

УДК 614.841

М.В. Кустов¹, В.Д. Калугин¹, С.Ю. Рагимов²¹Університет гражданской защиты Украины, Харьков²НИО-1 Украинского НИИ пожарной безопасности МЧС Украины, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГNETУШАЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ЭМУЛЬСИЙ ПРОПЕЛЛЕНТОВ В ВОДЕ МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведены экспериментальные исследования огнетушащего действия многокомпонентных эмульсионных систем (поверхностно-активные вещества + высокомолекулярные соединения + электролиты + пропелленты). Получено регрессионное уравнение, описывающее влияние состава системы на показатель её огнетушащей способности. На основе результатов обработки экспериментальных данных с использованием метода многофакторного планирования эксперимента предложен состав пониженной стоимости с высокими огнетушащими свойствами.

Ключевые слова: многокомпонентная эмульсия, электролит, поверхностное натяжение, вязкость, пропеллент, адекватность модели, огнетушащая эффективность, оптимизация.

Введение

Постановка проблемы. Повышение эффективности тушения пожаров растворами на основе воды является основной задачей теоретических и прикладных исследований в области пожарной безопасности. Для её решения наиболее перспективным направлением является разработка новых огнетушащих составов. Основным количественным показателем эффективности огнетушащего вещества является показатель огнетушащей способности [1]. При тушении твёрдых горючих материалов этот показатель определяется количеством вещества, необходимым для тушения единицы площади модельного очага пожара. Повышение огнетушащей способности достигается изменением физико-химических характеристик огнетушащих составов. Однако при использовании жидких огнетушащих систем их практическая эффективность оказывается намного меньше теоретической. Это объясняется тем, что большая часть воды, как основного компонента таких составов, по различным причинам не принимает участия в процессе прекращения горения. Поэтому повышение огнетушащей способности составов на основе воды за счёт улучшения их физико-химических характеристик является перспективной и актуальной задачей.

Анализ последних достижений и публикаций. Как уже было замечено выше, на огнетушащую эффективность жидкостей влияют их физико-химические свойства. Так в работе [2] установлена оптимальная область физико-химических параметров жидких огнетушащих систем, при которых наблюдается максимальная огнетушащая способность. Для достижения необходимых оптимальных свойств огнетушащих жидкостей используют добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые снижают поверхностное натяжение огнетушащих растворов [3], и добавки высокомолекулярных соединений (ВМС), повышающих вязкость растворов [4]. Значительно повысить огнетушащую эффективность жидкостей позволяет введение электролитов [4, 5], которые участвуют в ингибировании активных

центров пламени. Авторами работ [6, 7] предложено использование эмульсий пропеллентов (легкокипящих органических жидкостей) в воде. Механизм действия таких эмульсий заключается в том, что при попадании в зону горения легкокипящая фаза интенсивно вскипает, разрывает каплю-носитель, увеличивая дисперсность потока, а, следовательно, и отбор тепла от очага горения.

Целью работы является экспериментальное исследование (с использованием метода многофакторного планирования эксперимента) огнетушащей способности эмульсий пропеллентов в воде и установление их оптимального химического состава для минимизации расхода раствора на тушение пожара.

Обсуждение экспериментальных данных

При использовании огнетушащих эмульсий, которые включают в свой состав пропелленты, электролиты, ПАВ и ВМС, между компонентами могут возникнуть эффекты взаимодействия, поэтому для определения оптимального химического состава огнетушащей эмульсии необходимо установить количественную взаимосвязь между составом эмульсии и её огнетушащей способностью. Для этого проводили эксперимент по методике изложенной в [8]. Обработку полученных результатов выполняли с использованием методов планирования эксперимента.

Верхний уровень концентрации ПАВ составляет 5 % масс., так как из литературных источников [9] и по данным наших экспериментов дальнейшее увеличение концентрации ПАВ практически не приводит к снижению поверхностного натяжения растворов.

Максимальная концентрация ВМС (Na-КМЦ) в растворе составляет 0,48 % масс., что является критической концентрацией мицеллообразования для данного ВМС. Интервал концентраций электролита в эмульсии составлял (0 – 28) % масс. Верхний уровень интервала концентраций определялся предельной растворимостью $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ в воде.

Предел варьирования концентраций йодистого метила составлял (0 – 15) % масс. Верхний предел выбран исходя из экологических соображений. Основными показателями токсико-гигиенического действия являются предельно допустимая концентрация и токсодоза веществ. Согласно установленным нормам йодистый метил относится к химически опасным веществам, в тоже время известно, что в атмосфере пары CH_3I разлагаются и образуют не-

активные соединения [10]. Однако, ориентируясь на наихудший сценарий развития событий (без учёта механизма разложения паров CH_3I) в качестве верхнего уровня (с учётом плеча d) по концентрации йодметила выбрана концентрация 15 % масс., так как при использовании состава с большей концентрацией йодистого метила при тушении пожара в изолированном объеме могут достигаться предельно допустимые концентрации (ПДК) CH_3I .

