ФА-3; X_3 – содержание компонента ФА-6.

Полиномиальная модель исследуемого процесса, которую будем использовать на первом этапе планирования эксперимента, неполная квадратичная функция:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3,$$

где $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – неизвестные коэффициенты математической модели.

Первый этап планирования эксперимента для получения математической модели основан на варьировании факторов на двух уровнях: «+1» – верхний предел диапазона содержания компонентов; «-1» – нижний предел диапазона содержания компонентов. Для содержания компонента ЖВК: $X_{1н}=19\%$, $X_{1в}=23\%$; для содержания компонента ФА-3: $X_{2н}=45\%$, $X_{2в}=50\%$; для содержания компонента ФА-6: $X_{3н}=30\%$, $X_{3в}=33\%$.

Матрица планирования начального эксперимента приведена в табл. 1. Времена изменения значений уровней факторов при исследовании характеристик ТСРТ приведены в табл. 2. Оптимальные планы эксперимента и результаты исследования приведены в табл. 3.

Критерии оптимизации технологического процесса следующие: Y_1 – вязкость, ПА/с; Y_2 – растекаемость; Y_3 – живучесть, час; Y_4 – напряжение при растяжении, кгс/см²; Y_5 – относительная деформация, %; Y_6 – модуль упругости, кгс/см²; Y_7 – параметр «С», мм/с. По результатам эксперимента найдем значения неизвестных коэффициентов модели и оптимальные соотношения компонентов.

Таблица 1

Матрица планирования начального эксперимента

Начальный план			
Номер опыта	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Оценки коэффициентов математической модели вычислим по формуле

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}y_i}{N},$$

где N – число опытов, j – номер фактора.

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов на критерии оптимизации. Коэффициенты математических моделей и оптимальное соотношение компонентов приведены в табл. 4.

Результаты

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность метода, основанного на использовании алгоритма прыгающих лягушек [13].

Для времен изменения уровней факторов при исследовании вязкости ТСРТ, представленных в табл. 2, получены результаты оптимизации, отраженные в табл. 3. При этом исходное время проведения эксперимента равняется 47,75 часа. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимента, полученные в результате оптимизации при использовании метода прыгающих лягушек, приведены в табл. 5.

При исследовании растекаемости ТСРТ времена изменения уровней факторов представлены в табл. 2, а полученные результаты оптимизации отражены в табл. 3. Исходное время проведения эксперимента составляет 25,5 часов. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимента, полученные в результате оптимизации по методу прыгающих лягушек, приведены в табл. 5.

Времена изменения уровней факторов при исследовании живучести ТСРТ представлены в табл. 2, результаты оптимизации отражены в табл. 3. Исходное время проведения эксперимента составляет 63,75 часа. Выигрыш и время реализации опти-

мального плана експеримента, отримані в результаті оптимізації методом прыгаючих лягушек, представлені в табл. 5.

Для изучения свойств напряжения при растяжении ТСРТ времена изменения уровней факторов представлены в табл. 2, а полученные результаты оптимізації отражены в табл. 3. При этом исходное время проведения эксперимента составило 16 часов. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимента, полученные в результате оптимізації, при использовании метода прыгаючих лягушек, представлены в табл. 5.

При исследовании относительной деформации ТСРТ времена изменения уровней факторов представлены в табл. 2, а полученные результаты оптимізації отражены в табл. 3. Исходное время проведения эксперимента составило 9 часов. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимен-

та, полученные в результате оптимізації, представлены в табл. 5.

Для времен изменения уровней факторов при исследовании модуля упругости ТСРТ, представленных в табл. 2, получены результаты оптимізації, отраженные в табл. 3. При этом исходное время проведения эксперимента составило 18 часов. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимента, полученные в результате оптимізації методом прыгаючих лягушек, приведены в табл. 5.

Времена изменения уровней факторов при исследовании параметра «С» ТСРТ представлены в табл. 2, а полученные результаты оптимізації отражены в табл. 3. При этом исходное время проведения эксперимента равняется 27 часов. Выигрыш и время реализации оптимального плана эксперимента, полученные в результате оптимізації методом прыгаючих лягушек, приведены в табл. 5.

