

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.366>

УДК 519.673:614.841.3

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Смиловенко О.О., Богданова В.В., Малашенко С.М.,  
Полуян А.И., Миргуламлы Ф.О.

*Цель.* Повышение эффективности научных исследований и решения прикладных задач в области пожарной безопасности путем внедрения вычислительного компьютерного эксперимента – метода многокритериального синтеза, обеспечивающее сокращение временных, материальных и трудовых затрат на проведение эксперимента и корректную системную интерпретацию результатов испытаний.

*Методы.* Используется метод многокритериального синтеза, дающий возможность прогнозирования поведения исследуемой системы с учетом стохастичности ее параметров и выбора рациональных характеристик, которые обеспечивают требуемые выходные показатели. Поиск оптимальной совокупности параметров технического объекта предусматривает определение расчетных значений принятых критериев по значениям расчетных точек, которые расположены определенным образом в многомерном пространстве варьируемых параметров. При этом происходит преобразование пространства параметров в пространство критериев с учетом принятых ограничений.

*Результаты.* В статье приведены примеры применения метода многокритериального синтеза при решении задач обеспечения пожарной безопасности. Определена рецептура огнезащитно-огнетушащего состава на основе синтетических фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину. С помощью оптимизационно-имитационного подхода спрогнозировано время тушения пожара в резервуаре и выбраны оптимальные параметры тушения при подаче пены низкой кратности непосредственно в слой горючего. На основе многокритериального компьютерного синтеза установлены концентрация модифицирующей добавки в связку алмазных сегментов и режимы резания для инструмента (бензореза) при выполнении аварийно-спасательных работ. Разработан способ оценки совокупного территориального риска методом статистического моделирования, позволивший создать базу для управления риском, включая правовое, экономическое регулирование и обязательное страхование.

*Область применения исследований.* Представленные результаты исследований направлены на повышение пожарной безопасности различных объектов.

*Ключевые слова:* пространство параметров, ЛП-последовательности, огнезащитно-огнетушащее средство, подслоный способ тушения, бензорез, модифицированная связка, территориальный риск.

(Поступила в редакцию 14 января 2021 г.)

### Введение

Обеспечение пожарной безопасности требует решения различных задач, которые могут быть связаны как с предупреждением, так и с ликвидацией чрезвычайных ситуаций (ЧС). Это могут быть задачи из области химии, связанные с разработкой новых и совершенствованием известных огнетушащих и огнезащитных средств, негорючих материалов. Важным является создание новых способов и технических устройств для борьбы с огнем. Технологии ликвидации последствий ЧС, проведение аварийно-спасательных работ (АСР) и технические устройства для их реализации также являются предметом исследования и разработки. Определение территориальных рисков позволяет планировать количество и расположение пожарных частей и разрабатывать мероприятия по управлению рисками.

Вышеперечисленные задачи имеют общие черты, а именно они являются многопараметрическими и многокритериальными; параметры в них носят динамический и стохастический характер; процессы получения материала, функционирования устройства или системы могут быть описаны математическими моделями; решение этих задач представляет собой поиск оптимальных решений при наличии дрейфа параметров. Все это дает возможность применения к решению задач по обеспечению пожарной безопасности метода многокритериального синтеза.

Многокритериальный синтез [1; 2] выполняется путем вычислительного эксперимента на математической модели и состоит в выделении в многомерном пространстве входных параметров области, в которой значения всех выходных характеристик (критериев) одновременно удовлетворяют поставленным требованиям. В многомерном пространстве параметров выбирают некоторое количество пробных точек, по модели рассчитывают значения критериев в этих точках. Затем определяют, какие значения критериев из полученных при расчете соответствуют заданным требованиям, и выделяют в многомерном пространстве параметров область, в которой находятся значения параметров, обеспечивающие заданные требования.

Итак, конструктивные и эксплуатационно-технологические параметры  $P_1, P_2, \dots, P_n$  технической системы (технологического процесса) представляют собой независимые случайные величины, каждая из которых изменяется в своем диапазоне:

$$P_{iн} \leq P_i \leq P_{iв}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $P_{iн}$  и  $P_{iв}$  – нижняя и верхняя границы дрейфа параметра  $P_i$ .

Множество  $D = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$  представляет собой  $n$ -мерную априорно допустимую область, ограниченную  $n$ -мерным параллелепипедом, ребрами которого являются диапазоны изменений параметров  $P_1, P_2, \dots, P_n$  системы, обеспечивающих физическую возможность функционирования системы. Каждой точке этой ограниченной  $n$ -мерной области соответствует конкретное сочетание значений параметров системы, т.е. каждая точка характеризует мгновенное состояние системы в момент времени  $t_{мгн}$ .

Наличие модели функционирования системы, заданной в виде какого-либо математического выражения (например, алгебраические формулы, дифференциальные уравнения и т.д.) и связывающей между собой параметры и критерии, дает возможность вычислить значения критериев (показателей качества функционирования) при различных сочетаниях параметров. Это позволяет судить о функционировании системы в момент времени  $t_{мгн}$ .

Пусть выбранный критерий  $K$  зависит от ряда параметров системы:

$$K = K(P_1, P_2, \dots, P_n),$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  в фиксированный момент времени могут принимать любые значения из определенных для них интервалов.

Для реализации вычислительного эксперимента в пространстве возможных изменений параметров выбираем  $N$  точек, для каждой из которых находим значения критерия  $K$ .

Важной проблемой, возникающей при проведении вычислительного эксперимента, является построение оптимальных сетей – пространственного расположения точек. При планировании оптимальных сетей обычно исходят из стоимости вычислений, точности описания различных составляющих поля и т.д. Разработанные различными авторами процедуры поиска рациональной сети исходят либо из обычно прямоугольной, либо из ромбической сетки расположения точек съема информации. Представляется эффективным такое расположение этих точек, чтобы их координаты формировались по алгоритмам планируемого ЛП-поиска, достаточно просто реализуемым на ЭВМ [3].

