

*И.К. Кириченко, д.ф.-м.н., профессор, НУГЗУ,
В.В. Сировой, к.т.н, доцент, НУГЗУ,
К.М. Останов, преподаватель, НУГЗУ*

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОЙ ПОДАЧИ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ СОСТАВОВ В ОЧАГИ ВОЗГОРАНИЙ

(представлено д.т.н. Росохой С.В.)

Сформулирована и осуществлена постановка задачи 4-х факторного (второго порядка) оптимального планирования эксперимента процесса подачи плоскорадиальных струй на относительно большие расстояния с помощью специально сконструированного насадка к стандартным стволам-распылителям. Проведена их структурная и параметрическая идентификация, осуществлена проверка на адекватность по критерию Стьюдента и по критерию Фишера. Рассчитаны рациональные значения геометрических параметров выходного сечения насадка.

Ключевые слова: огнетушащие составы (ОС), гелеобразующие составляющие (ГОС) планирование эксперимента, плоскорадиальные струи.

Постановка проблемы. Повышение эффективности воздействия огнетушащих составов (ОС) и приемов тушения пожаров является одной из актуальных двуединых проблем совершенствования мер противопожарной защиты. Одним из путей решения является формирование определенных их физико-химических свойств. Например, – смеси растворов гелеобразующих составов (ГОС). Другим путем является совершенствование подачи ГОС на очаги возгорания новыми техническими приемами.

Так или иначе, эффективность тушения оценивается в результате поведения экспериментальных исследований таких сложных систем, что обуславливает применение системного подхода, основной принцип которого заключается в стремлении учесть определенное количество параметров и характеристик, оказывающих решающее влияние на достоверность получаемых результатов.

Среди путей практической реализации такого подхода выделяются методы теории планирования и проведения экспериментов, как развитие идей экспериментального многофакторного анализа. В наиболее общем виде такие задачи математически формулируются следующим образом [1]:

$$y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i), \quad (1)$$
$$i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, l,$$

где y_j – исследуемые переменные, зависимые критично от параметров исследуемого процесса; x_1, x_2, \dots, x_i – параметры процесса, изменяемые в

ходе проведения экспериментов.

Анализ последних достижений и публикаций. В указанном смысле оценка эффективности оперативных действий при моделировании тушения пожаров с использованием обычных компактных и распыленных струй водных растворов гелеобразующих составов (ГОС) уже проводилась [2–3], в том числе и модифицированным методом имитационного моделирования пожаротушения на испытательном полигоне НУЦЗУ [4].

Постановка задачи и ее решение. Вместе с тем, в данной статье речь идет об особенностях пожаротушения бинарным огнетушащим составом (ОС), когда на очаг вместо гелеобразующих составляющих подаются два потока подкрашенных водных раствора, моделирующих попадание и смешивание над/перед очагом распыленных огнетушащих компонентов. (Имитация подачи двух составляющих ГОС, имеющих сходные с водой гидродинамические характеристики [4].) Очевидно, что такой подход, где вместо ГОС на очаг пожара подаются плоскорадиальные веерные струи воды, гидродинамические характеристики которой достаточно близки по своим свойствам водным растворам гелеобразующих составляющих, вполне приемлем для исследовательских целей (табл. 1).

Табл. 1. Сравнительные гидродинамические характеристики воды и гелеобразующих составляющих

№ п/п	Огнетушащие растворы	ρ , кг/м ³	$\gamma * 10^{-3}$, Н/м	β , °	U_0 , м/с при $\varphi_n = 0,95$	Q , л/с	d_{cp} , мм (W=10)
1	Подкрашенная вода обеих цветов	1000	72,8	4	0,768	0,00247	1,99
2	Na ₂ O·2,95SiO ₂ (3%)+ CaCl ₂ (3%)	1040					
		1040					
3	Na ₂ O·2,95SiO ₂ (12%)+ NH ₄ H ₂ PO ₄ (25%)	1075					
		1125					

Примечания: ρ – плотность; γ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; β – корневой угол, ° (град); U_0 – скорость истечения потока ОС, м/с; Q , – расход ОС, л/с; d_{cp} – средний диаметр капли, мм; W = 0,5-10 –число Вебера.