Таблица 2

Время изменения значений уровней факторов при исследовании характеристик ТСРТ

Время изменения значений уровней факторов, час	Обозначение факторов								
	Вязкость			Растекаемость			Живучесть		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
из «-1» в «+1»	20	12	6,25	4,0	6,0	5,0	10,0	13,0	12,0
из «+1» в «-1»	15	5	9,5	5,0	7,0	8,0	12,0	14,0	15,0

Время изменения значений уровней факторов, час	Обозначение факторов											
	Напряжение при растяжении			Относительная деформация			Модуль упругости			Параметр «С»		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
из «-1» в «+1»	7,0	9,0	8,0	2,5	2,0	1,5	5,0	4,0	3,0	7,5	6,0	4,5
из «+1» в «-1»	8,0	10,0	11,0	3,0	2,5	2,0	6,0	5,0	4,0	9,0	7,5	6,0

Таблица 3

Оптимальные планы эксперимента и результаты исследования

Номер опыта	Вязкость				Y ₁	Номер опыта	Растекаемость				Y ₂	Номер опыта	Живучесть				Y ₃
	Обозначение факторов						Обозначение факторов						Обозначение факторов				
	X ₁	X ₂	X ₃				X ₁	X ₂	X ₃				X ₁	X ₂	X ₃		
1	+1	-1	-1	5198	1	+1	+1	+1	1,6	1	+1	-1	-1	10			
2	+1	-1	+1	9576	2	-1	-1	-1	0,8	2	-1	+1	-1	4			
3	+1	+1	+1	10214	3	+1	+1	-1	0,77	3	+1	+1	-1	6			
4	+1	+1	-1	8938	4	-1	-1	+1	1,37	4	-1	-1	+1	10			
5	-1	+1	-1	7022	5	+1	-1	-1	1,45	5	+1	-1	+1	8			
6	-1	+1	+1	7022	6	-1	+1	+1	0,12	6	-1	+1	+1	6			
7	-1	-1	+1	11856	7	+1	-1	+1	1,07	7	-1	-1	-1	10			
8	-1	-1	-1	12251	8	-1	+1	-1	0,87	8	+1	+1	+1	10			

Продолжение табл. 3

Напряжение при растяжении				Относительная деформация					
Номер опыта	Обозначение факторов			Y ₄	Номер опыта	Обозначение факторов			Y ₅
	X ₁	X ₂	X ₃			X ₁	X ₂	X ₃	
1	-1	-1	-1	17,9	1	-1	-1	-1	69,1
2	-1	-1	+1	13,2	2	-1	-1	+1	44,1
3	-1	+1	-1	10,5	3	-1	+1	+1	36
4	-1	+1	+1	14,8	4	-1	+1	-1	56
5	+1	-1	-1	14,8	5	+1	+1	-1	48,1
6	+1	-1	+1	14,26	6	+1	+1	+1	35,1
7	+1	+1	-1	14,3	7	+1	-1	+1	57,8
8	+1	+1	+1	14,3	8	+1	-1	-1	38,2

Модуль упругости				Параметр «С»					
Номер опыта	Обозначение факторов			Y ₆	Номер опыта	Обозначение факторов			Y ₇
	X ₁	X ₂	X ₃			X ₁	X ₂	X ₃	
1	+1	-1	-1	47	1	-1	-1	-1	8,52
2	+1	-1	+1	53,8	2	-1	-1	+1	10,49
3	+1	+1	+1	55,8	3	-1	+1	+1	10,11
4	+1	+1	-1	59	4	-1	+1	-1	9,27
5	-1	+1	-1	75	5	+1	+1	-1	8,73
6	-1	+1	+1	97	6	+1	+1	+1	9,13
7	-1	-1	+1	35,9	7	+1	-1	+1	9,57
8	-1	-1	-1	94	8	+1	-1	-1	8,92

