

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАМКНУТЫХ ОБЪЕМАХ

А.А. Бондарь;

А.П. Решетов, кандидат технических наук, доцент;

А.Ю. Иванов, доктор технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Предлагается новый способ получения тонкораспыленной воды в разработанном и изготовленном модульном устройстве пожаротушения для эффективного тушения пожара в замкнутых объемах. Показана статистическая и математическая обработки результатов эксперимента тушения пожара в замкнутых объемах.

Ключевые слова: тонкораспыленная вода, модульное устройство пожаротушения, время тушения пожара, математическая модель

MATHEMATICAL MODELLING OF TIME OF SUPPRESSION OF FIRES THIN THE SPRAYED WATER (TSW) BY RESULTS OF EXPERIMENT IN THE CLOSED VOLUMES

A.A. Bondar; A.P. Reshetov; A.Y. Ivanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Authors the new way of reception thin the sprayed water developed and made modular devices of a firefighting for effective fire extinguishing in the closed volumes is offered. Statistical processing of results of experiment has shown that fire extinguishing time in the closed volumes, depends on parameters of the modular device. Mathematical processing of the results of tests received during experiments has allowed to receive regression model for an estimation of efficiency of suppression of fires in the closed volumes.

Key words: thin the sprayed water, the modular device of a firefighting, fire extinguishing time, mathematical model

Для получения тонкораспыленной воды (ТРВ) используют модульные устройства пожаротушения, которые применяются как первичное средство тушения пожара в начальный момент возгорания. Модульный принцип противопожарной защиты широко используется за рубежом. Ежегодно на мировом рынке предлагаются новые конструкции модульных устройств [1, 2].

Авторы предлагают новый способ получения ТРВ в модульном устройстве пожаротушения, который позволяет уменьшить время с момента срабатывания до полного выпуска огнетушащего вещества. Для проведения эксперимента по исследованию эвакуации воды совместно с фреоном R-141В и эффективности тушения пожаров класса «В» было разработано и изготовлено лабораторное модульное устройство пожаротушения, эжектирующее тонкораспыленную воду (МУП ЭТРВ) (рис. 1) [3].

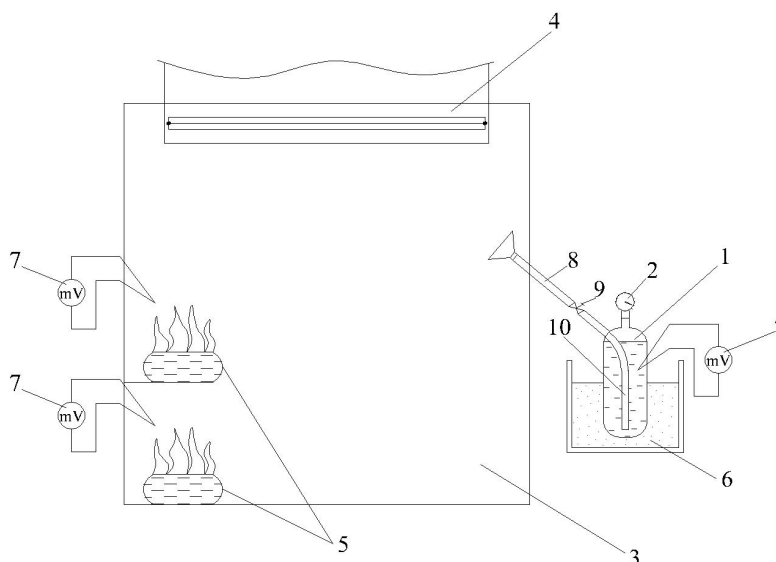


Рис. 1. Схема разработанного устройства:

1 – баллон с огнетушащим веществом (ОТВ) емкостью 1000 мл; 2 – манометр;
 3 – экспериментальная камера объемом 1 м³; 4 – система вентиляции; 5 – модельные очаги пожара класса «В»; 6 – песчаная баня; 7 – термодатчики для измерения температуры баллона и внутри экспериментальной камеры; 8 – система подачи ОТВ; 9 – система подачи ОТВ, совмещенное с разрывной мембраной; 10 – сифонная трубка

Рабочая камера герметично закрывается, в фасадной стене имеются окна для наблюдения за ходом эксперимента. В камеру помещались модельные очаги пожара, представляющие собой металлические емкости диаметром 80 мм, расположенные на разных высотах, в качестве горючего компонента использовались ацетон и бензин АИ-80 в объеме 80 мл.