В связи с этим, при экспериментальных исследованиях стволы-распылители ОС размещались на штативах (рис. 1) специально сконструированной экспериментальной установки так, что в исходном положении они целенаправленно на условный очаг пожара (мишень-экран), располагаясь в пространстве «на исходной» со следующими геометрическими параметрами: h_1 и h_2 – уровень (высота) базирования стволов-распылителей C_1 и C_2 по отношению к объекту пожаротушения; $2a$ – расстояние их симметричного расположения относительно плоскости наведения на очаг пожара (OXYZ) в направлении оси OX; α_i и ψ_i $i = 1, \dots, 2$ – эйлеровы углы возвышения и рыскания в соответствующих вспомогательных плоскостях прицеливания на объект пожаротушения.

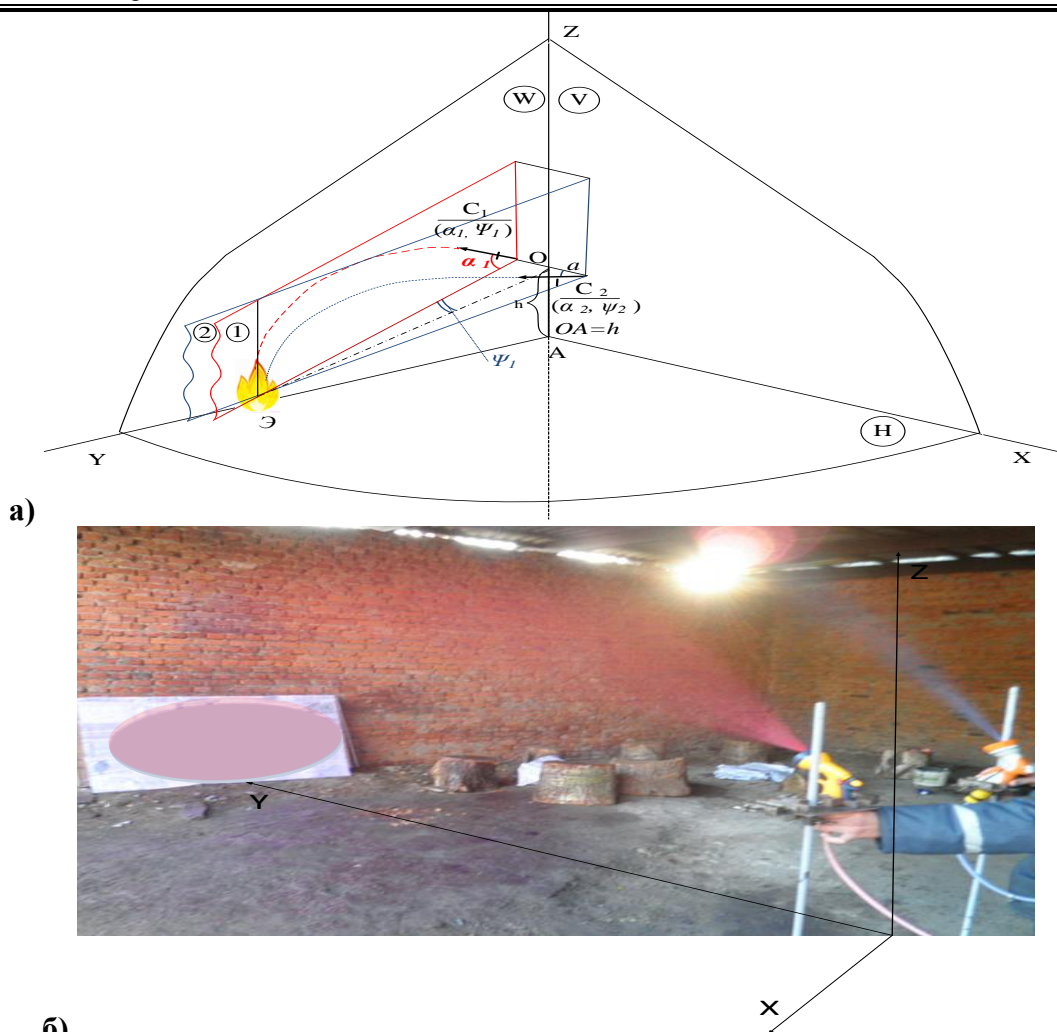


Рис. 1. Подача ОС: а) схема расположения стволов-распылителей и их размещение на уровне h относительно очага; б) Фото «прицеливания» стволов-распылителей для обеих струй составляющих ГОС ($\psi_1 = -\psi_2$)

Для построения плана экспериментов и определения максимального значения y (обобщенный параметр подачи водяной струи, зависящий от x_1, x_2, x_3 и x_4) в последнем столбце табл. 2 указано время движения капель струи в свободном полете. В подобных задачах (при ограниченном объеме выборки) удобно воспользоваться теорией оптимального планирования [5, 6]. В этом случае планирование эксперимента позволяет найти временную зависимость подачи плоскорадиальной веерной струи от четырех переменных факторов $x_i, i = 1, \dots, 4$ в виде полиномиальной квадратичной модели

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1, i \neq j}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ij} x_i^2, \tag{2}$$