Таблица 4

Математические модели, оптимальное соотношение компонентов ТСРТ

Критерий оптимизации	Коэффициенты математической модели	Оптимальные соотношения компонентов
ФА-3/ФА-6 = 60/40		
Вязкость	$b_0 = 9009,625; b_1 = 437,125;$ $b_2 = 1805,125; b_3 = 528,125;$ $b_{12} = -657,375;$ $b_{13} = -338,375;$ $b_{23} = 710,625; b_{123} = 756,125.$	ЖВК = 19,57 % ФА-3 = 46,14 % ФА-6 = 33,29 %
Растекаемость	$b_0 = 1,2525; b_1 = -0,055;$ $b_2 = -0,17; b_3 = -0,0775;$ $b_{12} = 0,0875; b_{13} = -0,005;$ $b_{23} = -0,06; b_{123} = -0,1425.$	
Живучесть	$b_0 = 11,25; b_1 = -0,25;$ $b_2 = -0,25; b_3 = 0,75;$ $b_{12} = 0,25; b_{13} = 0,25;$ $b_{23} = 0,25; b_{123} = -0,25.$	
Напряжение	$b_0 = 11,685; b_1 = -0,085;$ $b_2 = -0,705; b_3 = -0,145;$ $b_{12} = 1,355; b_{13} = -0,705;$ $b_{23} = -0,735; b_{123} = -0,565.$	
Относительная деформация	$b_0 = 48,75; b_1 = -1,55;$ $b_2 = -4,85; b_3 = -1,1;$ $b_{12} = 9,4; b_{13} = -2,6;$ $b_{23} = -1,05; b_{123} = -6,5.$	
Модуль упругости	$b_0 = 57,6625; b_1 = 3,0125;$ $b_2 = 2,5125; b_3 = 4,2625;$ $b_{12} = -1,0375; b_{13} = -2,5875;$ $b_{23} = -2,2875; b_{123} = 3,7625.$	

Продолжение табл. 4

Критерий оптимизации	Коэффициенты математической модели	Оптимальные соотношения компонентов
ФА-3/ФА-6 = 60/40		
Параметр «С»	$b_0 = 6,7625; b_1 = -0,0175;$ $b_2 = 0,2025; b_3 = -0,265;$ $b_{12} = -0,4675; b_{13} = 0,225;$ $b_{23} = 0,095; b_{123} = 0,505.$	ЖВК = 19,57 % ФА-3 = 46,14 % ФА-6 = 33,29 %
ФА-3/ФА-6 = 50/50		
Вязкость	$b_0 = 9150,5; b_1 = 1041,25;$ $b_2 = -106,25; b_3 = 608;$ $b_{12} = -2470; b_{13} = 782,75;$ $b_{23} = -167,25; b_{123} = 646.$	ЖВК = 20 % ФА-3 = 39,6 % ФА-6 = 39,4 %
Растекаемость	$b_0 = 1,00625; b_1 = -0,21625;$ $b_2 = 0,01375; b_3 = -0,12875;$ $b_{12} = 0,31625; b_{13} = -0,16625;$ $b_{23} = 0,07875; b_{123} = -0,03375.$	
Живучесть	$b_0 = 10; b_1 = -1;$ $b_2 = -0,5; b_3 = -0,5;$ $b_{12} = 0,5; b_{13} = -0,5;$ $b_{23} = 0; b_{123} = 0.$	
Напряжение	$b_0 = 13,47625; b_1 = 0,49125;$ $b_2 = -0,44125; b_3 = 0,00125;$ $b_{12} = 1,47375; b_{13} = -0,18375;$ $b_{23} = 0,73375; b_{123} = 1,05125.$	
Относительная деформация	$b_0 = 51,55375; b_1 = -2,47125;$ $b_2 = -2,50375; b_3 = -4,22125;$ $b_{12} = 6,57125; b_{13} = -1,14625;$ $b_{23} = -2,22875; b_{123} = -5,45375.$	
Модуль упругости	$b_0 = 58,32; b_1 = 6,145;$ $b_2 = 7,93; b_3 = 7,645;$ $b_{12} = 4,155; b_{13} = 3,27;$ $b_{23} = 8,305; b_{123} = 2,03.$	
Параметр «С»	$b_0 = 7,9875; b_1 = 0,0175;$ $b_2 = -0,0925; b_3 = -0,2275;$ $b_{12} = -0,4925; b_{13} = -0,2625;$ $b_{23} = -0,0025; b_{123} = 0,3025.$	
ФА-3/ФА-6 = 40/60		
Вязкость	$b_0 = 13248,875; b_1 = 780,875;$ $b_2 = -438,875; b_3 = 568,125;$ $b_{12} = -2038,875;$ $b_{13} = 1210,125;$ $b_{23} = -1066,125;$ $b_{123} = 226,125.$	ЖВК = 20,71 % ФА-3 = 31,14 % ФА-6 = 47,15 %
Растекаемость	$b_0 = 0,5125; b_1 = -0,095;$ $b_2 = 0,03; b_3 = -0,145;$ $b_{12} = 0,2125; b_{13} = 0,0025;$ $b_{23} = 0,0675; b_{123} = -0,035.$	
Живучесть	$b_0 = 8; b_1 = -0,5;$ $b_2 = 1; b_3 = 0,5;$ $b_{12} = 1,5; b_{13} = 0;$ $b_{23} = 0,5; b_{123} = -1.$	
Напряжение	$b_0 = 14,2575; b_1 = -0,1175;$ $b_2 = -0,7825; b_3 = 0,1575;$ $b_{12} = 1,1925; b_{13} = -0,0175;$ $b_{23} = 0,6675; b_{123} = -1,0575.$	