Разработанные И.М. Соболев ЛП-последовательности [4] используются для анализа математических моделей функционирования объектов. Структура ЛП-последовательностей позволяет строить сетки в  $n$ -мерном пространстве параметров исследуемых функций. Для

расчета точек ЛП-последовательностей использовалось программное обеспечение «Синтез МК»<sup>1</sup>.

Пусть эффективность системы определяется несколькими критериями  $K_1, K_2, \dots, K_m$ , зависящими от параметров (1) системы:

$$K_1 = K_1(P_1, P_2, \dots, P_n), \dots, K_m = K_m(P_1, P_2, \dots, P_n).$$

Пусть  $G$  –  $m$ -мерное множество сочетаний критериев  $\bar{K} = (K_1, K_2, \dots, K_m)$ . Технические требования к системе сводятся к назначению допустимых интервалов для каждого из критериев  $K_j$ , которые образуют подмножество  $B$  в  $m$ -мерном пространстве критериев. Будем считать, что исследуемая система функционирует нормально, если  $\bar{K} \in B$ . В этом случае эффективность системы оценивается вероятностью выполнения требований по всем критериям работоспособности одновременно.

Если заданы величина и допуск критерия, в допустимом пространстве параметров может быть выделена компромиссная область  $D_k \in D$ , любая точка которой обеспечивает получение значения критерия в пределах его допуска. Нахождение параметров системы в области  $D_k$  гарантирует выполнение требований по критерию. Выход параметра или нескольких параметров за пределы области  $D_k$  приводит к отказу системы по выбранному критерию или критериям.

Все пробные точки пространства параметров, принадлежащие допустимому интервалу каждого критерия, сравнивают между собой. Для упрощения процедуры это может быть сделано путем сравнительного анализа номеров, а следовательно, значений параметров, входящих в допустимые интервалы критериев. Общие (для всех критериев) эффективные пробные точки характеризуют оптимальные значения параметров процесса.

Блок-схема алгоритма метода исследования пространства параметров при применении компьютерного моделирования показана на рисунке 1.

Покажем, как процедура многомерного синтеза реализована в решении конкретных научных задач. При проведении вычислительного эксперимента будут использованы как теоретические, так и экспериментальные математические модели. Следует отметить, что экспериментальные модели разработаны на основе результатов испытаний, выполненных по сеткам, составленным в соответствии с ЛП-последовательностями.

## Основная часть

### Разработка огнезащитно-огнетушащего состава, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину

Разработка рецептуры огнезащитно-огнетушащего состава (ОЗТС) на основе синтетических фосфатов двух- и трехвалентных металлов-аммония, обладающего высокоэффективным воздействием на торф и древесину, сегодня очень актуальна [5]. Выбор концентрационного соотношения реагентов, обеспечивающего выполнение требований к показателям качества получаемого продукта, обуславливает постановку и решение задачи синтеза, относящейся к классу задач со многими критериями [6].

Установлено, что огнезащитные и огнетушащие свойства синтетических продуктов зависят от химического состава и соотношения концентраций реагентов. Для получения математической модели были проведены эксперименты в пределах диапазонов варьирования содержания этих компонентов в реакционной смеси. Сетка эксперимента была составлена на основе ЛП-последовательностей. При этом входными параметрами состава, влияющими на его целевые свойства, является содержание в конечном продукте фосфора (входной параметр  $P_1$ ), бентонита (входной параметр  $P_2$ ) и азота (входной параметр  $P_3$ ).

<sup>1</sup> Компьютерный синтез допусков и номиналов параметров многокритериальных технических объектов и технологических процессов при их проектировании (Синтез МК): свид. № 940376 (РосАПО) / О.Н. Рябов, С.И. Марочкина, К.К. Кузьмич, О.В. Жилинский. – Дата регистр.: 12.09.1994.

