

В. И. ПРИСАДКОВ, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: z080637@yandex.ru)

С. В. МУСЛАКОВА, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: k708@yandex.ru)

И. В. КОСТЕРИН, канд. техн. наук, начальник отделения организации научных исследований экспертно-консалтингового отдела, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (Россия, 153040, г. Иваново, просп. Строителей, 33; e-mail: kosteriniv@gmail.com)

В. Е. ФАДЕЕВ, старший инспектор нормативно-технического отдела, Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России (Россия, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1; e-mail: fadeev_v@mail.ru)

А. М. ШАМАЕВ, заместитель начальника отдела надзорной деятельности по городу Реутову Московской области, Управление надзорной деятельности ГУ МЧС России по Московской области (Россия, 143964, Московская область, г. Реутов, ул. Ленина, 12, e-mail: z080637@yandex.ru)

УДК 64.841

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ С ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

На основе критерия приведенных затрат и стохастических представлений о пожарах разработаны теоретические основы выбора экономически целесообразных вариантов противопожарной защиты зданий. При этом исследуются два основных элемента защиты зданий: противопожарные преграды и автоматические установки пожаротушения. Установлены области экономического предпочтения использования автоматического пожаротушения относительно противопожарных преград с учетом технико-экономических показателей элементов защиты. Разработаны теоретические основы инженерного метода расчета рациональных вариантов противопожарной защиты помещений зданий, включающей противопожарные преграды и автоматические установки пожаротушения. Предложен аналитический подход к оценке надежности строительных конструкций, учитывающий как стохастические параметры конструкций, так и параметры помещений, в которых они используются, а также характеристики пожарной нагрузки в помещениях.

Ключевые слова: объекты с экономической ответственностью; критерий приведенных затрат; метод оценки надежности; противопожарные преграды; инженерный метод выбора; рациональный вариант противопожарной защиты; ущерб.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57

Можно констатировать, что за последние три десятилетия выработаны общие принципы гибкого нормирования систем противопожарной защиты объектов при учете материальных потерь при пожарах [1–7]. Вместе с тем практическая реализация такого подхода затруднена отсутствием достоверных данных по эффективности противопожарных мероприятий и оценкам материальных последствий пожаров. Зачастую это делается экспертным путем, в лучшем случае — по статистическим данным по пожарам. Причинами подобного положения дел послужили следующие факторы:

- 1) случайный характер процессов реальных пожаров и борьбы с ними; разбросы парамет-

ров строительных конструкций и характеристик инженерных средств противопожарной защиты [15–19];

- 2) отсутствие инженерных средств оценки и сравнения эффективности отдельных противопожарных мероприятий, позволяющих установить области рационального применения соответствующих мероприятий.

В связи с этим в статье ставится задача разработать теоретические основы инженерного метода выбора рациональных вариантов защиты объектов с экономической ответственностью при условии выполнения требований Технического регламента о требованиях пожарной безопасности [6].

Таблица 1. Расчетные варианты защиты и ущерб от пожара

Вариант	Мероприятие	Дополнительные затраты Z_i , руб.	Материальные потери U_Σ , тыс. руб.
Базовый	Устройство противопожарной перегородки	0	$U_1 + (1 - R_0)U_2$
1-й	Устройство противопожарной стены 1-го типа на месте перегородки	Z_1	$U_1 + (1 - R_1)U_2$
2-й	Повышение пределов огнестойкости перегородки до EI 150	Z_2	$U_1 + (1 - R_2)U_2$
3-й	Защита первого помещения АУП	Z_3, Z_τ	$U_1^A P_A + U_1(1 - P_A)R_0 + (U_1 + U_2)(1 - P_A)(1 - R_0)$

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: Z_i — капитальные затраты на i -е противопожарное мероприятие, $i = 1, 2, 3$; Z_τ — текущие затраты на сопровождение автоматических установок пожаротушения (АУП) в течение года; U_1, U_2 — прямые потери (материальный ущерб) по оборудованию, материалам продукции и по зданию при пожаре соответственно в 1-м и 2-м помещениях; U_1^A — потери при пожаре в первом помещении при успешном тушении пожара АУП; P_A — надежность выполнения задачи АУП; R_0 — надежность перегородки; R_1 — надежность противопожарной стены 1-го типа; R_2 — надежность перегородки после проведения работ по повышению ее предела огнестойкости до EI 150.