Продолжение таблицы 4

Критерий оптимизации	Коэффициенты математической модели	Оптимальные соотношения компонентов
ФА-3/ФА-6 = 40/60		
Относительная деформация	$b_0 = 47,8025 ; b_1 = -4,4475 ;$ $b_2 = -1,3025 ; b_3 = -2,9975 ;$ $b_{12} = 5,0475 ; b_{13} = -3,6975 ;$ $b_{23} = 4,4975 ; b_{123} = -6,7025 .$	ЖВК = 20,71 % ФА-3 = 31,14 % ФА-6 = 47,15 %
Модуль упругости	$b_0 = 64,6875 ; b_1 = 11,2625 ;$ $b_2 = -3,5125 ; b_3 = 10,7875 ;$ $b_{12} = 4,0625 ; b_{13} = 8,7625 ;$ $b_{23} = -7,0125 ; b_{123} = 4,9625 .$	
Параметр «С»	$b_0 = 9,3425 ; b_1 = 0,11 ;$ $b_2 = 0,125 ; b_3 = -0,255 ;$ $b_{12} = -0,4825 ; b_{13} = -0,1725 ;$ $b_{23} = 0,0325 ; b_{123} = 0,22 .$	

Таблица 5

Результаты оптимизации планов эксперимента для исследования влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики твердого смесового ракетного топлива

Критерий оптимизации	Время реализации эксперимента, час	Время реализации оптимального плана, час	Выигрыш, разы	Время счета программы, с
Вязкость	47,75	19,8	2,4	0,04
Растекаемость	25,5	12,2	2,1	0,03
Живучесть	63,75	29	2,2	0,05
Напряжение при растяжении	16	8,5	1,9	0,02
Относительная деформация	9	4	2,3	0,02
Модуль упругости	18	7	2,64	0,02
Параметр «С»	27	13	2,17	0,03

Заклучение

В работе решена актуальная задача получения последовательности опытов при проведении эксперимента, оптимизированному по методу прыгающих лягушек, обеспечивающая минимальное время его реализации.

Разработаны метод и программное обеспечение, реализующие оптимизацию многофакторных планов экспериментов с применением алгоритма прыгающих лягушек. Получены оптимальные по времени реализации планы эксперимента, а также приведен выигрыш в результатах оптимизации по сравнению с исходным временем проведения эксперимента. На примерах исследования влияния фракционного состава рабочей смеси порошков на характеристики твердого смесового ракетного топлива доказана работоспособность и эффективность предложенного метода.

Исследование показало, что поиск оптимального или близкого к оптимальному плану эксперимента с использованием метода прыгающих лягушек дал высокие результаты. Выигрыши, полученные в

результате оптимизации, при использовании данного метода являются существенными. Применение разработанного метода и программного обеспечения, основанного на использовании алгоритма прыгающих лягушек, эффективно при количестве факторов $k \geq 3$.

Предложенный метод и реализующее его программное обеспечение целесообразно рекомендовать для применения на практике при построении оптимальных матриц планирования эксперимента.

С учетом результатов исследования (табл. 4) вязкости, растекаемости, живучести, напряжения при растяжении, относительной деформации, модуля упругости, параметра «С» по полученным коэффициентам математических моделей можно сделать следующие выводы по оптимальным соотношениям компонентов ТСРТ:

- для соотношения ФА-3/ФА-6 = 60/40 содержание компонентов должно соответствовать: ЖВК – 19,57 %, ФА-3 – 46,14 %, ФА-6 – 33,29 %;

- для соотношения ФА-3/ФА-6 = 50/50 содержание компонентов должно соответствовать: ЖВК – 20 %, ФА-3 – 39,6 %, ФА-6 – 39,4 %;

- для соотношения ФА-3/ФА-6 = 40/60 содержание компонентов должно соответствовать: ЖВК – 20,71 %, ФА-3 – 31,14 %, ФА-6 – 47,15 %.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые предложен метод построения оптимальных планов многофакторных экспериментов, основанный на использовании алгоритма прыгающих лягушек, что позволит строить оптимальные планы экспериментов без полного перебора вариантов перестановок опытов.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, а также проведены эксперименты, подтвердившие его работоспособность и позволяющие рекомендовать для использования на практике научным работникам при построении оптимальных матриц планирования экспериментов.