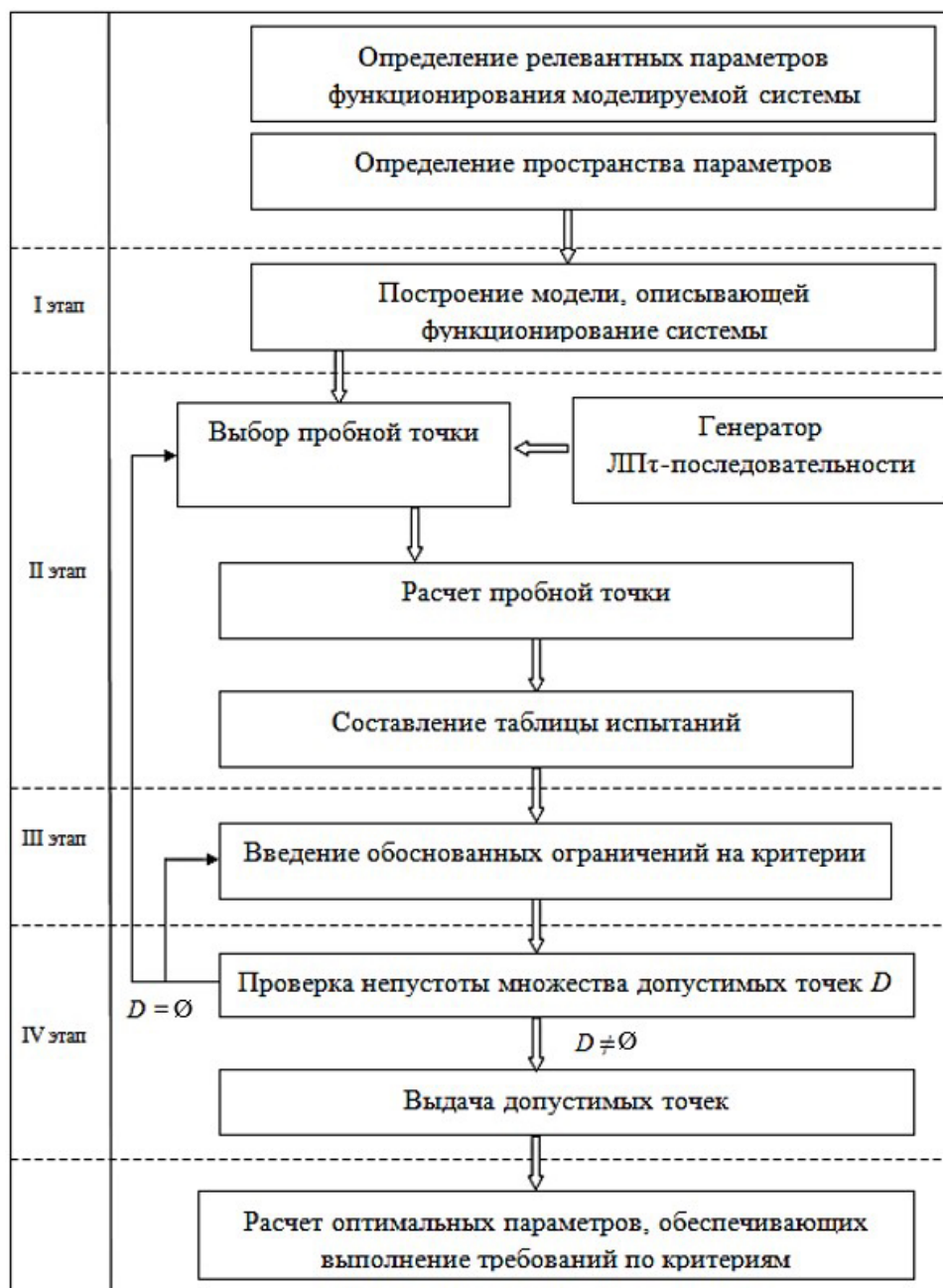


Рисунок 1. – Блок-схема алгоритма метода исследования пространства параметров

Экспериментальная математическая модель была сформирована из двух полиномиальных уравнений для расчета эффективности ОЗТС по торфу ( $K_1$ ) и по древесине ( $K_2$ ). Для каждого свойства ОЗТС было протестировано 12 типов полиномов первой и второй степени с взаимодействием входных параметров состава в различных комбинациях. Сравнительный анализ свойств протестированных аппроксимаций позволил выбрать наиболее адекватные полиномы [7]:

$$K_1 = 126,747 - 3,258P_1 + 2,690P_2 - 36,644P_3 + 0,438P_1P_3 - 0,837P_2P_3 + 2,912P_3^2,$$

$$K_2 = -445,512 + 152,957P_1 + 16,908P_2 + 204,304P_3 - 68,294P_1P_3 - 5,295P_2P_3 - 12,446P_1^2 + 0,925P_1P_2P_3 - 0,541P_1^2P_2 + 5,627P_1^2P_3.$$

Специалистами по средствам огнезащиты и тушения горючих материалов были сформулированы следующие требования к свойствам рецептуры ОЗТС: потери массы образцов торфа  $K_1 \leq 0,6\%$ ; потери массы образцов древесины  $K_2 \leq 3,5\%$  при воспроизводимости

свойств ОЗТС, равной единице. Технически оптимальный вариант рецептуры ОЗТС и значения его выходных характеристик приведен в таблице 1.

**Таблица 1. – Технически оптимальный вариант рецептуры ОЗТС и значения его характеристик**

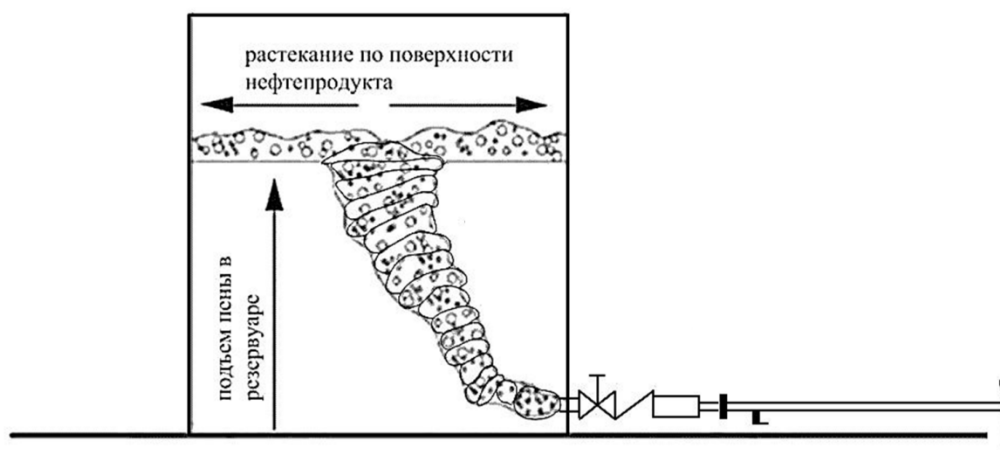
№ п/п	Наименование и размерность параметра	Номинальное значение	Граница рассеивания	
			нижняя	верхняя
1	Содержание фосфора, г	6,14	6,06	6,22
2	Содержание бентонитовой глины, г	3,035	3,00	3,07
3	Содержание азота, г	6,42	6,32	6,51
4	Огнетушащая эффективность по отношению к торфу, %	0,390	0,206	0,588
5	Огнетушащая эффективность по отношению к древесине, %	2,886	2,494	3,522

С предложенной рецептурой ОЗТС проведены химические синтезы и определена ее эффективность по отношению к торфу и древесине. Полученные результаты показали совпадение с расчетом, полностью удовлетворившее специалистов.