При этом будет использован вероятностный подход (анализ), позволяющий не только более адекватно учесть физику процессов, но и несколько снизить требования к точности данных по сравнению с детерминированным анализом [20, 21].

В качестве примера рассмотрим два смежных помещения, расположенных в одноэтажном здании II степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0. Помещения разделены противопожарной перегородкой 1-го типа с противопожарными дверями.

Без потери общности при анализе материального ущерба от пожаров оценим последствия пожаров при их возникновении в первом помещении, частота которых P_0 (год⁻¹). Рассмотрим три варианта дополнительных противопожарных мероприятий (табл. 1).

Материальные потери, приведенные в табл. 1, получены на основе рассмотрения сценариев пожара, описываемых деревьями событий [2] для указанных в табл. 1 вариантов защиты. Иные противопожарные мероприятия по защите помещений здания считаются одинаковыми для рассматриваемых вариантов.

Для выбора рационального варианта защиты используем критерий приведенных затрат K_i [8], записанный в виде

$$K_i = P_0 U_\Sigma + E Z_i + Z_\tau, \quad (1)$$

где E — коэффициент эффективности капиталовложений, принимаемый равным 0,12 год⁻¹;

Z_τ — текущие затраты на противопожарные мероприятия, например эксплуатационные затраты на АУП в течение года.

Таким образом, критерии K для базового (K_0), 1-го (K_1), 2-го (K_2) и 3-го (K_3) вариантов защиты запишем в виде:

$$\begin{aligned} K_0 &= (U_1 + (1 - R_0) U_2) P_0; \\ K_1 &= (U_1 + (1 - R_1) U_2) P_0 + E Z_1; \\ K_2 &= (U_1 + (1 - R_2) U_2) P_0 + E Z_2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$K_3 = (U_1^A P_A + (1 - P_A)(U_1 + (1 - R_0) U_2) + E Z_A + Z_\tau,$$

где Z_A — материальный ущерб при пожаре.

Опустив малую величину $U_1^A P_A$ и перейдя к относительным величинам

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \frac{U_1}{B + C}; & \bar{Z}_3 &= \frac{\Delta Z_3}{B + C}; & \bar{K}_3 &= \frac{K_3}{B + C}; \\ \bar{U}_2 &= \frac{U_2}{B + C}; & \bar{K}_0 &= \frac{K_0}{B + C}; & \bar{Z}_\tau &= \frac{Z_\tau}{B + C}; \\ \bar{Z}_1 &= \frac{Z_1}{B + C}; & \bar{K}_1 &= \frac{K_1}{B + C}; & \bar{U}_1^A &= \frac{U_1^A}{B + C}, \\ \bar{Z}_2 &= \frac{Z_2}{B + C}; & \bar{K}_2 &= \frac{K_2}{B + C}; \end{aligned} \quad (3)$$

запишем соотношения (2) в виде:

$$\begin{aligned} \bar{K}_0 &= P_0 (\bar{U}_1 + (1 - R_0) \bar{U}_2); \\ \bar{K}_1 &= P_0 (\bar{U}_1 + (1 - R_1) \bar{U}_2) + E \bar{Z}_1; \\ \bar{K}_2 &= P_0 (\bar{U}_2 + (1 - R_2) \bar{U}_2) + E \bar{Z}_2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{K}_3 = P_0 (1 - P_A) (U_1 + (1 - R_0) U_2) + E \bar{Z}_3 + Z_\tau,$$

где B — стоимость здания;

C — стоимость материальных ценностей в здании (оборудование, продукция).

При выборе рационального варианта защиты следует ввести ограничение на допустимую величину капитальных затрат на противопожарные мероприятия:

$$\bar{Z}_i \leq \bar{Z}_{\text{пред}}, \quad (5)$$

где $\bar{Z}_{\text{пред}}$ — предельные относительные затраты, устанавливаемые для каждого объекта индивидуально, в том числе с учетом текущего состояния пожарной безопасности объекта [9].

