УДК 614.8

Е.А. Тищенко, к.т.н, доц., нач. каф., ЧИПБ им. Героев Чернобыля НУГЗУ,
Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор, гл. научн. сотр., НУГЗУ

МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА В С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ

Получены выражения для передаточных функций, описывающих процесс тушения пожара класса В распыленной водой, принадлежащих классу дробно-рациональных функций и обладающих высокой степенью адекватности.

Ключевые слова: пожар класса В, распыленная вода, передаточная функция.

Постановка проблемы. Одним из путей повышения эффективности тушения пожаров класса В является использование в качестве огнетушащего вещества распыленной воды. Техническая реализация такого подхода обуславливает наличие адекватного математического описания процессов, имеющих место при воздействии распыленной воды на горящую жидкость.

Анализ последних исследований и публикаций. Традиционно для такого математического описания используются дифференциальные уравнения в частных производных [1-3]. Однако возможности таких математических моделей ограничены как трудностями, возникающими при получении решения аналитическими методами, так и трудностями, имеющими место при адаптации решений, полученных численными методами. Одним из направлений, связанным с разрешением этих трудностей, является использование кибернетических методов [4], которые предполагают использование в качестве математических моделей процесса тушения пожара класса В распыленной водой, в частности, передаточных функций [5]. В [6] приведены алгоритмы, обеспечивающие получение таких математических моделей в виде иррациональных или дробно-рациональных функций комплексного аргумента. Передаточные функции процесса тушения пожара класса В распыленной водой, представленные в виде иррациональных функций комплексного аргумента, являются точным соответствием решения дифференциального уравнения в частных производных. Представление передаточных функций такого процесса в виде дробно-рациональных функций комплексного аргумента является приближенным и основано на аппроксимации решения дифференциального уравнения, представленного в виде переходной функции. Погрешность аппроксимации может достигать 18,0 % [8].

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является получение математических моделей, описывающих процесс тушения пожара класса В распыленной водой, в виде передаточных функций, имеющих форму дробно-рациональных функций и обладающих повышенной степенью адекватности.

Процесс тушения пожара класса В распыленной водой описывается математической моделью [8]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \tag{1}$$

с начальными и граничными условиями

$$\theta(\xi, 0) = 0; \ \frac{\partial \theta(0,t)}{\partial \xi} = -\frac{arK}{\lambda V\left(T_K - T_0\right)} I(t), \tag{2}$$

где

$$t = V^2 a^{-1} \tau; \ \xi = \mathrm{Va}^{-1} \mathrm{z}; \ \theta = \left(T_K - T\right)\left(\mathrm{T_K} - T_0\right)^{-1}; \tag{3}$$

T, T_K, T_0 – температура горючей жидкости, температура кипения горючей жидкости и температура окружающей среды соответственно; a – коэффициент температуропроводности; V – линейная скорость горения жидкости; λ – теплопроводность горючей жидкости; r – теплота испарения воды; K – коэффициент использования воды; $I(t)$ – интенсивность подачи распыленной воды.

Применяя к (1) и (2) интегральное преобразование Лапласа, получим выражение для передаточной функции процесса тушения пожара класса В распыленной водой как объекта управления системы пожаротушения

$$W(p) = \frac{\theta(0,p)}{I(p)} = \frac{arK}{\lambda V(T_K - T_0)} \left[0{,}5 + (0{,}25 + p)^{0{,}5}\right]^{-1}. \tag{4}$$

Сомножитель передаточной функции (4) или приведенная передаточная функция

$$q = \left[0{,}5 + (0{,}25 + p)^{0{,}5}\right]^{-1} \tag{5}$$

является иррациональной функцией аргумента p, что обуславливает определенные трудности при использовании передаточной функции вида (4).

Снятие таких трудностей возможно путем трансформации (5) в другой класс функций. Наиболее предпочтительным вариантом является представление (5) в виде аппроксимации дробно-рациональной функцией, что может быть реализовано с помощью Паде аппроксимации [9]. В этом случае функция $q = q(p)$ принимает вид

$$q \cong \left[\sum_{i=0}^{m} a_i p^i\right] \left[\sum_{j=0}^{n} b_j p^j\right]^{-1} = q(m,n), \tag{6}$$

где a_i, b_j – параметры аппроксимации, причем $m < n$.