Таким образом, решена задача компьютерного синтеза рецептуры ОЗТС по двум заданным характеристикам: потере массы огнезащищенного торфа и потере массы огнезащищенной древесины. Определено множество рецептов, одновременно обеспечивающих заданные эффективности ОЗТС по отношению к торфу и древесине, и среди них выбран технически оптимальный вариант с воспроизводимостью свойств ОЗТС, равной единице.

### **Прогнозирование времени тушения пожара в резервуаре и выбор оптимальных режимов при применении подслоного способа тушения**

Большинство пожаров на территории объектов хранения и переработки нефти и нефтепродуктов происходит в вертикальных наземных резервуарах (далее – резервуар). Одним из наиболее эффективных и безопасных способов тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах является подслоный способ, при котором пена низкой кратности, получаемая из фторсодержащих пленкообразующих пенообразователей, подается по трубопроводу в нижнюю часть резервуара непосредственно в слой горючего. Схема движения пены в слое нефтепродукта приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Схема движения пены в слое нефтепродукта**

Задача состоит в том, чтобы путем математического моделирования прогнозировать время при изменении условий тушения как объективно изменяющихся под действием факторов внешней среды, так и связанных с погрешностью работы технических средств тушения и нестабильностью состава и консистенции огнетушащего вещества.

Пространство варьируемых параметров определено на основании системного анализа факторов, влияющих на эффективность тушения, и представляет собой  $n$ -мерный объем, границами которого являются диапазоны изменения параметров тушения, входящих в математическую модель. Таких параметров назначено пять: плотность пены, толщина слоя пены, коэффициент разрушения пены, расход раствора, скорость растекания пены по поверхности нефтепродукта. Границы изменения параметров определены на основе анализа реально действующих факторов.

Теоретическая модель [8] движения пены связывает параметры и критерии – такие выходные параметры системы, которые приняты нами за показатели эффективности.

Суммируя время движения огнетушащей пены на этапах – подъем в резервуаре и растекание по поверхности нефтепродукта – получим полное время тушения. Следует отметить, что время подъема пены в слое горючего значительно меньше, чем время покрытия пеной поверхности нефтепродукта и накопления слоя пены, который позволит полностью изолировать поверхность горючего и прекратить горение. После достижения струей пены, поданной снизу, верхнего слоя нефтепродукта, процессы подъема пены в жидкости и растекания по поверхности идут параллельно и одновременно. Поэтому проводим моделирование по теоретической модели растекания пены по поверхности, а полное время тушения получим, добавив детерминированное время подъема пены, полученное экспериментально.

$$t_p = \frac{\rho_n h_n}{(1 + c \cdot v_n)(J - J_{кр})}, \quad (3)$$

где  $\rho_n$  – плотность пены, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – коэффициент разрушения пены;  $h_n$  – толщина слоя пены на поверхности, при котором горение прекращается, м;  $v_n$  – скорость движения пены по поверхности нефтепродукта в радиальном направлении, м/с;  $J$  – удельная интенсивность подачи пены, которая определяется как отношение расхода огнетушащего средства  $Q$  к площади горения (площадь поверхности нефтепродукта)  $S$ ,  $J = Q / S$ ;  $J_{кр}$  – критическая интенсивность подачи пены, дм<sup>3</sup>/с.

Согласно рекомендациям [4] рассчитаны координаты зондирующих точек. Для заполнения пространства параметров выбрано 2048 зондирующих точек. Координаты каждой из них характеризуют мгновенное состояние системы при изменяющихся параметрах. По математической модели путем вычислительного эксперимента рассчитываем суммарное время растекания по поверхности для всех зондирующих точек. В результате вычислений получены ряды значений времени подъема пены и времени растекания пены по поверхности, каждый из которых состоит из 2048 компонентов. В таблице 2 приведены крайние значения рядов вычисленных критериев.

**Таблица 2. – Крайние значения рядов критериев**

Критерий	Обозначение критерия	Минимальное значение	Максимальное значение
Время подъема пены в резервуаре, с	$K_1$	5,5	22,1
Время растекания пены по поверхности нефтепродукта, с	$K_2$	9,2	261,0

Допустимые диапазоны изменения критериев назначаем в пределах от минимального значения, полученного при вычислительном эксперименте, до максимума, ограниченного значениями, выбранными с учетом результатов эксперимента и анализа научных источников (табл. 3).

**Таблица 3. – Ограничения на критерии**

Наименование критерия	Минимальное значение критерия	Максимальное значение критерия
Время подъема пены в резервуаре, с	5,5	20,0
Время растекания по поверхности нефтепродукта, с	9,2	35

Для определения оптимальных параметров, которые обеспечат выполнение требований по критериям с гарантированной вероятностью 100 %, решаем задачу путем отражения ограниченного пространства критериев в пространстве параметров. Такое «отражение» производим на основе вычислительного эксперимента также с использованием метода сеточного зондирования пространства параметров. В результате сформировано новое пространство параметров, которое обеспечит выполнение назначенных требований. При моделировании в ограниченном пространстве критериев установлено, что необходимо поддерживать значения управляемых параметров следующими:

- плотность пены – 219,0 кг/м<sup>3</sup>, т.е. кратность 4,57 (допустимый разброс 3,9–5,1);
- расход пены 20,4 дм<sup>3</sup>/с (допустимый разброс 18,5–21,6 дм<sup>3</sup>/с);
- оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения 52 мм (допустимый разброс 42–64 мм).