где величины b_0, b_i, b_{ij} – соответственно коэффициенты регрессии при нулевом ($x_0=1$), линейном, квадратичном и т.д. переменных параметрах $x_i; b_{ij}$ – коэффициент регрессии, показывающий парное влияние переменных x_i и x_j на y .

Табл. 2. Композиционный план ортогонального эксперимента

Наименование		Факторы				
		X ₁ , мм	X ₂ , мм	X ₃ , м	X ₄ , м	
Нулевой уровень		3	125	22,5	11	
Интервал варьирования		2	25	8,5	7	
Опыты	X ₀	План				Переменное состояние y, с
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
1	+1	-1	-1	-1	-1	0,56
2	+1	+1	-1	-1	-1	0,54
3	+1	-1	+1	-1	-1	0,52
4	+1	+1	+1	-1	-1	0,48
5	+1	-1	-1	+1	-1	0,46
6	+1	+1	-1	+1	-1	0,64
7	+1	-1	+1	+1	-1	0,68
8	+1	+1	+1	+1	-1	0,66
9	+1	-1	-1	-1	+1	0,76
10	+1	+1	-1	-1	+1	0,8
11	+1	-1	+1	-1	+1	1,24
12	+1	+1	+1	-1	+1	1,22
13	+1	-1	-1	+1	+1	1,2
14	+1	+1	-1	+1	+1	1,21
15	+1	-1	+1	+1	+1	0,96
16	+1	+1	+1	+1	+1	1,16
17	+1	-1,41	0	0	0	1,08
18	+1	+1,41	0	0	0	1,06
19	+1	0	-1,41	0	0	1,04
20	+1	0	+1,41	0	0	0,96
21	+1	0	0	-1,41	0	0,92
22	+1	0	0	+1,41	0	0,88
23	+1	0	0	0	-1,41	0,87
24	+1	0	0	0	+1,41	0,86
25	+1	0	0	0	0	0,8

Примечание: Экспериментальные данные ограниченного объема выборки применительно к конструкции ствола-распылителя с модернизированным насадком взяты из [7]. Здесь X₁ (высота) и X₂ (ширина) выходного сечения насадка ствола-распылителя, мм; X₃ (дальность) и X₄ (ширина) фронта подачи ОС, м.

Для получения математической модели области оптимума в виде уравнения (2) применим композиционный план ортогонального эксперимента [5] для четырёх факторов x_i , $i = 1, \dots, 4$ который имеет вид, приведённый в табл. 2.