Исследовалась зависимость времени тушения модельных очагов от температуры баллона. При выбранном оптимальном соотношении фреона и воды в баллоне объемом 1000 мл совместно с 10 мл фреона R-141В эвакуируется примерно 780 мл воды.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1, 2 и на графиках (рис. 2, 3). При каждом из заданных параметров температуры баллона с огнетушащим составом проводилось по 10 опытов. Оценивались время тушения нижнего и верхнего очагов и количества эвакуируемой смеси из баллона.

Таблица 1. Результаты эксперимента по тушению ацетона

Номер испытания	Температура нагрева баллона, °С	Давление срабатывания, Атм (кгс/см ²)	Количество эвакуируемой смеси, мл	Время тушения, сек.	
				нижний очаг	верхний очаг
1	78,0	3,8	750	6,1	5,05
2	79,0	4,0	770	6,07	4,45
3	79,5	4,0	780	5,65	3,9
4	80,0	4,1	780	5,4	3,7
5	80,5	4,1	785	5,0	3,15
6	81,0	4,1	790	4,5	3,0
7	81,5	4,2	790	4,3	2,8
8	82,0	4,2	790	4,25	2,6
9	82,5	4,2	790	4,1	2,5
10	83,0	4,2	795	3,9	2,2

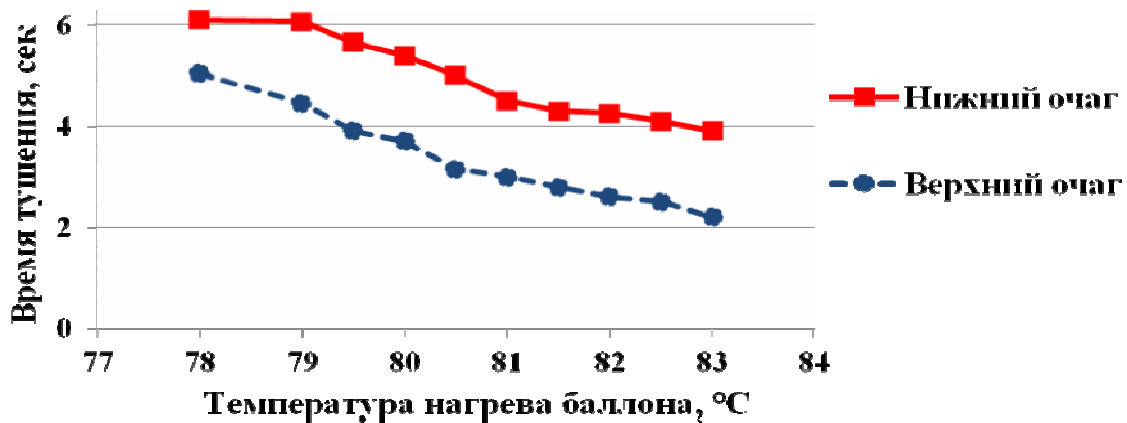


Рис. 2. Зависимость времени тушения ацетона от температуры баллона

Таблица 2. Результаты эксперимента по тушению бензина АИ-80

Номер испытания	Температура нагрева баллона, °C	Давление срабатывания, Атм (кгс/см ²)	Количество эвакуируемой смеси, мл	Время тушения, сек.	
				нижний очаг	верхний очаг
1	78,5	3,9	765	11,1	8,35
2	79,0	3,9	770	11,0	8,05
3	79,5	3,9	775	10,5	8,0
4	80,0	4,0	780	10,1	7,2
5	80,5	4,0	780	9,2	6,8
6	81,0	4,1	785	9,15	6,2
7	81,5	4,1	785	9,0	5,7
8	82,0	4,2	790	8,9	5,55
9	82,5	4,2	795	8,8	5,1
10	83,0	4,2	795	8,4	4,5