Предложенная методика определения оптимальных параметров тушения позволяет назначить допустимые интервалы изменения (допуски) управляемых параметров тушения (подачи пены) для выполнения требований по минимизации времени тушения.

### **Повышение работоспособности аварийно-спасательного инструмента путем оптимизации режущих свойств алмазных кругов**

В практике аварийно-спасательных работ спасательные и пожарные формирования применяют специальный инструмент и средства малой механизации. К таким инструментам относится бензорез, назначением которого является вскрытие конструкций, разрушенных или поврежденных зданий и сооружений, а также выполнение технологических отверстий для проведения разведки, отвода воздуха, обеспечения связи и эвакуации пострадавших людей, находящихся в завалах и труднодоступных местах. Основным критерий при конструировании бензореа – фактор времени, т.е. скорость реза. На прочность закрепления алмазных зерен в связке влияют такие ее физико-механические свойства, как твердость, микротвердость, ударная вязкость и триботехнические свойства – коэффициент трения и износ. Легирование или модификация металлических связок алмазными наноконпонентами (ультрадисперсным алмазом – УДА) позволяет улучшить перечисленные свойства [9].

Следует отметить, что повышение значений механических характеристик связок режущих сегментов только позволяет прогнозировать улучшение эксплуатационных качеств всего круга в целом при работе без охлаждения (как это часто происходит при АСР) и с увеличенными скоростью резания и подачей. Требуется провести испытания экспериментальных образцов сегментов на модифицированной связке в реальных условиях эксплуатации [10]. Результаты этих испытаний могут быть использованы для построения математической модели процесса резания.

Назначены три изменяемых параметра: один технологический – концентрация модификатора в связке и два эксплуатационных – скорость резания и подача.

Область исследований представлена многомерным пространством параметров (табл. 4).

**Таблица 4. – Пространство параметров**

Управляемые параметры процесса резания (наименование и размерность)	Границы возможных изменений параметров	
	Нижняя граница	Верхняя граница
$P_1$ – концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,5	1,5
$P_2$ – окружная скорость круга, м/с	20,0	40,0
$P_3$ – подача, см	20,0	30,0

Программа эксперимента включает 8 опытов. Такой объем экспериментальной информации позволяет сформировать полиномиальное уравнение выше второго порядка для определения критериев: удельной производительности резания ( $K_1$ ) и удельного расхода алмаза ( $K_2$ ).

Выбраны модели для критериев, наиболее точно описывающие процесс:

$$K_1 = 344,662P_1 + 0,0961P_2 - 46,393P_3 - 2,172P_1^2 + 0,00619P_2^2 + 15,863P_3^2,$$

$$K_2 = 8618,896000 - 129,380900P_1 + 220,985900P_2 - 1996,198000P_3 + \\ + 0,009702P_1P_2 - 1,073320P_1P_3 + 2,109242P_1^2 - 2,241094P_2^2 + 115,296000P_3^2 - \\ - 0,009474P_1^3 + 0,000806P_2^3 - 2,059746P_3^3.$$

Таким образом, построена математическая модель, позволяющая прогнозировать и целенаправленно задавать требуемые эксплуатационные показатели отрезных кругов. Это сделано путем введения ограничений на критерии и определения оптимальных параметров в ограниченном пространстве критериев. Назначены диапазоны изменений критериев (табл. 5) и определены допустимые интервалы изменений режимов резания (табл. 6).

**Таблица 5. – Ограничения на критерии**

Наименование критерия	Минимальное значение критерия	Максимальное значение критерия
$K_1$ – удельная производительность резания, см <sup>2</sup> /мин	500	600
$K_2$ – удельный расход алмаза, карат/м <sup>2</sup>	0,6	0,7

**Таблица 6. – Оптимальные значения параметров**

Параметр	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра	Среднее значение параметра
$P_1$ – концентрация УДА, добавляемого в связку, %	0,59	0,75	0,67
$P_2$ – окружная скорость круга, м/с	26,3	31,4	28,7
$P_3$ – подача, см	227	269	245

Данные значения управляемых параметров обеспечивают заданные удельную производительность и удельный расход алмаза с вероятностью 100 % при учете разброса остальных параметров.

### **Оценка совокупного территориального риска на базе системного анализа чрезвычайных ситуаций и анализ соответствия технических средств для их ликвидации уровню совокупного риска**

Безопасность людей в чрезвычайных ситуациях должна обеспечиваться в первую очередь снижением вероятности возникновения и уменьшением возможных последствий природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. При этом система защиты формируется на основе анализа вероятности возникновения, прогнозирования характера, масштаба и времени существования чрезвычайной ситуации, оценки возможных факторов риска, интенсивности формирования, проявления опасных факторов чрезвычайных ситуаций и т.д.

Наиболее годным для практического прогнозирования территориального риска оказался метод оценки рисков, предлагаемый нашими соседями из Польской Республики. Этот метод характеризуется системным подходом – учтены все возможные факторы угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на данной территории как техногенного, так и природного характера, причем в связи с плотностью застройки и количеством проживающего населения, что также влияет на серьезность последствий ЧС от этих факторов.

Однако авторы данного метода используют детерминированные оценки по каждому из факторов риска. Такой подход несколько снижает точность метода и не отражает сути оценки риска как вероятности возникновения ЧС. Для того чтобы учесть случайность и стохастичность возникновения ЧС, для каждого фактора должен быть назначен ранг (оценка) в виде интервала значений. Причем принято, что внутри этого интервала вероятность наступления ЧС распределена равномерно. Обобщенный территориальный риск определяют



методом статистического моделирования. В результате моделирования получен ряд (последовательность) значений критерия – обобщенного территориального риска.

