

## **ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

*Представлена математическая модель, характеризующая зависимость вероятности нанесения ущерба от параметров развития пожара во времени, а также характеристик его обнаружения и тушения.*

*Ключевые слова: стохастическая модель, обнаружение пожара, система противопожарной защиты.*

### *V.A. Fyodorov, T.A. Butcinskaya, Bui Xuan Hoa* **PROBABILITY MODEL OF DETECTION AND EXTINGUISHING FIRE IN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

*Presents a mathematical model that characterizes the probability of damage to the parameters of the fire in time, as well as the characteristics of its detection and extinguishing.*

*Key words: stochastic model, detection the fire, fire protection system.*

Учитывая значительное разнообразие условий возникновения, развития и тушения пожара на промышленном предприятии, а также случайный характер большого количества влияющих на пожар факторов, целесообразно построение вероятностной модели функционирования системы противопожарной защиты.

Продолжительность ликвидации пожара с момента его возникновения  $t_T$  может быть определена как сумма времени его обнаружения  $t_0$ , времени развёртывания сил и средств тушения пожара  $t_3$  и длительности интенсивного тушения  $t_{ит}$ , определяемого, в основном, площадью горения и эффективностью тушения, связанной с выбранным способом тушения, а также видом применяемого огнетушащего вещества:

$$t_T = t_0 + t_3 + t_{ит}. \quad (1)$$

Считая, что в производственном помещении площадь горения  $S_T$  линейно зависит от скорости распространения пожара  $V_p$ , можно записать:

$$t_3 + K_1 S_T = t_3 + K_1 K_\phi V_p (t_0 + t_3) = K_1 K_\phi V_p t_0 + t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p),$$

где  $K_1$  – коэффициент пропорциональности;

$K_\phi$  – коэффициент формы.

С учётом (1) для  $t_T$  получаем выражение:

$$t_T = (t_0 + t_3)(1 + K_1 K_\phi V_p). \quad (2)$$

Следует отметить, что выражение (2) в общем случае отражает временные процессы обнаружения и тушения пожара. Для конкретных условий развития очага горения и его тушения оно может быть дополнено или могут не учитываться параметры, имеющие слабое влияние на результат расчётов.

В выражении (2) считаем, что значения  $K_1$ ,  $K_\phi$ ,  $V_p$ ,  $t_3$  могут быть количественно определены, исходя из параметров производственного помещения, ви-

да и распределения горючей нагрузки в нём, используемого способа пожаротушения;  $t_0$  является случайной величиной.

Следовательно,  $t_T$ , представляя собой функцию случайной величины, также является величиной случайной.

Если из эксперимента или статистических наблюдений известна мгновенная плотность вероятности обнаружения очага пожара извещателем конкретного вида за элементарный промежуток времени  $g_0$ , то функция плотности вероятности обнаружения пожара от времени определяется показательным законом [2]:

$$f(t_0) = \begin{cases} g_0 e^{-g_0 t_0}, & \text{при } t_0 \geq 0 \\ 0, & \text{при } t_0 < 0. \end{cases}$$

Определим функцию плотности вероятности для времени ликвидации пожара  $t_T$ , которая, в соответствии с [3], для монотонной функции случайной величины будет рассчитываться по формуле:

$$f(t_T) = f(\psi(t_T)) |\psi'(t_T)|, \quad (3)$$

где  $\psi(t_T)$  – обратная функция по отношению к  $t_T$ , выраженная из (3):

$$\psi(t_T) = t_T (1 + K_1 K_\phi V_p)^{-1} - t_3. \quad (4)$$

Функция (4) также монотонна:

$$\left| \frac{d\psi'(t_T)}{dt_T} \right| = (1 + K_1 K_\phi V_p)^{-1}.$$

Следовательно, в соответствии с выражением (3)