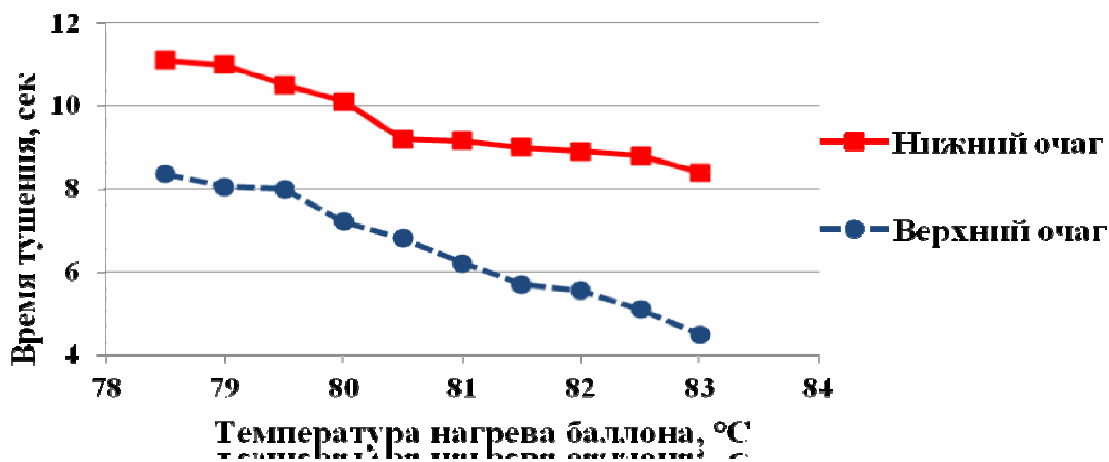


Рис. 3. Зависимость времени тушения бензина АИ-80 от температуры баллона

Результаты данной серии эксперимента показали, что используемый метод эжекции для получения ТРВ в разработанном лабораторном модульном устройстве пожаротушения имеет ряд преимуществ:

- высокая эффективность при объемном тушении пожаров класса «В», которая увеличивается в несколько раз;
- время с момента срабатывания до полного выпуска огнетушащего вещества менее 15 секунд, что уменьшает в 1,5–2 раза выпуск огнетушащего вещества из существующих устройств;
- низкая температура срабатывания (до 85° С);
- в первоначальном дежурном состоянии МУП ЭТРВ находится под нормальным давлением;
- отсутствие дополнительного пускового баллона, что способствует меньшей металлоемкости и материальным затратам;
- устройство относительно дешевое и технологичное в изготовлении [2, 4].

Математическая обработка полученных в ходе экспериментов результатов испытаний позволила получить аналитические зависимости, которые связывают показатели эффективности тушения (например, время тушения τ стандартного очага) и параметры МУП ЭТРВ $x_1 \div x_m$ (m – число учитываемых параметров) в виде квазилинейного уравнения регрессии (его называют также математической моделью) [5]:

$$\tau = \sum_{j=1}^M a_j r_j; \quad (1)$$

где a_j , r_j – j -е коэффициенты регрессии и условный фактор, зависящий от параметров $x_1 \div x_m$; M – число компонентов уравнения (1).

Условные факторы $r_1 \div r_m$ в свою очередь, могут быть представлены в полиномиальном виде:

$$r_j = \prod_{l=1}^m f_l^{S_{jl}}; \quad k = 1, M; \quad (2)$$

где f_l – некоторое функциональное преобразование от l -го параметра; S_{jl} – степень при j -м компоненте уравнения (2) для l -го параметра.

Величины $\{S_{jl}\}$ находятся, как правило, методом форсированного перебора, преобразования $\{f_l\}$ подбираются эмпирически, а коэффициенты $\{a_j\}$ находятся по результатам испытаний МУП ЭТВ на основе метода наименьших квадратов:

$$D = \frac{1}{N - M} \cdot \sum_{i=1}^N (\tau_i - \sum_{j=1}^M a_j r_{ji})^2 \rightarrow \min, \quad N > M \quad (3)$$

где N – число испытаний; τ_i – время тушения, зафиксированное в i -м испытании; r_{ji} – величина j -го условного фактора при значениях параметров $x_1 \div x_m$, характерных для i -го испытания.