Таблица 1

Уровни варьирования четырёх факторов (модель определения показателя огнетушащей способности)

Факторы	Кодовое обозначение	Нулевой уровень $x_i=0$	Интервал варьирования	Максимальный уровень $x_i=1$	Минимальный уровень $x_i=-1$
Концентрация ПАВ, % масс.	x_1	2,5	1,25	3,75	1,25
Концентрация Na-КМЦ, % масс.	x_2	0,25	0,13	0,38	0,12
Концентрация $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, % масс.	x_3	14	7	21	7
Концентрация CH_3I , % масс.	x_4	7,5	3,75	11,25	3,75

Эксперимент реализован в соответствии с центральным композиционным рототабельным планом

второго порядка. Реализация плана типа 2^4 представлена в табл. 2.

Таблица 2

Условия и результаты опытов по исследованию огнетушащего действия эмульсий (ПАВ+ Na-КМЦ+ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ + CH_3I)

x_1	x_2	x_3	x_4	M	x_1	x_2	x_3	x_4	M
-1	-1	-1	-1	375	-2	0	0	0	338
+1	-1	-1	-1	380	+2	0	0	0	275
-1	+1	-1	-1	413	0	-2	0	0	300
+1	+1	-1	-1	405	0	+2	0	0	350
-1	-1	+1	-1	363	0	0	-2	0	388
+1	-1	+1	-1	380	0	0	+2	0	300
-1	+1	+1	-1	408	0	0	0	-2	450
+1	+1	+1	-1	380	0	0	0	+2	225
-1	-1	-1	+1	338	0	0	0	0	335
+1	-1	-1	+1	300	0	0	0	0	345
-1	+1	-1	+1	350	0	0	0	0	350
+1	+1	-1	+1	313	0	0	0	0	343
-1	-1	+1	+1	275	0	0	0	0	338
+1	-1	+1	+1	225	0	0	0	0	343
-1	+1	+1	+1	308	0	0	0	0	340
+1	+1	+1	+1	250					

В результате проведения расчётов коэффициентов регрессии и оценки их по критерию Стьюдента получено уравнение регрессии:

$$M=342,01-13,458x_1-12,125x_2-19,208x_3-49,792x_4-4,063x_1x_2-2,563x_1x_3-10,563x_1x_4-12,563x_3x_4-6,683x_1^2-2,873x_2^2+2,693x_3^2. \quad (1)$$

Проверка адекватности модели и воспроизводимости процесса дала положительный результат.

Анализ выражения (1) показал, что увеличение значений концентраций всех компонент ведёт к уменьшению значения функции отклика. При этом, наибольший эффект вносит изменение концентрации йодистого метила. С физической точки зрения это объясняется значительной ингибирующей способностью молекул-радикалов данного компонента относительно к активным центрам пламени.

Для выполнения оптимизационной задачи по концентрациям компонент проведем исследование выражения (1) на экстремум. Запишем частные производные по всем переменным:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{\partial x_1} = -13,458 - 4,063x_2 - 2,563x_3 - 10,563x_4 - 13,363x_1 \\ \frac{\partial M}{\partial x_2} = -12,125 - 4,063x_1 - 5,746x_2 \\ \frac{\partial M}{\partial x_3} = -19,208 - 2,563x_1 - 12,563x_4 + 3,386x_3 \\ \frac{\partial M}{\partial x_4} = -49,792 - 10,563x_1 - 12,563x_3. \end{cases} \quad (2)$$

Приравняв производные к нулю, проводим поиск экстремума с помощью пакета математических программ Maple. Результаты показали, что наи-

меньшего значения функция (1) достигает на границе области определения. Для проверки этой гипотезы проведена процедура пошагового перебора по всем четырём координатам. Таким образом получаем, что максимальную огнетушащую способность будет иметь состав эмульсии с максимальным содержанием всех компонент.

Однако в результате проведения эксперимента и анализа зависимости огнетушащей способности от состава эмульсии было выявлено, что весомый вклад в повышение огнетушащей эффективности оказывают компоненты при существенно меньших концентрациях от максимума, а дальнейшее их увеличение лишь незначительно повышает огнетушащую способность. Учитывая вышеизложенное, возникает также возможность резкого сокращения себестоимости огнетушащего состава при незначительном уменьшении его эффективности.