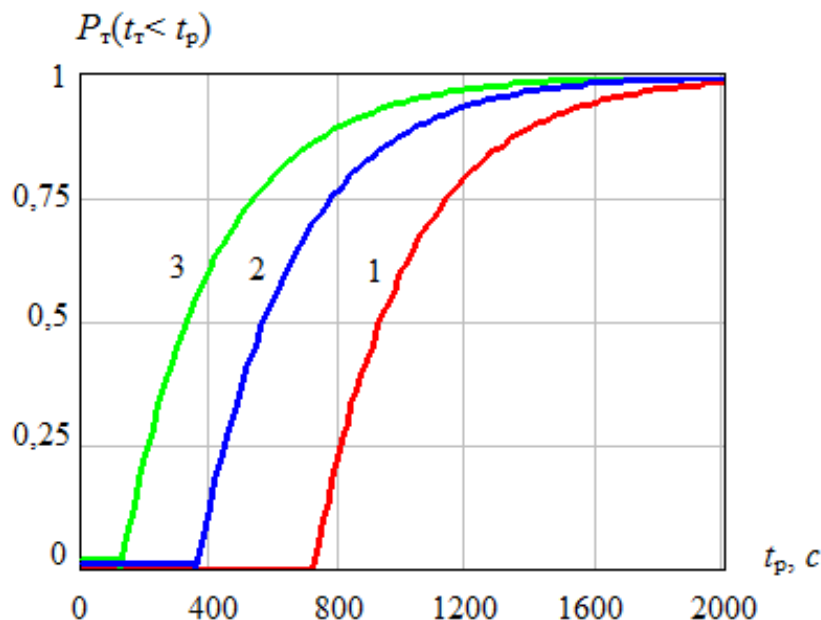
$$f(t_T) = \begin{cases} g_0 (1 + K_1 K_\phi V_p) e^{-g_0 [t_T (1 + K_1 K_\phi V_p)^{-1} - t_3]}, & \text{при } t_T \geq t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p) \\ 0, & \text{при } t_T < t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p). \end{cases}$$

Вероятность ликвидации пожара за время  $t_T < t_p$ :

$$P_T(t_T < t_p) = \int_{t_3(1+K_1K_\phi V_p)}^{t_p} f(t_T) dt_T = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{g_0 [t_p - t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p)]}{1 + K_1 K_\phi V_p}}, & \text{при } t_p \geq t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p) \\ 0, & \text{при } t_p < t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p). \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $t_p$  – "разрешающее время", при котором развитие очага пожара не приводит к существенному ущербу.

График зависимости (5) приведён на рис. 1. Значение  $P_T = 0$  на начальном этапе графиков соответствует периоду, когда тушение очага пожара с учётом его развития за время с начала появления, затем обнаружения и организации тушения не превышает разрешающее время  $t_p$ . Превышение этого времени приводит к увеличению вероятности появления ущерба от пожара  $C_y$ .



**Рис. 1.** Зависимость  $P_T(t_T < t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при следующих значениях параметров:  
 $g_0 = 0,02 \text{ с}^{-1}$ ;  $K_1 K_\phi V_p = 5$  ( $K_1 = 10 \text{ с/м}^2$ ;  $K_\phi = 5 \text{ м}$ ;  $V_p = 0,1 \text{ м/с}$ );  
 1 -  $t_3 = 20 \text{ с}$ ; 2 -  $t_3 = 60 \text{ с}$ ; 3 -  $t_3 = 120 \text{ с}$

Критерием "несущественности" ущерба может служить наличие прибыли от применения системы противопожарной защиты [1], что соответствует выполнению следующего неравенства:

$$C_y \leq C_0 P_{\text{п}} P_o \alpha - C_{\text{от}},$$

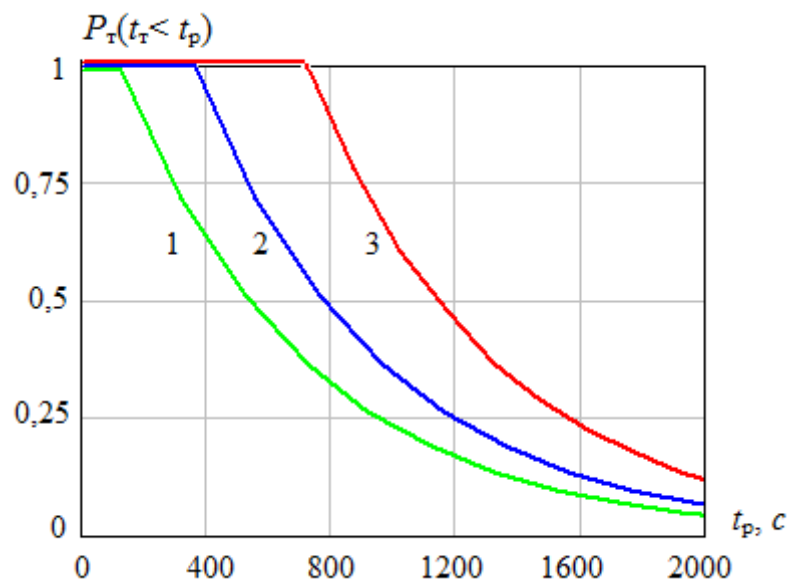
где  $C_0$  – стоимость материальных ценностей, защищаемых системой;  
 $P_{\text{п}}$  – вероятность возникновения пожара;  
 $P_o$  – вероятность обнаружения пожара;  
 $\alpha$  – коэффициент, характеризующий степень убытков от пожара;  
 $C_{\text{от}}$  – затраты на организацию тушения пожара.

Соответственно, вероятность неликвидации пожара за время  $t_T < t_p$ , то есть вероятность появления ущерба [3], будет вычисляться по формуле:

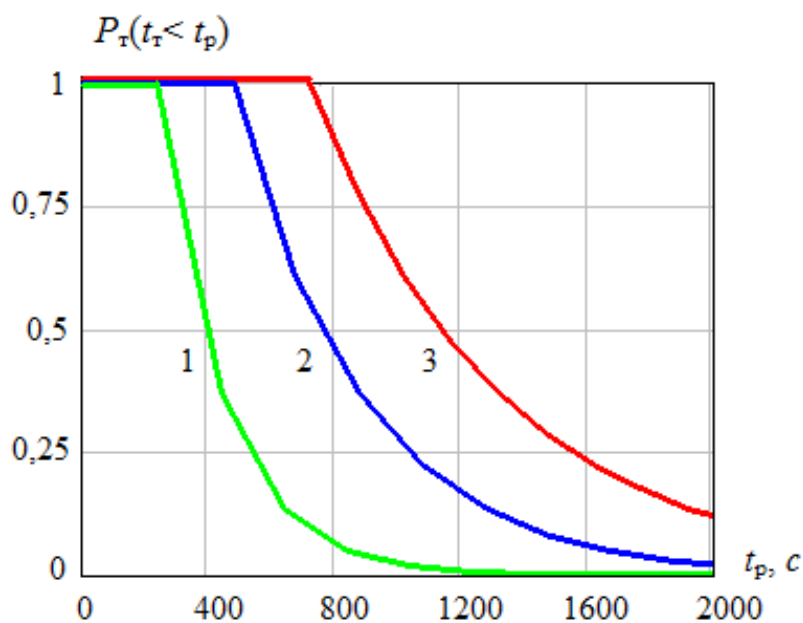
$$P_T(t_T > t_p) = 1 - P_T(t_T < t_p) = \begin{cases} e^{-\frac{g_0 [t_p - t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p)]}{1 + K_1 K_\phi V_p}}, & \text{при } t_p \geq t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p) \\ 1, & \text{при } t_p < t_3 (1 + K_1 K_\phi V_p). \end{cases} \quad (6)$$

Рассмотрим подробнее выражение (6) и определим характер влияния на  $P_T(t_T > t_p)$  входящих в него параметров.