Из условия (3) выводится матрично-векторное выражение для расчета искомого вектора коэффициентов регрессии $A = [a_1, \dots, a_m]^T$:

$$A = (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot Z^T \cdot T; \quad (4)$$

где Z – матрица условных факторов, содержащая N строк (по числу испытаний) и M столбцов (по числу условных факторов); $T-N$ – мерный вектор значений времени тушения, полученный по результатам испытаний.

Адекватность уравнения регрессии (1) проверяется путем сопоставления значений времени тушения полученных экспериментально и расчетом, для чего может использоваться критерий Фишера [6]:

$$F = \frac{D_0}{D}; \quad (5)$$

где $D_0 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\tau_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j)$ – дисперсия экспериментов.

Если величина F больше табличного значения при степенях свободы $V_1 = N-M$ и $V_2=N-1$, то доверительная вероятность α уравнения (3) больше некоторой табличной вероятности $\alpha_{\text{табл.}}$. Для упрощения оценки адекватности была выведена эмпирическая формула:

$$\alpha = 1 - F^K; \quad (6)$$

где $K = 10^{-0,9895 + 1,349 \cdot \Phi_1^{-2} - 0,048 \cdot \Phi_1^3 \cdot \Phi_2^2 - 0,5233 \cdot \Phi_1^{-3} + 0,0977 \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2}$,

$$\Phi_{1,2} = \frac{1,5 \cdot V_{1,2} - 0,5}{V_{1,2} + 1}.$$

В любом случае, приблизительно можно считать, что если $F > 10$, то доверительная вероятность α не меньше 95 %.

Рассмотрим данный подход на примере. Было проведено две серии опытов по 10 экспериментов ($N=10$), в процессе которых менялось три ($m=3$) параметра – температура нагрева баллона (X_1), давление срабатывание (X_2), количество эвакуируемой смеси (X_3) и один параметр – количество долей воды (X_4) к одной доле фреона оставался неизменным, а также фиксировалось время тушения стандартного очага.

Математическая обработка результатов измерений в первом случае (тушение ацетона) позволила получить уравнение (1) в виде:

$$\tau_n^{6blч} = -382,9 \cdot z_1 + 447,3 \cdot z_2 - 127,9 \cdot z_3; \quad (7)$$

где $z_1 = h_1$; $z_2 = h_1^{-1}$; $z_3 = h_1^{-3}$; $h_1 = 0,001 \cdot X_3$.

$$\tau_г^{6blч} = -282 \cdot z_4 + 322 \cdot z_5 - 89,79 \cdot z_6; \quad (8)$$

где $z_4 = h_1$; $z_5 = h_1^{-1}$; $z_6 = h_1^{-3}$; $h_1 = 0,001 \cdot X_3$.

Проверка адекватности выражений (7) и (8) по критерию Фишера дала положительный результат – величина доверительной вероятности $\alpha > 96$ %. Для сравнения величины времени тушения τ , пересчитанные по уравнениям (7) и (8), приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты исследования (тушение ацетона)

№ п/п	X ₁ , °C	X ₂ , Атм (кгс/см ²)	X ₃ , мл	X ₄	Время тушения, сек.			
					τ _н , сек.	τ _{н^{выч}} , сек.	τ _в , сек.	τ _{в^{выч}} , сек.
1	78,0	3,8	750	95	6,1	6,05	5,05	5,0
2	79,0	4,0	770		6,07	6,0	4,45	4,36
3	79,5	4,0	780		5,65	5,36	3,9	3,65
4	80,0	4,1	780		5,4	5,36	3,7	3,65
5	80,5	4,1	785		5,0	4,91	3,15	3,2
6	81,0	4,1	790		4,5	4,37	3,0	2,7
7	81,5	4,2	790		4,3	4,35	2,8	2,7
8	82,0	4,2	790		4,25	4,35	2,6	2,7
9	82,5	4,2	790		4,1	4,31	2,5	2,69
10	83,0	4,2	795		3,9	3,76	2,2	2,14