Максимальное значение порядка характеристического полинома приведенной передаточной функции (6), т.е. величины n, определяется из обеспечения необходимого условия устойчивости в соответствии с критерием Гурвица, согласно которому необходимо, чтобы

$$b_j > 0,\ j = \overline{0, n}. \tag{7}$$

В табл. 1 приведены значения параметров a_i, b_j для Паде аппроксимации $q(n-1, n)$ функции (5), которая реализована в среде Maple.

Табл. 1. Значения параметров Паде аппроксимации

i, j	*q(3,4)*		*q(4,5)*		*q(5,6)*		*q(6,7)*		*q(7,8)*		*q(8,9)*	
	a_i	b_j	a_i	b_j	a_i	b_j	a_i	b_j	a_i	b_j	a_i	b_j
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0
2	10,0	15,0	21,0	28,0	36,0	45,0	55,0	66,0	78,0	91,0	105,0	120,0
3	4,0	10,0	20,0	35,0	56,0	84,0	120,0	165,0	220,0	286,0	364,0	455,0
4		1,0	5,0	15,0	35,0	70,0	126,0	210,0	330,0	495,0	715,0	1001,0
5				1,0	6,0	21,0	56,0	126,0	252,0	462,0	794,0	1287,0
6						1,0	7,0	28,0	84,0	270,0	462,0	924,0
7								1,0	8,0	36,0	120,0	330,0
8										1,0	9,0	45,0
9												1,0

На рис. 1 приведены зависимости $q(p)$ и $q(3{,}4) = f(p)$, а на рис. 2 – зависимости $q(p)$ и $q(8{,}9) = \varphi(p)$, которые иллюстрируют степень совпадения зависимости (5) и её Паде аппроксимации (6) от порядка характеристического полинома.