В калькуляционном листе перечислены все основные факторы риска на территории города (например, столица Азербайджана – Баку). В их число включены: численность населения, тип застройки, горючесть строительных конструкции, высота застройки, промышленное предприятия, объекты с наличием опасных химически веществ, нефтепроводы и газопроводы, дороги, железные дороги, перевозка опасных веществ на транспорте (дорожный), перевозка опасных веществ на транспорте (железнодорожный), угроза затопления, аэродромы. Эти факторы являются параметрами многомерного пространства, в котором производится статистическое моделирование.

При заполнении калькуляционного листа было принято пять степеней угрозы:  $Z_I$  – очень маленькая угроза;  $Z_{II}$  – маленькая угроза;  $Z_{III}$  – средняя угроза;  $Z_{IV}$  – большая угроза;  $Z_V$  – очень большая угроза. Для каждого из параметров путем ранжирования в диапазоне от 1 до 5 определена степень угрозы. Причем ранг (степень) угрозы назначен не в детерминированных значениях (1, 2, 3 и т.д.), а в интервалах (0–1, 1–2, 1–4 и т.д.). Таким образом осуществляется переход от качественной оценки к количественной. Принято, что внутри интервала вероятность риска возникновения ЧС от этого фактора распределена равномерно.

Проведено зондирование многомерного пространства параметров пробными точками, каждая из которых характеризует определенное сочетание рангов риска всех параметров одновременно. В результате получена последовательность значений (256 точек) обобщенного критерия территориального риска в интервале от 6,0 до 374,0, т.е. максимальный территориальный риск для данного региона оценивается в 374 балла. Однако вероятность такого риска (по результатам моделирования) составляет всего 0,017 %.

С точки зрения обеспечения безопасности проживания на территории необходимо минимизировать показатель совокупного риска [11]. Интервал приемлемого совокупного риска был принят в диапазоне от 6,0 до 10,0 баллов. Для этого интервала обобщенного риска решена обратная задача – определено, в каких интервалах должна находиться степень угрозы (ранги параметров) для обеспечения уровня обобщенного риска в принятом минимальном интервале.

При анализе результатов моделирования выбирают параметры (факторы риска), наиболее влияющие на показатель совокупного риска, и определяют возможность управления степенью угрозы. Например, выявлено, что значимым параметром является такой фактор, как плотность застройки. Может быть рекомендовано учесть риск повышенной плотности застройки при проектировании новых районов города и реконструкции уже существующих. Если в качестве значимого параметра выступает фактор наличия дорог, по которым перевозят опасные грузы, – это необходимо учесть при планировании маршрутов их перевозки. Здесь уместна рекомендация о вынесении таких маршрутов за городскую черту или в районы с меньшей плотностью жилой застройки.

### **Заключение**

Все приведенные задачи решены с использованием стохастических подходов, учитывающих объективно существующую случайность входных параметров, влекущую случайность характеристик. При выборе номиналов входных параметров учитывали влияние на них дестабилизирующих факторов. В процессе решения определены допустимые размеры полей рассеивания входных параметров, что обеспечивает выполнение требований по воспроизводимости свойств. В результате решения многокритериальной задачи синтеза систем с заданными свойствами устанавливаются номинальные значения входных параметров и допустимые границы их рассеивания.

Решена задача компьютерного синтеза рецептуры ОЗТС по двум заданным характеристикам: потере массы огнезащищенного торфа и потере массы огнезащищенной древесины. Определено множество рецептов, обеспечивающих заданные эффективности ОЗТС по

отношению к торфу и древесине, и среди них выбран технически оптимальный вариант с воспроизводимостью свойств ОЗТС, равной единице. Применение метода многомерного компьютерного синтеза обеспечило корректную системную интерпретацию результатов огневых испытаний, а также сокращение временных, материальных и трудовых затрат на разработку и внедрение варианта рецептуры ОЗТС, отличающегося надежной воспроизводимостью заданных свойств.

На основании теоретической модели процесса движения огнетушащей пены в слое горючей жидкости с учетом разработанного на основе системного анализа пространства изменяемых параметров выполнено прогнозирование времени тушения пожара в резервуаре подслоинным методом. Решена задача оптимизации режимов тушения (выбора оптимальных параметров) по критерию минимизации времени тушения. Оптимальные параметры тушения (плотность пены, расход пены, оптимальная толщина слоя пены на поверхности нефтепродукта для тушения) не являются детерминированными величинами, должны поддерживаться в пределах определенного допуска, что обеспечивает возможность технической реализации требований по минимизации времени тушения пожара в резервуаре.

Разработана сетка эксперимента и экспериментальная модель процесса резания алмазным режущим сегментным кругом с модифицированной ультрадисперсным алмазом-связкой. Решена задача оптимизации режимов резания и концентрации модифицирующей добавки (ультрадисперсного алмаза) в связке режущего сегмента по критериям максимальной удельной производительности и наибольшей стойкости режущего инструмента при проведении аварийно-спасательных работ.