Введем преобразование:

$$x'_i = x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (3)$$

где для нашего случая число экспериментов $N = 25$.

Коэффициенты уравнения регрессии в (2) для центрального композиционного ортогонального плана находим по формулам [6]

$$b_0 = \frac{1}{25} \sum_{u=1}^{25} y_u, b_i = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^{25} x_{iu}^2}, b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{iu} x_{ju})^2}, b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x'_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x'_i)^2}, \quad (4)$$

где $i, j = 1, \dots, 4, i \neq j$.

Для данного центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка по четырём факторам в системе Maple была создана программа, с помощью которой находим:

$$b_0 = \frac{1}{25} \sum_{u=1}^{25} y_u = 0,86; \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{1u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} x_{1u}^2} = 0,02; \quad b_2 = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{2u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} x_{2u}^2} = 0,03;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{3u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} x_{3u}^2} = 0,04; \quad b_4 = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{4u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} x_{4u}^2} = 0,2; \quad b_{12} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{1u} x_{2u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{1u} x_{2u})^2} = -0,006;$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{1u} x_{3u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{1u} x_{3u})^2} = 0,03; b_{14} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{1u} x_{4u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{1u} x_{4u})^2} = 0,008; b_{23} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{2u} x_{3u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{2u} x_{3u})^2} = -0,05;$$

$$b_{24} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{2u} x_{4u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{2u} x_{4u})^2} = 0,03; b_{34} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x_{3u} x_{4u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x_{3u} x_{4u})^2} = 0,01; b_{11} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x'_{1u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x'_1)^2} = 0,02;$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x'_{2u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x'_2)^2} = -0,02; b_{33} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x'_{3u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x'_3)^2} = -0,07; b_{44} = \frac{\sum_{u=1}^{25} x'_{4u} y_u}{\sum_{u=1}^{25} (x'_4)^2} = -0,09.$$

Таким образом, искомую функцию можно представить следующим образом:

$$y = -1,12 - 0,04x_1 + 0,01x_2 + 0,07x_3 + 0,04x_4 - 0,0001x_1x_2 + \\ + 0,002x_1x_3 + 0,0006x_1x_4 - 0,0003x_2x_3 + 0,0002x_2x_4 + 0,0002x_3x_4 + \quad (5) \\ + 0,004x_1^2 - 0,00003x_2^2 - 0,001x_3^2 - 0,002x_4^2.$$

Решая систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = -0,04 + 0,008x_1 - 0,0001x_2 + 0,006x_3 + 0,0006x_4 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0,02 - 0,0001x_1 - 0,00006x_2 - 0,0003x_3 + 0,0002x_4 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = 0,07 + 0,006x_1 - 0,0001x_2 - 0,006x_3 + 0,0006x_4 = 0; \\ \frac{\partial y}{\partial x_4} = 0,04 + 0,0006x_1 + 0,0002x_2 + 0,0002x_3 - 0,004x_4 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

находим значения переменных [8] $X_i^{opt}, j = 1, \dots, 4$, в стационарной точке: $X_1^{opt} = 3,29$ мм; $X_2^{opt} = 195,76$ мм; $X_3^{opt} = 17,01$ м; $X_4^{opt} = 22,12$ м.

Вычисляя вторые частные производные модели (1)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_1} &= 0,008 \equiv a_{11}, & \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_1} = -0,0001 \equiv a_{12} \equiv a_{21}, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_3 \partial x_1} = 0,002 \equiv a_{13} \equiv a_{31}, & \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_4} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_4 \partial x_1} = 0,0006 \equiv a_{14} \equiv a_{41}, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_2} &= 0,00006 \equiv a_{22}, & \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_3 \partial x_2} = -0,0003 \equiv a_{23} \equiv a_{32}, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_4} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_4 \partial x_2} = 0,0002 \equiv a_{24} \equiv a_{42}, & \frac{\partial^2 y}{\partial x_3 \partial x_3} &= -0,002 \equiv a_{33}, \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_3 \partial x_4} &= \frac{\partial^2 y}{\partial x_4 \partial x_3} = 0,0002 \equiv a_{34} \equiv a_{43}, & \frac{\partial^2 y}{\partial x_4 \partial x_4} &= -0,004 \equiv a_{44}, \end{aligned}$$

и вычисляя определители [8]

$$a_{11}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (7)$$

находим, что в стационарной точке $X_i^{opt}, j=1, \dots, 4$, достигается экстремум $y_{max} = 1,18 с$.