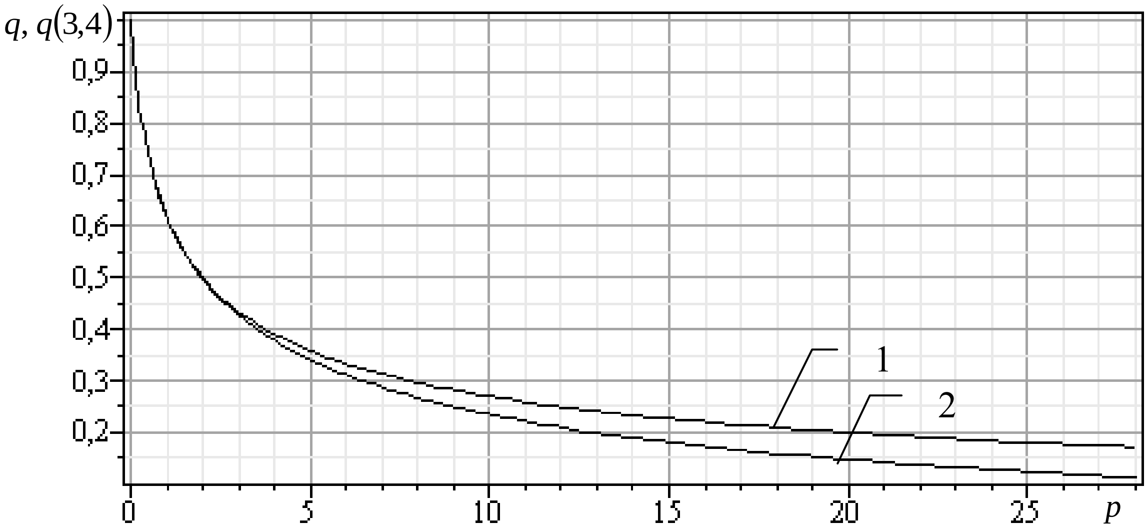

Рис. 1. Зависимости $q(p)$ **и** $q(3{,}4) = f(p)$: $1 - q$; $2 - q(3{,}4)$

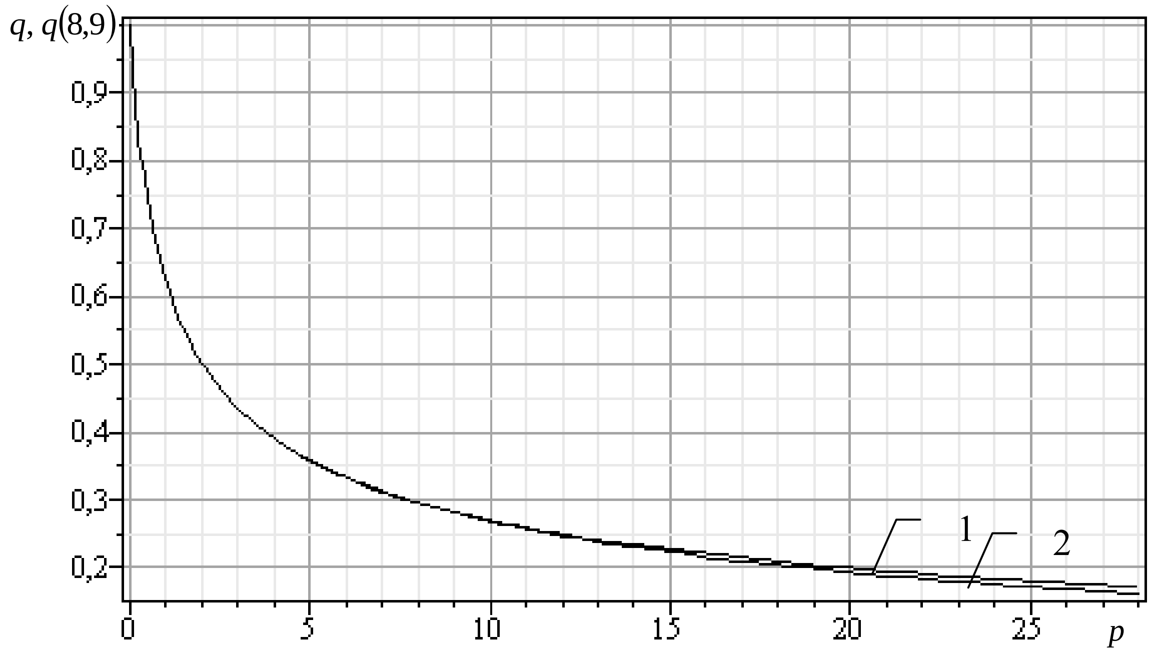

Рис. 2. Зависимости $q(p)$ **и** $q(8{,}9)=\varphi(p)$: $1-q$; $2-q(8{,}9)$

Для принятия решения о выборе количественных показателей Паде аппроксимации (6) целесообразно перейти к временным зависимостям. С этой целью выражение для $q(m,n)$ перепишем следующим образом

$$q(m,n)=\left[\sum_{i=0}^{m}a_i p^i\right]\left[\sum_{j=0}^{n}b_i p^j\right]^{-1}=\left[\sum_{i=0}^{m}a_i p^i\right]\times$$
$$\times\left[b_n\prod_{j=1}^{n}(p-p_j)\right]^{-1}=\sum_{j=1}^{n}A_j(p-p_j)^{-1}, \tag{8}$$

где $p_j,\ j=\overline{i,n}-$ корни характеристического полинома; A_j – параметры, значения которых определяются в соответствии с методом неопределенных коэффициентов [10]. В соответствии с этим методом параметры A_j определяются из уравнения

$$\sum_{j=1}^{n}A_j\prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{n}(p-p_k)=\sum_{i=0}^{m}a_i p^i, \tag{9}$$

путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях переменной p, расположенных слева и справа в уравнении (9). В этом уравнении p_k – корни характеристического полинома, а также учтено, что $b_n=1{,}0$.