С точки зрения обеспечения безопасности проживания на территории необходимо минимизировать показатель совокупного риска. Для заданного интервала обобщенного риска определено, в каких интервалах должна находиться степень угрозы (ранги параметров) для обеспечения уровня обобщенного риска в принятом минимальном интервале. При исследовании структуры пространства параметров получена информация о механизме обеспечения требуемого уровня значений критерия. Выявлены наиболее значимые факторы риска возникновения ЧС. Результат проанализирован с точки зрения разработки мер и средств снижения рисков по этим факторам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поцелуев, А.В. Статистический анализ и синтез сложных динамических систем / А.В. Поцелуев. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Смиловенко, О.О. Разработка метода оценки качества функционирования технической системы / О.О. Смиловенко // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. науч. тр. междунар. научн.-техн. конф., Донецк, 9–13 сент. 2002 г. – Донецк, 2002. – С. 112–117.
3. Статников, И.Н. Планирование вычислительного эксперимента в задачах многокритериального моделирования динамических систем / И.Н. Статников, Г.И. Фирсов // Компьютерное моделирование 2005: сб. тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. – С. 104–112.
4. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
5. Богданова, В.В. Регулирование физико-химических свойств композиций на основе фосфатов металлов-аммония, проявляющих огнезащитный и огнетушащий эффект / В.В. Богданова, О.И. Кобец // Свиридовские чтения: сб. ст. Вып. 7. – Минск: БГУ, 2011. – С. 21–27.
6. Витязь, П.А. Фундаментальные основы компьютерного проектирования материалов с заданными свойствами / П.А. Витязь, О.В. Жилинский, Т.В. Лактюшина // Сб. материалов междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерному проектированию и разработке новых материалов, Томск, 19–22 сент. 2006 г. – Томск, 2006. – С. 82–85.
7. Богданова, В.В. Регулирование эффективности синтетических средств огнезащиты и тушения природных горючих материалов методом многомерного компьютерного синтеза / В.В. Богданова [и др.] // Вестник БГУ. Серия 2. Химия. Биология. География. – 2015. – № 1. – С. 12–18.

8. Малашенко, С.М. Математическая модель движения пены при подслоном тушении нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2015. – С. 27–31.
9. Рустамов, А.П. Влияние модифицирующей добавки на механические свойства режущих элементов аварийно-спасательного инструмента / А.П. Рустамов [и др.] // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – Т. 32. – С. 220–224.
10. Рустамов, А.П. Экспериментальная модель процесса резания при проведении аварийно-спасательных работ алмазными кругами на модифицированной связке / А.П. Рустамов, О.О. Смиловенко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 49–54.
11. Шойгу, С.К. Теоретические предпосылки оценки опасности территорий и рисков чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу, В.Р. Болов // Анализ и оценка природных рисков в строительстве: материалы междунар. конф. – М.: ПНИИС, 1997. – С. 74–75.

**Применение метода многокритериального синтеза в решении задач  
по обеспечению пожарной безопасности**  
**Application of the method of multi-criterial synthesis  
in solving problems to ensure fire safety**

**Смиловенко Ольга Олеговна**

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
промышленной безопасности, профессор  
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
e-mail: smilovenkoolga@tut.by  
ORCID: 0000-0003-1612-9573

**Olga O. Smilovenko**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Industrial Safety, Professor  
Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
e-mail: smilovenkoolga@tut.by  
ORCID: 0000-0003-1612-9573

**Богданова Валентина Владимировна**

доктор химических наук, профессор  
Учреждение Белорусского государственного  
университета «Научно-исследовательский  
институт физико-химических проблем»,  
лаборатория огнетушащих материалов,  
заведующий лабораторией  
Адрес: ул. Ленинградская, 14,  
220006, г. Минск, Беларусь  
e-mail: bogdanova@bsu.by  
ORCID: 0000-0002-8557-9925

**Valentina V. Bogdanova**

Grand PhD in Chemistry Sciences, Professor  
Research Institute for Physical Chemical  
Problems of the Belarusian State University,  
Laboratory of Fire Extinguishing Materials,  
Materials, Head of the Laboratory  
Address: Leningradskaya str., 14,  
220006, Minsk, Belarus  
e-mail: bogdanova@bsu.by  
ORCID: 0000-0002-8557-9925

**Малашенко Сергей Михайлович**

Учреждение «Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности и проблем  
чрезвычайных ситуаций» Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики  
Беларусь, отдел научно-технической  
информации и маркетинга, начальник отдела  
Адрес: ул. Солтыса, 183а,  
220046, г. Минск, Беларусь  
e-mail: 3337044@gmail.com

**Sergey M. Malashenko**

Research Institute for Fire Safety and Problems  
of Emergencies of the Ministry of Emergency  
Situations of the Republic of Belarus,  
Department of Scientific and Technical  
Information and Marketing,  
Head of Department  
Address: Soltysa str., 183a,  
220046, Minsk, Belarus  
e-mail: 3337044@gmail.com

**Полуян Александр Иванович**

Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси, лаборатория наноструктурных  
и сверхтвердых материалов, старший научный  
сотрудник  
Адрес: ул. Академическая, 12,  
220072, г. Минск, Беларусь  
e-mail: APoluyun.1954@tut.by

**Alexander I. Poluyan**

Joint Institute of Mechanical Engineering  
of the NAS of Belarus, Laboratory  
of Nanostructured and Superhard Materials,  
Leading Researcher  
Address: Akademicheskaya str., 12,  
220072, Minsk, Belarus  
e-mail: APoluyun.1954@tut.by

**Миргуламлы Фуад Октай оглы**

Министерство по чрезвычайным ситуациям  
Азербайджанской Республики, Центр  
управления в кризисных ситуациях,  
старший офицер  
Адрес: ул. Микаила Мушвига, 501,  
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

**Fuad O. Mirgulamly**

Ministry of Emergency Situations  
of the Republic of Azerbaijan,  
Crisis Management Center, Senior Officer  
Address: Mikail Mushviga str., 501,  
AZ1073, Baku, Azerbaijan

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.366>

## APPLICATION OF THE METHOD OF MULTI-CRITERIAL SYNTHESIS IN SOLVING PROBLEMS TO ENSURE FIRE SAFETY

**Smilovenko O.O., Bogdanova V.V., Malashenko S.M., Poluyan A.I., Mirgulamy F.O.**

*Purpose.* Increasing the efficiency of scientific research and solving applied problems in the field of fire safety by introducing a computational computer experiment – the method of multi-criteria synthesis to reduce the time, material and labor costs for the experiment and provide correct systemic interpretation of test results.