Исходя из того, что эксперимент по тушению модельного очага пожара проводился с погрешностью до 5%, можно установить состав с минимальным содержанием компонент, который обладает огнетушащей способностью M' в пределах погрешности относительно минимального значения величины M согласно (3):

$$\left| \frac{M' - M}{M} \right| \cdot 100\% = 5\% . \quad (3)$$

Таким образом мы получили известное значение функции $M' = f(x_1', x_2', x_3', x_4')$. Очевидно, что функция M' не имеет единой точки, которая бы отвечала найденному значению. В связи с этим для определения состава с минимальной стоимостью, который обладает огнетушащей способностью M' , необходимо выделить наиболее дорогостоящий компонент и установить состав с минимальным его содержанием. При себестоимости 50 грн. за 1 кг наибольший вклад в стоимость состава вносит йодистый метил (x_4, x_4'). Таким образом нам необходимо определить минимум функции:

$$x_4' = f(x_1', x_2', x_3') , \quad (4)$$

при известном значении M' .

При обработке данных с помощью пакета математических программ Maple установлено, что минимальное значение функции x_4' составляет $\approx 3,2$. и достигается при $x_1' \approx 1,1, x_2' \approx 0,1, x_3' \approx 4,6$.

Таким образом получаем, что наибольшей эффективностью в пределах погрешности (точности) проведения эксперимента будет обладать эмульсия

на основе воды, содержащая $\text{CH}_3\text{I} - 3,2\%$ масс., $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 - 4,6\%$ масс., анионоактивного ПАВ - $1,1\%$ масс., ВМС - $0,1\%$ масс.

Выводы

На основе результатов комплексных экспериментов по исследованию огнетушащего действия эмульсий пропеллентов в воде установлена количественная взаимосвязь между её показателем огнетушащей способности и концентрациями компонент. Установлено, что наибольший вклад в эффект тушения эмульсиями вносит пропеллент – йодистый метил. На основе математической зависимости удалось существенно сократить материалоёмкость и стоимость состава огнетушащей эмульсии при незначительном снижении её эффективности.

Список литературы

1. ДСТУ 2272. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять.
2. Кустов М.В. Вплив фізико-хімічних властивостей істинних розчинів на їх вогнегасну ефективність / М.В. Кустов, В.Д. Калугін // Проблеми пожежарної безпеки. – Х.: УГЗУ, 2007. – Вып. 22. – С. 126-134.
3. Казаков М.В. Применение поверхностно-активных веществ для тушения пожаров / М.В. Казаков. – М.: Стройиздат, 1977. – 80 с.
4. Вогнегасні речовини: посібник – К.: Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.
5. Тарахно О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі / О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов. – Х., 2004. – 252 с.
6. Тарахно О.В. Застосування хімічної модифікації води для отримання водяного потоку певної дисперсності / О.В. Тарахно, М.В. Кустов // Проблеми пожежарної безпеки. – Х.: УГЗУ, 2006. – Вып 20. – С. 210 - 213.
7. Панин Е.Н., Огнетушащая способность эмульсии воды с низкокипящей водонерастворимой добавкой / Панин Е.Н., Ройко В.М., Козлов В.А. // Пожаротушение: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1983. - С. 112-117.
8. ДСТУ 3675-98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань.
9. Дерягин Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
10. Исаева Л.К. Экология пожаров / Л.К. Исаева. – М., 2004. – 273 с.

Поступила в редколлегию 3.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ДІЇ ЕМУЛЬСІЙ ПРОПЕЛЕНТІВ У ВОДІ

М.В. Кустов, В.Д. Калугін, Ю. Рагімов

Проведені експериментальні дослідження вогнегасної дії багатокомпонентних емульсійних систем (поверхнево-активні речовини + високомолекулярні сполуки + електроліти + пропеленти). Отримане регресійне рівняння, що описує вплив складу системи на показник її вогнегасної здатності. На основі результатів обробки експериментальних даних з використанням метода багатofакторного планування експерименту запропоновано склад зниженої вартості з високими вогнегасними властивостями

Ключові слова: багатокомпонентна емульсія, електроліт, поверхневий натяг, в'язкість, пропелент, адекватність моделі, вогнегасна ефективність, оптимізація.

**RESEARCH OF EXTINGUISHING ACTION OF EMULSIONS PROPELLANT IN WATER BY MEANS
OF METHOD MULTIFACTORIAL PLANNING OF EXPERIMENT**

M.V. Kustov, V.D. Kalugin

Experimental researches extinguishing actions multicomponent systems of emulsions (surface-active substances + high-molecular connections + electrolits + propellant). It is received the regressive equation describing influence of structure of system on its parameter of extinguish ability. On the basis of results of processing experimental's data with use of a method of multifactorial planning experiment the structure of the lowered cost with high extinguish properties is offered.

Keywords: *multicomponent emulsion, electrolit, a superficial tension, viscosity, propellant, adequacy of model, extinguish efficiency, optimization.*