Вследствие того, что имеет место [11]

$$q(m,n) = L\left[w(m,n,t)\right], \tag{10}$$

где $w(m,n,t)$ – импульсная переходная функция; L – оператор интегрального преобразования Лапласа, то можно записать

$$w(m,n,t) = L^{-1}\left[q(m,n)\right] = \sum_{j=1}^{n} A_j \exp(p_j t), \tag{11}$$

где L^{-1} – оператор обратного интегрального преобразования Лапласа.

Единичная переходная функция $q(m,n,t)$ и импульсная переходная функция $w(m,n,t)$ связаны между собой соотношением [11]

$$q(m,n,t) = \int_0^t w(m,n,\tau)d\tau, \tag{12}$$

вследствие чего имеет место

$$\begin{aligned} q(m,n,t) &= \int_0^t \sum_{j=1}^{n} A_j \exp(p_j \tau)d\tau = \sum_{j=1}^{n} A_j p_j^{-1}\left[1 - \exp(-p_j t)\right] = \\ &= 1 - \sum_{j=1}^{n} A_j p_j^{-1} \exp(-p_j t) \end{aligned} \tag{13}$$

где учтено условие нормировки, т.е.

$$\sum_{j=1}^{n} A_j p_j^{-1} = 1. \tag{14}$$

В табл. 2 приведены значения параметров переходных функций (13) для $m = n - 1$, $n = 8$ и $n = 9$.

На рис. 3 и рис. 4 приведены графические зависимости для погрешностей $\delta(m,n,t)$

$$\delta(m,n,t) = q(t) - q(m,n,t), \tag{15}$$

где

$$q(t) = L^{-1}\left[q(p)\right] = 1 + \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp(-0{,}25t) - (1 + 0{,}5t)ertc(0{,}5\sqrt{t}). \tag{16}$$

Табл. 2. Значения параметров переходных функций

j	$n = 8$		$n = 9.$	
	$A_j p_j^{-1}$	p_j^{-1}	$A_j p_j^{-1}$	p_j^{-1}
1	0,232	29,37	0,21	36,66
2	0,22	3,34	0,20	4,15
3	0,19	1,26	0,17	1,55
4	0,15	0,69	0,15	0,84
5	0,11	0,46	0,114	0,55
6	0,06	0,35	0,08	0,40
7	0,03	0,29	0,05	0,32
8	0,008	0,26	0,02	0,28
9			0,006	0,26