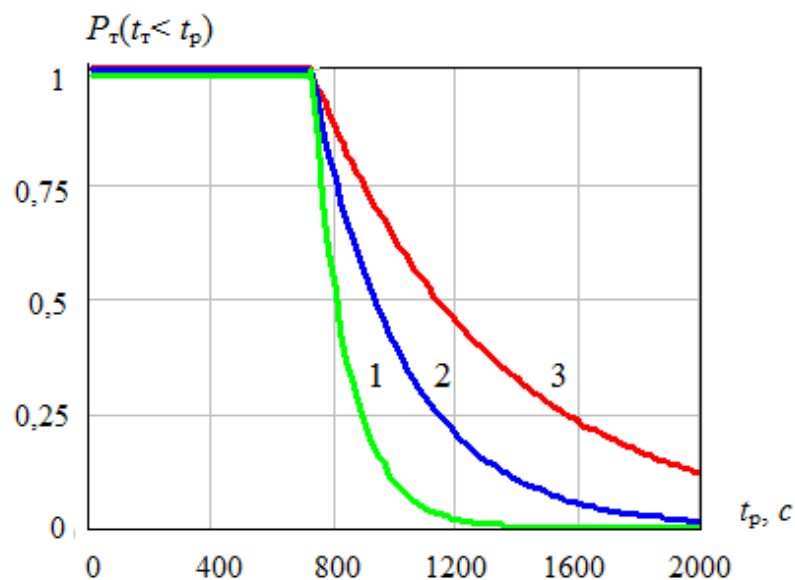
На рис. 2-4 представлены графики зависимостей вероятности существенного ущерба от разрешающего времени  $t_p$  для различных значений параметров.



**Рис. 2.** Зависимость  $P_{\tau}(t_{\tau} > t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при следующих значениях параметров:  
 $g_0 = 0,01 \text{ c}^{-1}$ ;  $K_1 K_{\phi} V_p = 5$  ( $K_1 = 10 \text{ c/m}^2$ ;  $K_{\phi} = 5 \text{ м}$ ;  $V_p = 0,1 \text{ м/с}$ );  
 1 -  $t_3 = 20 \text{ с}$ ; 2 -  $t_3 = 60 \text{ с}$ ; 3 -  $t_3 = 120 \text{ с}$



**Рис. 3.** Зависимость  $P_{\tau}(t_{\tau} > t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при следующих значениях параметров:  
 $g_0 = 0,01 \text{ c}^{-1}$ ;  $t_3 = 120 \text{ с}$ ;  
 1 -  $K_1 K_{\phi} V_p = 1$ ; 2 -  $K_1 K_{\phi} V_p = 3$ ; 3 -  $K_1 K_{\phi} V_p = 5$



**Рис. 4.** Зависимость  $P_T(t_T > t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при следующих значениях параметров:

$$g_0 = 0,02 \text{ c}^{-1}; K_1 K_\phi V_p = 5; t_3 = 120 \text{ c};$$

$$1 - g_0 = 0,05 \text{ c}^{-1}; 2 - g_0 = 0,02 \text{ c}^{-1}; 3 - g_0 = 0,01 \text{ c}^{-1}$$

На графиках заметно существенное влияние параметров обнаружения и тушения пожара на вероятность  $P_T(t_T > t_p)$ . Минимизация вероятности существенного ущерба может быть достигнута для заданной пожарной нагрузки за счёт повышения вероятности обнаружения пожара, а также уменьшения времени задержки организации его тушения. Время задержки  $t_3$  может быть существенно уменьшено благодаря применению автоматических установок пожаротушения.

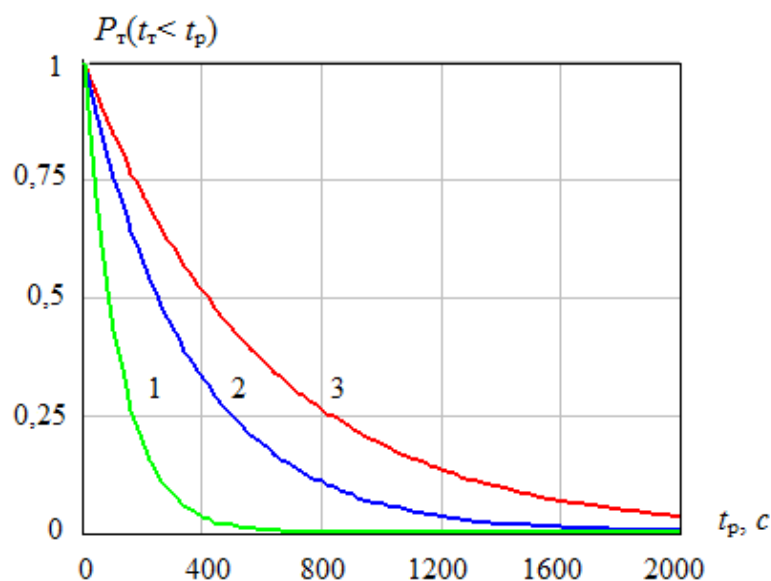
На рис. 5 представлена зависимость  $P_T(t_T > t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при отсутствии задержки организации тушения ( $t_3 = 0$ ), на рис. 6 – зависимость  $P_T(t_T > t_p)$  от параметра обнаружения при фиксированных параметрах развития пожара и разрешающего времени ( $t_p = 400 \text{ c}$ ). Из графика следует, что увеличение мгновенной вероятности обнаружения пожара  $g_0$  приводит к резкому снижению вероятности ущерба.