Перспективы дальнейших исследований состоят в применении разработанного программного обеспечения на более широком наборе практических задач.

Литература

1. Yakovlev, S. V. *Properties of Combinatorial Optimization Problems Over Polyhedral-Spherical Sets [Text]* / S. V. Yakovlev, O. S. Pichugina // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2018. – Vol. 54, Iss. 1. – P. 99-109. DOI: 10.1007/s10559-018-0011-6.
2. Yakovlev, S. *Convex extensions in combinatorial optimization and their applications [Text]* / S. Yakovlev // *Springer Optimization and Its Applications*. – 2017. – Vol. 130. – P. 567-584. DOI: 10.1007/978-3-319-68640-0_27.
3. Hoskins, D. S. *Combinatorics and Statistical Inferencing [Text]* / D. S. Hoskins // *Applied Optimal Designs*. – 2007. – No. 4. – P. 147-179.
4. 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.
5. Bailey, R. A. *Combinatorics of optimal designs [Text]* / R. A. Bailey, P. G. Cameron // *Surveys in Combinatorics*. – 2009. – Vol. 365. – P. 19-73.
6. Wu, C. F. J. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization [Text]* / C. F. J. Wu, M. S. Hamada. – Wiley, 2015. – 743 p.
7. Семенов, С. А. *Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст] : Учебно-методическое пособие / С. А. Семенов. - М. : ИПЦ, 2001. - 93 с.*
8. Ахназарова, С. Л. *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии [Текст] : Учебное пособие для химико-технологических вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. - М. : Высш. Школа, 1978. - 319 с.*
9. Адлер, Ю. П. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] /*

Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. - М. : Наука, 1976. - 280 с.

10. Карпенко, А. П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой [Текст] : учебное пособие / А. П. Карпенко. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.*

11. Кошевой, Н. Д. *Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента [Текст] : монография / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава : Издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317 с.*

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

13. Кошевой, Н. Д. *Применение алгоритма прыгающих лягушек для оптимизации по стоимостным (временным) затратам планов полного факторного эксперимента [Текст] / Н. Д. Кошевой, В. В. Муратов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2018. – №4. – С. 53-61. DOI: 10.32620/reks.2018.4.05.*

14. Кошовий, М. Д. *Застосування алгоритму мавпячого пошуку для оптимізації планів повного факторного експерименту [Текст] / М. Д. Кошовий, В. В. Муратов // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2018. – № 61. – С. 61-69.*

15. Ugryumov M. L. *Network characteristic calculation method of spatial boundary layer on bounding surface of interblade channel of turboset [Text]* / M. L. Ugryumov, V. A. Men'shikov, V. V. Belik // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsonnaya Tekhnika*. – 1992. – No. 1. – P. 38-41.

16. *Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem [Text]* / M. L. Ugryumov, V. E. Afanasjevska, A. A. Tronchuk, A. V. Myenyaylov // *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, AJK*. – No. 1 (PARTS A, B, C, D). – P. 755-761.

References

1. Yakovlev, S. V., Pichugina, O. S. *Properties of Combinatorial Optimization Problems Over Polyhedral-Spherical Sets. Cybernetics and Systems Analysis*, 2018, vol. 54 (1), pp. 99-109. DOI: 10.1007/s10559-018-0011-6.
2. Yakovlev, S. *Convex extensions in combinatorial optimization and their applications. Springer Optimization and Its Applications*, 2017, vol. 130, pp. 567-584. DOI: 10.1007/978-3-319-68640-0_27.
3. Hoskins, D. S. *Combinatorics and Statistical Inferencing. Applied Optimal Designs*, vol. 4, 2007, pp. 147-179.
4. Morgan, J. P. *Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. Journal of the American Statistical Association*, vol. 100, no. 471, 2005, pp. 1092-1093.