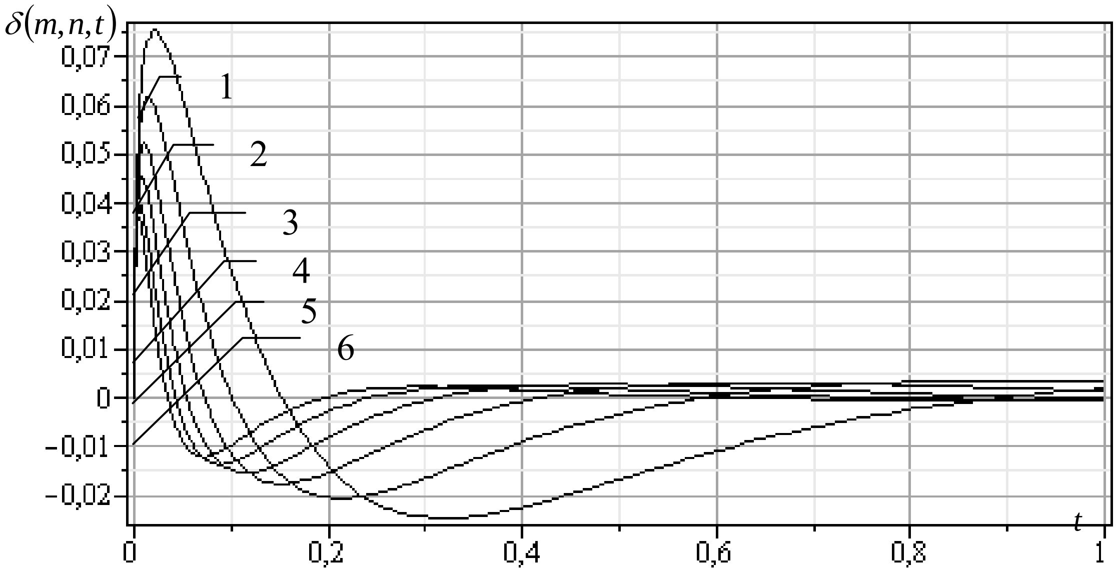

Рис. 3. Зависимость $\delta(m,n,t)$: $1 - m = 3, n = 4$; $2 - m = 4, n = 5$; $3 - m = 5, n = 6$; $4 - m = 6, n = 7$; $4 - m = 6, n = 7$; $6 - m = 8, n = 9$.

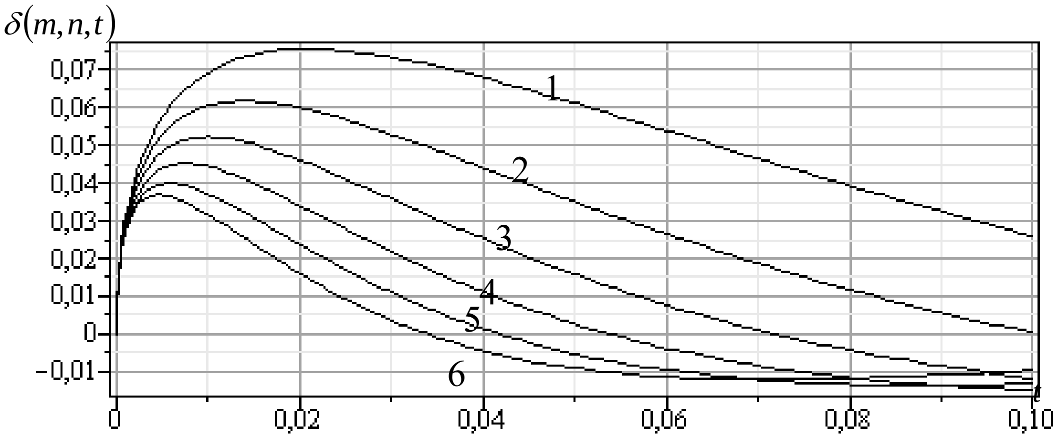

Рис. 4. Фрагмент зависимости $\delta(m,n,t)$: $1 - m = 3, n = 4$; $2 - m = 4, n = 5$; $3 - m = 5, n = 6$; $4 - m = 6, n = 7$; $4 - m = 6, n = 7$; $6 - m = 8, n = 9$

Анализ этих зависимостей свидетельствует о том, что погрешность рассогласования $\delta(m,n,t)$ имеет наибольшее значение при малых значениях времени и для $m\in$ [3,8], $n\in$[4,9] лежит в диапазоне (3,7$\div$7,5)%. На рис. 5 приведена зависимость максимального значения погрешности рассогласования $\delta_m(m,n)$ при $m=n-1$ от порядка характеристического полинома n.