Использование данных проведенных расчетов в системе Maple позволило оценить значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы $N_0 - 1 = 3$.

Данная модель проверена на адекватность с помощью критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Если рассмотреть основные конструктивные параметры (высота и ширина щели) насадка с точки зрения дальности и ширины распыла стволом-распылителем веерной струи воды, то максимальная эффективность подачи водного раствора ОС следует ожидать для: $X_1^{opt} = 3,29 \text{ м}$, $X_2^{opt} = 195,76 \text{ мм}$.

Обобщенный параметр будет соответствовать зависимости

$$y_1 = 0,1 + 0,03x_3 + 0,08x_4 + 0,0002x_3x_4 - 0,001x_3^2 - 0,002x_4^2. \quad (8)$$

Графические интерпретации полученных решений, представленные на рис. 2 и рис. 3, свидетельствуют о том, что ориентировочная оценка области рациональных геометрических параметров насадка на стволы-распылители РС-70 / ПЛС-20П соответствует найденным конкурентным значениям для оптимальной искомой конструкции.

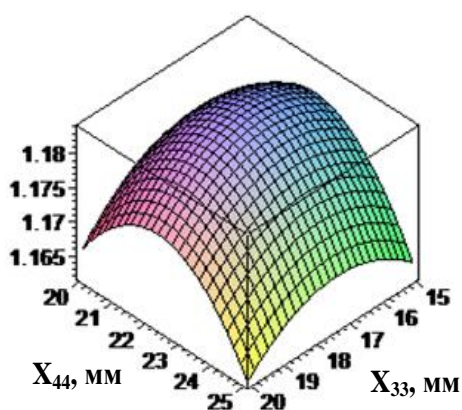


Рис. 2. График функции y_1 при сечении плоскостями: $X_1 = 3,29 \text{ мм}$, $X_2 = 195,76 \text{ мм}$

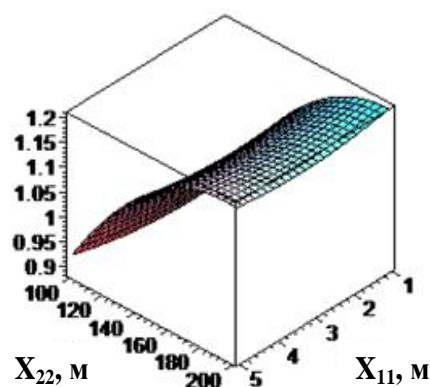


Рис. 3. График функции y_2 при сечении плоскостями: $X_3 = 17,01 \text{ м}$, $X_4 = 22,12 \text{ м}$

Напомним, что основными оценочными критериями варьируемой геометрии насадка ствола-распылителя в наших исследованиях являются дальность подачи, и ширина плоскорадиальной веерной струи, которая способна «накрыть» очаг пожара по фронту или осуществить защиту соседних с очагом объектов от теплового излучения факела пламени.

Из графиков видно, что оптимальная геометрия выходного сечения насадка соответствует размерам: высота $2b = 3,3$ мм; ширина $2a = 195,8$ мм. При этом максимальная эффективность подачи водного раствора на объект пожаротушения соответствует дальности подачи плоскорадиальной веерной струи $L_{\max} = 22,12$ м при ширине охвата фронта $17,01$ м. А обобщенный параметр соответствует зависимости

$$y_2 = -0,6 - 0,003x_1 + 0,01x_2 - 0,0001x_1x_2 + 0,003x_1^2 - 0,00003x_2^2. \quad (9)$$

Таким образом, проведенные на основе теории оптимального планирования эксперименты и их результаты подтвердили работоспособность устройства для образования плоскорадиальных веерных струй огнетушащих растворов воды в условиях близких к реальным. Такой тип стволов-распылителей на наш взгляд можно рекомендовать к применению не только при тушении пожаров на значительных расстояниях открытых площадок, но и в закрытых помещениях зданий и сооружений с соответствующими конструктивными изменениями.