Таким образом, повышение эффективности обнаружения пожара позволяет в значительной степени обеспечить его тушение на ранней стадии при незначительном ущербе.

Следует, однако, отметить, что вероятность обнаружения пожара зависит от ряда факторов, прежде всего, от правильного выбора вида извещателей по обнаруживаемому фактору пожара, их технического состояния и применяемого метода обработки сигнала в извещателе и системе сигнализации, а также оптимального размещения извещателей на защищаемом объекте.

Проведённый анализ показывает, что представленная математическая модель адекватно отражает процессы функционирования системы противопожарной защиты промышленного объекта. Она может быть использована для сравнительной оценки эффективности применяемых в системе противопожарной защиты средств сигнализации и тушения. Вместе с тем для проведения

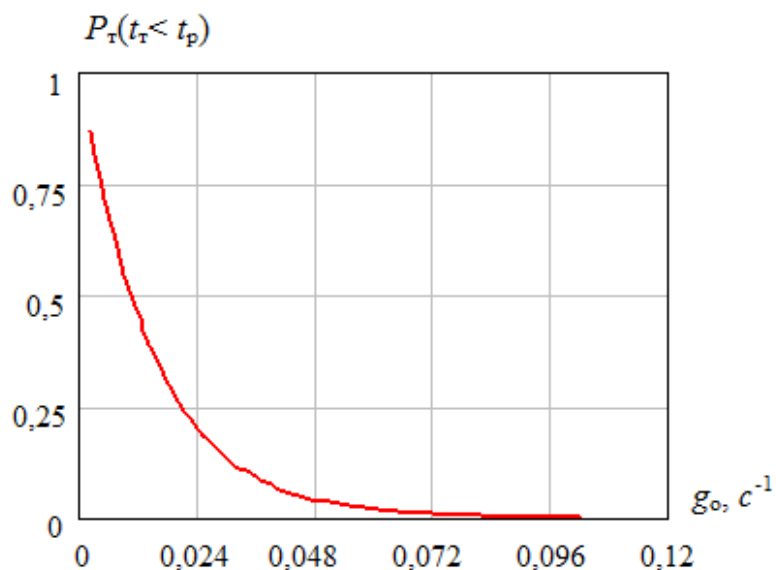
конкретных аналитических оценок с использованием данной модели на конкретном объекте необходимо определение количественных значений входящих в неё параметров.



**Рис. 5.** Зависимость  $P_{\tau}(t_{\tau} > t_p)$  от разрешающего времени  $t_p$  при следующих значениях параметров:

$$K_1 K_{\phi} V_p = 5; t_3 = 0 \text{ с};$$

$$1 - g_0 = 0,05 \text{ с}^{-1}; 2 - g_0 = 0,02 \text{ с}^{-1}; 3 - g_0 = 0,01 \text{ с}^{-1}$$



**Рис. 6.** Зависимость  $P_{\tau}(t_{\tau} > t_p)$  от мгновенной вероятности обнаружения при следующих значениях параметров:  $K_1 K_{\phi} V_p = 5; t_3 = 0 \text{ с}; t_p = 400 \text{ с}$

### Литература

1. Шаровар Ф.И. Устройства и системы пожарной сигнализации. М.: Стройиздат, 1985.
2. Шаровар Ф.И. Принципы построения устройств и систем автоматической пожарной сигнализации. М.: Стройиздат, 1983.
3. Новые методы и технические средства обнаружения пожара / Членов А.Н. и др. М.: Академия ГПС МЧС России, 2007.