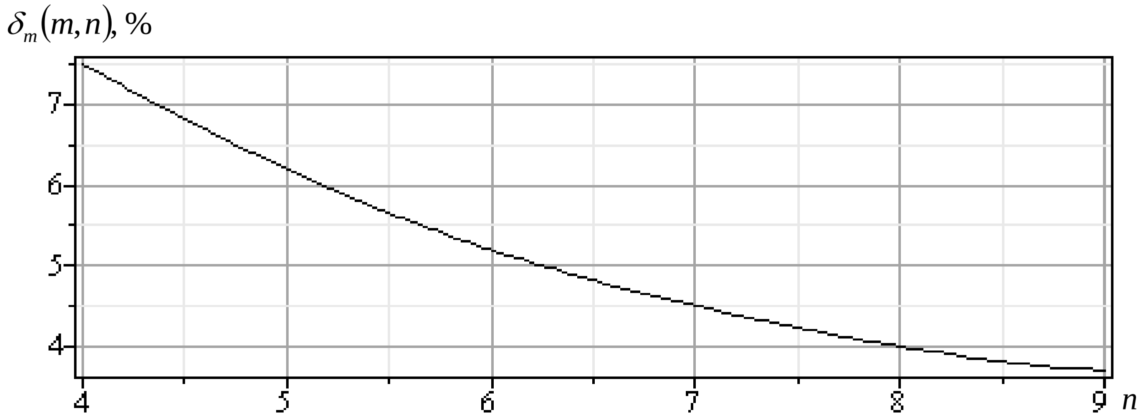

Рис. 5. Зависимость $\delta_m(m,n)=f(n)$

Зависимость, приведенная на рис. 5, может быть использована для выбора порядка характеристического полинома аппроксимации приведенной передаточной функции (6). Параметры этой аппроксимации, т.е. параметры a_i, b_j, определяются путем Паде аппроксимации с использование среды Maple и их значения для $m=n-1$, $n\in[4{,}9]$ приведены в табл. 1.

Выводы. Применительно к пожарам класса В, тушение которых осуществляется распыленной водой, получены математические модели, принадлежащие к классу передаточных и переходных функций. Передаточные функции представлены в виде дробно-рациональных функций, которые являются Паде аппроксимацией иррациональной функции комплексного аргумента. Порядок характеристического полинома дробно-рациональной функции определяется необходимым условием устойчивости в соответствии с критерием Гурвица, а также требуемой степенью адекватности. Использование Паде аппроксимации для иррациональной передаточной функции позволяет обеспечить погрешность аппроксимации в диапазоне (3,7$\div$7,5)%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fuchs P. On the extinguishing effect of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels / P. Fuchs // Fire safity J. – 1984. – vol. 7. – P. 165-275.

2. Горшков В.Н. Тушение горючих жидкостей распыленной водой / В.Н. Горшков // Юб. сб. трудов ВНИИПО. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – С. 384-413.

3. Садковой В.П. Упрощенная математическая модель объекта управления систем автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // Науковий вісник будівництва. – Х.: ХДТУБА, 2007. – вип. 43. – С. 142-148.

4. Садковой В.П. Концептуальные основы построения систем автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации. ЧС-2006: материалы докл. межд. НПК.- Гомель: ГИИ, 2006. – С. 185-186.

5. Садковой В.П. Модели обьекта управления системы автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // Актуальні проблеми технічних та природничих наук у забезпеченні цивільного захисту: матеріали II міжвузівської НПК. – Черкаси: АПБ, 2009. – С. 31-33.

6. Абрамов Ю.А. Алгоритм определения динамических свойств пожаров класса В при их тушении распыленной водой / Ю.А. Абрамов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – Сб. матер. НПК. – Воронеж: ДГБОУ ВПО Воронежский ин-т ГПС МЧС России, 2012.- С. 195-196.

7. Садковой В.П. Выбор модели объекта управления в системе ослабления последствий чрезвычайных ситуаций / В.П. Садковой // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: УЦЗУ, 2007. – Вип. 6. – С. 115-120.

8. Абрамов Ю.А. Динамические характеристики пожара класса В при его тушении распыленной водой / Ю.А. Абрамов // Пожежна безпека: теорія і практика. – Черкаси: АПБ, 2012. – С. 352-355.

9. Baker G. Pade Approximants / G. Baker, P. Graves-Morris. – London: AWP Co., 1981. – 496 p.

10. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

11. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХПТУ,1993. – 288 с.

Є.О. Тищенко, Ю.О. Абрамов

Моделі процесу гасіння пожежі класу В з використанням розпиленої води

Отримано вирази для передаточних функцій, що описують процес гасіння пожежі класу В розпиленою водою, що належать класу дробово-раціональних функцій і мають високий ступінь адекватності.

Ключові слова: пожежа класу В, розпилена вода, передаточна функція.

E.A. Tishchenko, Yu.A. Abramov

The model of the process of fire extinguishing of class B with the use of atomized water

The expressions for the transfer functions describing the process of fire extinguishing of class b sprayed water, belong to the class of fractional-rational functions and having a high degree of adequacy.

Keywords: fire class b, water fog, transfer function.