Математическая обработка результатов измерений во втором случае (тушение АИ-80) позволила получить уравнение (1) в виде:

$$\tau_n^{выч} = 108,4 \cdot z_1 + 66,68 \cdot z_2 - 145,9 \cdot z_3; \quad (9)$$

где $z_1 = (h_1 \cdot h_2)^2$; $z_2 = h_1/h_2^2$; $z_3 = h_1^2/h_2$; $h_1 = 0,01 \cdot X_1$; $h_2 = 0,001 \cdot X_3$.

$$\tau_e^{выч} = -96,66 \cdot z_4 - 41,53 \cdot z_5 + 109,9 \cdot z_6; \quad (10)$$

где $z_4 = h_1^2$; $z_5 = (h_1 \cdot h_2)^{-2}$; $z_6 = (h_1 \cdot h_2)^{-1}$; $h_1 = 0,01 \cdot X_1$; $h_2 = 0,001 \cdot X_3$.

Проверка адекватности выражений (9) и (10) по критерию Фишера дала положительный результат – величина доверительной вероятности $\alpha > 97$ %. Для сравнения величины времени тушения τ , пересчитанные по уравнениям (9) и (10), приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты исследования (тушение бензина АИ-80)

№ п/п	X ₁ , °C	X ₂ , Атм (кгс/см ²)	X ₃ , мл	X ₄	Время тушения, сек.			
					τ _н , сек.	τ _{н^{выч}} , сек.	τ _в , сек.	τ _{в^{выч}} , сек.
1	78,5	3,9	765	95	11,1	11,05	8,35	8,3
2	79,0	3,9	770		11,0	10,7	8,05	8,1
3	79,5	3,9	775		10,5	10,4	8,0	7,9
4	80,0	4,0	780		10,1	9,75	7,2	7,05
5	80,5	4,0	780		9,2	9,3	6,8	6,5
6	81,0	4,1	785		9,15	9,1	6,2	6,1
7	81,5	4,1	785		9,0	8,65	5,7	5,5
8	82,0	4,2	790		8,9	8,95	5,55	5,6
9	82,5	4,2	795		8,8	8,75	5,1	5,15
10	83,0	4,2	795		8,4	8,30	4,5	4,6

Таким образом, по результатам исследования эффективности тушения модельных очагов пожара класса «В» в замкнутом объеме комбинированным огнетушащим составом получена регрессионная модель, связывающая время тушения с основными параметрами

устройства. Эта модель может быть использована для разработки эффективных систем противопожарной защиты на объектах хранения нефтепродуктов.

Литература

1. Павлов А.П. Опыт использования модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой для защиты объектов различного назначения // Алгоритм безопасности. 2008. № 5. С. 29–31.

2. Бондарь А.А. К вопросу об обеспечении пожарной безопасности на объектах хранения нефтепродуктов в условиях природных и техногенных ЧС // Молодые ученые о системе обеспечения безопасности в условиях природных и техногенных чрезвычайных ситуациях в первой половине XXI века: материалы науч.-практ. конф. СПб.: СПб университет ГПС МЧС России, 2011.

3. Решетов А.П., Бондарь А.А. Аналитический обзор и совершенствование противопожарной защиты автоматическими установками пожаротушения на водном транспорте // Совершенствование работы в области обеспечения безопасности людей на водных объектах: материалы науч.-практ. конф. СПб.: СПб университет ГПС МЧС России, УСЦ «Вытегра», 2011.

4. Решетов А.П., Бондарь А.А. Перспективный способ получения тонкораспыленной воды для эффективного тушения пожаров в замкнутых объемах на водном транспорте при освоении шельфа Северного Ледовитого океана // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Обеспечение комплексной безопасности при освоении северных территорий: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: СПб университет ГПС МЧС России, 2011.

5. Васильев П.В. Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа. М.: Из-во «Дрофа», 2007. С. 342–353.

6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.