5. Bailey, R. A., Cameron, P. G. Combinatorics of optimal designs. *Surveys in Combinatorics*, vol. 365, 2009, pp. 19-73.
6. Wu, C. F. J., Hamada, M. S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*. Wiley, 2015. 743 p.
7. Semenov, S. A. *Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii. Uchebno-metodicheskoe posobie* [Planning an experiment in chemistry and chemical technology. Teaching aid]. Moscow, CPI, 2001. 93 p.
8. Akhnazarova, S. L., Kafarov, V. V. *Optimizaciya jeksperimenta v himii i himicheskoy tekhnologii. Uchebnoe posobie dlja himiko-tehnologicheskikh vuzov* [Optimization of an experiment in chemistry and chemical technology: Textbook. A allowance for chemical and technological universities]. Moscow, Higher School Publ., 1978. 319 p.
9. Adler, Yu. P., Markova, E. V., Granovskiy, Yu. V. *Planirovanie experimenta pri poiske optimalnih usloviy* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow, Science Publ., 1976. 280 p.
10. Karpenko, A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoy. Uchebnoe posobie* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a training manual]. Moscow, MSTU, N.E. Bauman, 2014. 446 p.
11. Koshevoy, N. D., Kostenko, E. M. *Optimal'noe po stoimostnym i vremennym zatratam planirovanie eksperimenta: monografija* [Cost-effective and time-optimal experiment design: monograph]. Poltava, Izdatel' Shevchenko R.V., 2013. 317 p.
12. Koshevoy, N. D., Gordienko, V. A., Sukhobrus, Ye. A. Optimization for the design of technological processes. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, vol. 73, no. 15, pp. 1383-1386. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.V73.i15.60.
13. Koshevoy, N. D., Muratov, V. V. Primenenie algoritma prygajushhih ljagushek dlja optimizacii po stoimostnym (vremennym) zatratam planov polnogo faktornogo jeksperimenta [The use of the jumping frog algorithm for optimization of the cost (time) cost of plans for a full factorial experiment]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2018, no. 4, pp. 53-61. DOI: 10.32620/reks.2018.4.05.
14. Koshoviy, M. D., Muratov, V. V. Zastosuvannja algoritmu mavpjachogo poshuku dlja optimizacii planiv povnogo faktornogo eksperimentu [Application of the monkey application algorithm for optimizing the plans of the full factor experiment]. *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo Nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka – Collection of Scientific Papers of the Military Institute Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 2018, no. 61, pp. 61-69.
15. Ugryumov, M. L., Men'shikov, V. A., Belik, V. V. Network characteristic calculation method of spatial boundary layer on bounding surface of interblade channel of turboset. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatcionnaya Tekhnika*, 1992, no. 1, pp. 38-41.
16. Ugryumov, M. L., Afanasjevskaja, V. E., Tronchuk, A. A., Myenyaylov, A. V. Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem. *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, AJK*, no. 1 (PARTS A, B, C, D), pp. 755-761.

Поступила в редакцію 10.03.2020, рассмотрена на редколлегии 15.04.2020

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ РОБОЧОЇ СУМІШІ ПОРОШКІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО СУМІШЕВОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

М. Д. Кошовий, О. Л. Кириченко, С. А. Борісенко, В. В. Муратов

При дослідженні впливу фракційного складу робочої суміші порошків на характеристики твердого сумішевого ракетного палива (ТСРП) запропоновано оптимізацію із застосуванням методу стрибаючих жаб для побудови оптимальних за часом планів експерименту. Відомо, що частка продукту фракційного агенту (ФА) в складі ТСРП є найбільшою і складає до 80 %. Отже, продукт ФА надає одне з найбільших впливів на весь спектр фізико-хімічних властивостей ТСРП. Таким чином, завдання визначення впливу продукту ФА на властивості ТСРП є досить актуальною. Застосування методів планування експерименту дозволяє скоротити вартісні і тимчасові витрати при дослідженні різних технологічних процесів, приладів і систем. Мінімізація кількості переходів рівнів факторів в плані експерименту, в свою чергу, призводить до зменшення вартості (часу) його реалізації. Мета роботи – оптимізація по часових витратах планів повного факторного експерименту методом стрибаючих жаб. Для цього запропоновано метод побудови оптимальної за часом реалізації матриці планування експерименту з використанням алгоритму стрибаючих жаб. У методі стрибаючих жаб виконується визначення успішної жаби за найменшим часом переходів між рівнями для кожного з факторів. Після цього виконуються перестановки жаб. Жаба прагне до найбільш успішної та за умов перебування поблизу залишається в розташуванні. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод, який використано для проведення обчислювальних експериментів з вивчення властивостей цього методу при дослідженні впливу фракційного складу робочої суміші порошків на характеристики твердого сумішевого ракетного палива. Отримано оптимальні за часом реалізації плани експерименту, а також наведені виграші в результатах оптимізації в порівнянні з вихідним часом проведення експерименту. Проведено повний факторний експеримент з вивчення впливу фракційного складу робочої суміші порошків на характеристики ТСРП, на підставі якого видано рекомендації щодо впливу фракційного складу робочої суміші порошків і змісту рідко-в'язких компонентів в композиції на властивості ТСРП. Також по-