Выводы. Сформулирована и осуществлена постановка задачи 4-х факторного (второго порядка) оптимального планирования эксперимента процесса подачи плоскорадиальных струй на относительно большие расстояния с помощью специально сконструированного насадка к стандартным стволам-распылителям.

Проведена их структурная и параметрическая идентификация, осуществлена проверка на адекватность по критерию Стьюдента и по критерию Фишера. Выбранные модели достаточно точно соответствуют результатам экспериментов.

Рассчитаны рациональные значения геометрических параметров выходного сечения насадка, указаны особенности применения разработанной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Ю.В. Грановский, В.В. Маркова. – М.: Наука, 1971. – 123 с.

2. Абрамов Ю.А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А / Ю.А. Абрамов, А.А. Киреев. – Харьков: НУЦЗУ, 2015. – 254 с.

3. Шаршанов А.Я. Моделирование поведения капель компонентов гелеобразующих огнетушащих систем в высокотемпературной области / А.Я. Шаршанов, Ю.А. Абрамов, А.А. Киреев // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Том 22. Номер 11. – С. 57-63.

4. Анализ процесса подачи и траектории потока струй огнетушащего вещества установкой АУТГОС / С.В. Росоха, Ю.Н. Сенчихин,

А.А. Киреев, К.М. Остапов // Проблемы пожарной безопасности – Харків: НУЦЗУ, 2015. – Вип. 38. – С. 146-155.

5. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных / Н.И. Сидняев. – М.: Наука, 2012. – 399 с.

6. Бондарь А.Г. Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев: Вища школа, 1976. – 184 с.

7. Росоха С.В. Моделирование тушения пожаров класса «А» бинарными гелеобразующими составами / С.В. Росоха, Ю.Н. Сенчихин, Ю.Ю. Дендаренко, Шаломов В.А., К.М. Остапов // Сб. науч. тр.: Строительство, Материаловедение, Машиностроение. – Днепр: ПГАСА, 2016. – Вып. 73. – С. 215-221.

8. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 1 / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Физматгиз, 1962. – 608 с.

Получено редколлегией 18.10.2016

І.К. Кириченко, В.В. Сировой, К.М. Остапов

Планування експерименту в задачах дистанційної подачі гелеутворюючих складів в осередок займання

Сформульована і здійснена постановка задачі 4-х факторного (другого порядку) оптимального планування експерименту процесу подачі плоско-радіальних струменів на відносно великі відстані за допомогою спеціально сконструйованого насадка до стандартних стоволів-розпилювачів. Проведена їх структурна і параметрична ідентифікація, здійснена перевірка на адекватність за критерієм Стьюдента та за критерієм Фішера. Розраховані оптимальні значення геометричних параметрів вихідного перетину насадка.

Ключові слова: гелеутворюючі склади, вогнегасні склади, планування експерименту, плоско-радіальні струмені.

I.K. Kirichenko, V.V. Sirovoy, K.M. Ostapov

Planning experiment in problems of remote power gelling composition the flashpoint

Formulated and implemented statement of the problem 4 factorial (second order) optimal planning application process experiment flat-radial jets at a relatively long distance with the help of a specially designed nozzle for standard trunks spray. Spend their structural and parametric identification, carried out checks on the adequacy of the criteria for the Student and the Fisher test. Designed rational values of geometrical parameters of the outlet section of the nozzle.

Keywords: gel-forming components, fire extinguishing substance, design of experiments, flat-radial jet.