*Methods.* To solve the problems of fire safety, the method of multi-criteria synthesis was applied. It makes it possible to predict the behavior of the system, taking into account the stochasticity of its parameters and the choice of rational characteristics that provide the required output parameters. The search for the optimal set of parameters of a technical object involves the determination of the calculated values of the criteria by the values of the calculated points, which are located in the multidimensional space of variable parameters. In this case, the space of parameters is transformed into the space of criteria, taking into account the accepted restrictions.

*Findings.* The article provides examples of the application of the method of multi-criteria synthesis in solving problems of ensuring fire safety. The formulation of a fire retardant and fire extinguishing composition based on synthetic phosphates of bivalent and trivalent ammonium metals, being highly effective in impact on peat and wood, was determined. The using of an optimization-simulation approach made it possible to predict the time of extinguishing a fire in a tank and to select the optimal parameters of extinguishing by supply of low expansion foam directly into the fuel layer. On the basis of multi-criteria computer synthesis, the concentration of the modifying additive in the set of diamond segments and the cutting conditions for the tool during emergency rescue operations was determined. The way of assessing the aggregate territorial risk by the method of statistical modeling was developed which created a framework for risk management, including legal, economic regulation and compulsory insurance.

*Application field of research.* The presented research results are aimed at improving the fire safety of various objects.

*Keywords:* parameter space, LP-sequence, fire retardant and fire extinguishing agent, sub-layer extinguishing method, concrete saw, modified set, territorial risk.

(The date of submitting: January 14, 2021)

### REFERENCES

1. Potseluev A.V. *Statisticheskiy analiz i sintez slozhnykh dinamicheskikh sistem* [Statistical analysis and synthesis of complex dynamic systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 208 p. (rus)
2. Smilovenko O.O. Razrabotka metoda otsenki kachestva funktsionirovaniya tekhnicheskoy sistemy [Development of a method for assessing the quality of the technical system functioning]. *Proc. Intern. scientific-technical conf. «Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka», Donetsk, September 9–13, 2002.* Pp. 112–117. (rus)
3. Statnikov I.N., Firsov G.I. Planirovanie vychislitel'nogo eksperimenta v zadachakh mnogokriterial'nogo modelirovaniya dinamicheskikh sistem [Planning of a computational experiment in problems of multi-criteria modeling of dynamic systems]. *Proc. VI Intern. scientific-technical conf. «Komp'yuternoe modelirovanie 2005».* St. Petersburg State Polytechnic University, 2005. Pp. 104–112. (rus)
4. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of optimal parameters in problems with many criteria]. Moscow: Drofa, 2006. 175 p. (rus)
5. Bogdanova V.V., Kobets O.I. Regulyrovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv kompozitsiy na osnove fosfatov metallov-ammoniya, proyavlyayushchikh ogneshchitnyy i ogetushashchiy effekt [Regulation of the physico-chemical properties of compositions based on ammonium-metal phosphates that exhibit a fire-retardant and fire-extinguishing effect]. *Sviridovskie chteniya*, 2011. Iss. 7. Pp. 21–27. (rus). URI: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/24996>.

6. Vityaz' P.A., Zhilinskiy O.V., Laktyushina T.V. Fundamental'nye osnovy komp'yuternogo proektirovaniya materialov s zadannymi svoystvami [Fundamental principles of computer-aided design of materials with specified properties]. *Proc. Intern. Conf. on Physical Mesomechanics, Computer Design and Development of New Materials, Tomsk, September 19–22, 2006*. Tomsk, 2006. Pp. 82–85. (rus)
7. Bogdanova V.V., Laktiushina T.V., Dobrego K.V., Jilinsky O.V., Kobets O.I., Laktiushin A.N. Regulirovanie effektivnosti sinteticheskikh sredstv ognezashchity i tusheniya prirodnykh goryuchikh materialov metodom mnogomernogo komp'yuternogo sinteza [Regulation of efficiency of synthetic agents for fire protection and extinguishing of natural combustible materials by method of the multidimensional computer synthesis]. *Vestnik BGU. Ser. 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2015. No. 1. Pp. 12–18. (rus). URI: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/141843>.
8. Malashenko S.M., Smilovenko O.O. Matematicheskaya model' dvizheniya peny pri podsloynom tushenii nefteproduktov [Mathematical model of foam movement during sublayer extinguishing of petroleum products]. *Proc. XII Intern. scientific-technical conf. «Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii»*. Kursk, 2015. Pp. 27–31. (rus)
9. Rustamov A.P., Smilovenko O.O., Losik S.A., Kurlovich I.G. Vliyanie modifitsiruyushchey dobavki na mekhanicheskie svoystva rezhushchikh elementov avariyno-spatatel'nogo instrumenta [The effect of a modifying additive on the mechanical properties of the cutting elements of an emergency rescue tool]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika*, 2017. Vol. 32. Pp. 220–224. (rus)
10. Rustamov A.P., Smilovenko O.O. Eksperimental'naya model' protsessa rezaniya pri provedenii avariyno-spatatel'nykh rabot almaznymi krugami na modifitsirovannoy svyazke [Experimental model of the cutting process in the conduct of rescue work in the diamond circles on a modified bundle]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2017. No. 3. Pp. 49–54, available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_29822351\\_50427987.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29822351_50427987.pdf) (accessed: January 10, 2021). (rus)
11. Shoygu S.K., Bolov V.R. Teoreticheskie predposylki otsenki opasnosti territoriy i riskov chrezvychaynykh situatsiy [Theoretical prerequisites for assessing the danger of territories and the risks of emergency situations]. *Proc. Intern. conf. «Analiz i otsenka prirodnykh riskov v stroitel'stve»*. Moscow: Industrial and Research Institute for Engineering Research in Construction, 1997. Pp. 74–75. (rus)