будовані математичні моделі, коефіцієнти яких характеризують вплив змісту рідко-в'язких компонентів в композиції на властивості ТСПІ. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і реалізує його програмного забезпечення, а також дозволяють рекомендувати його для застосування на практиці при побудові оптимальних матриць планування експерименту.

Ключові слова: оптимізація; планування експерименту; робоча суміш порошків; оптимальний план; метод стрибуючих жаб; час.

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE INFLUENCE OF FRACTIONAL COMPOSITION OF THE WORKING MIXTURE OF POWDERS ON THE CHARACTERISTICS OF THE SOLID MIXTURE FUEL

N. D. Koshevoy, A. L. Kirichenko, S. A. Borisenko, V. V. Muratov

When studying the influence of the fractional composition of the working mixture of powders on the characteristics of solid mixed rocket fuel (SMRF), optimization is proposed using the jumping frog method to construct time-optimal experimental designs. It is known that the proportion of the fractional agent (FA) product in the composition of SMRF is the largest and amounts to 80 %. Consequently, the FA product has one of the greatest effects on the whole range of physicochemical properties of SMRF. Thus, the task of determining the effect of the FA product on the properties of SMRF is very relevant. The application of experimental design methods reduces the cost and time costs in the study of various technological processes, devices, and systems. Minimizing the number of transitions of factor levels in terms of the experiment, in turn, leads to a decrease in the cost (time) of its implementation. The goal of the work is the optimization of the full factorial experiment time-lapse experiment using the jumping frog method. To this end, a method is proposed for constructing a time-optimal implementation of the experiment planning matrix using the jumping frog algorithm. In the jumping frog method, a successful frog is determined by the least transition time between levels for each of the factors. After that, frog permutations are performed. The frog strives for the most successful and, if located nearby, remains in its current location. The software has been developed that implements the proposed method, which was used to conduct computational experiments to study the properties of this method when studying the influence of the fractional composition of the working mixture of powders on the characteristics of solid mixed rocket fuel. The experimental plans optimal in terms of implementation time were obtained, and also the winnings in the optimization results are given in comparison with the initial experiment time. A full factorial experiment was carried out to study the effect of the fractional composition of the working mixture of powders on the characteristics of SMRF, based on which recommendations were made regarding the effect of the fractional composition of the working mixture of powders and the content of liquid-viscous components in the composition on the properties of SMRF. Mathematical models are also constructed, the coefficients of which characterize the effect of the content of liquid-viscous components in the composition on the properties of the SMRF. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and the software that implements it, and also allow us to recommend it for practical use in constructing the optimal planning matrices of the experiment.

Keywords: optimization; experiment planning; the working mixture of powders; optimal plan; jumping frog method; time.

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.

Кириченко Алексей Леонидович – канд. техн. наук, главный технолог ГП «НПО «ПХЗ», Павлоград, Украина.

Борисенко Сергей Анатольевич – руководитель группы ГП «НПО «ПХЗ», Павлоград, Украина.

Муратов Виктор Владимирович – аспирант кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

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

Kirichenko Alexey Leonidovich – Cand. Tech. Sciences, Chief Technologist GP «NPO «PHZ», Pavlograd, Ukraine, e-mail: office@pkhz.dp.ua.

Borisenko Sergey Anatolievich – Head of Group, GP «NPO «PHZ», Pavlograd, Ukraine, e-mail: d0ggy43@gmail.com.

Muratov Viktor Vladimirovich – Postgraduate student of the Department of Intellectual Measuring Systems and Quality Engineering, National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: vmuratov77@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-7684-5649.