Рациональный вариант противопожарной защиты соответствует номеру i ($i = 0, 1, 2, 3$), обеспечивающему при ограничении (5)

$$\min_i K_i. \quad (6)$$

Для иллюстрации рассмотрим следующий пример выбора рационального варианта противопожарной защиты объекта, основанный на экспертных данных.

Пример 1

Исходные данные:

$$\begin{array}{l|l|l} \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = 0,5; & E = 0,12 \text{ год}^{-1}; & P_A = 0,8; \\ R_0 = 0,6; & \bar{Z}_1 = 0,02; & \bar{Z}_{\text{пред}} = 0,04. \\ R_1 = 0,95; & \bar{Z}_2 = 0,005; & \\ R_2 = 0,9; & \bar{Z}_3 = 0,03; & \end{array}$$

В силу относительной малости величин далее принимается $\bar{Z}_T \approx 0$.

Подставляя исходные данные в формулы (6), получим оценки критерия приведенных затрат для рассмотренных вариантов защиты (табл. 2).

Экономически обоснованным для данного примера является 3-й вариант противопожарной защиты, включающий устройство автоматической системы пожаротушения, которому соответствует минимальное значение критерия $\bar{K}_3 = 0,64 \cdot 10^{-2}$ при $P_A = 0,8$.

Полученное значение $\bar{K}_3$ достаточно устойчиво к изменениям P_A . Например, при уменьшении надежности выполнения задачи АУП до $P_A = 0,6$ критерий $\bar{K}_3$ будет равен $0,92 \cdot 10^{-2}$, оставаясь самым низким из величин $\bar{K}_0, \bar{K}_1, \bar{K}_2$.

Положениями СП 5.13130.2009 (Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования) установлено, что, начиная с определенных площадей помещений, объекты защиты подлежат оборудованию автоматическими установками пожаротушения. Размеры площадей указаны в нормах в зависимости от функционального назначения зданий, расположения этажей и т. д.

Для ограничения площади помещений (склада, цеха, торгового центра) часто применяют противопожарные преграды как альтернативные АУП технические решения.

Таблица 2. Значение критерия приведенных затрат $\bar{K}$ для различных вариантов противопожарных затрат i ($i = 0, 1, 2, 3$)

Вариант	Критерии, $\bar{K} \cdot 10^2$	Дополнительные затраты $\bar{Z}$
Базовый	1,4	0
1-й	1,29	0,02
2-й	1,16	0,005
3-й	0,64 ($P_A = 0,8$); 0,92 ($P_A = 0,6$)	0,03

Научно-практический интерес в этом случае заключается в ответе на вопрос: при каких условиях АУП использовать более целесообразно, чем противопожарные преграды. Ответ на вопрос наглядно представлен в примере 2.

Пример 2

Рассматривается одноэтажное здание, для которого возможны два варианта противопожарной защиты (при прочих равных условиях):

- 1) деление здания на две примерно равные пожарные секции противопожарной перегородкой, надежность которой R , а стоимость устройства — $Z_{\text{п}}$;
- 2) устройство в здании автоматической системы пожаротушения с капитальными затратами Z_A и надежностью выполнения задачи P_A .

Запишем соответствующие критерии приведенных затрат, воспользовавшись оценками (4). При этом примем, что $\bar{U}_1 \approx \bar{U}_2 \approx \bar{U}$ — половина возможных материальных потерь при пожаре на объекте; $\bar{U}_1^A \approx 0$; $\bar{Z}_T \approx 0$; P_0 — вероятность возникновения пожара в одной секции. Тогда получим:

$$\begin{aligned} \bar{K}_1 &= 2P_0(\bar{U} + (1-R)\bar{U}) + E\bar{Z}_{\text{п}} = \\ &= 2P_0\bar{U}(2-R) + E\bar{Z}_{\text{п}}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_2 &= 2P_0(1-P_A)2\bar{U} + EZ_A = \\ &= 4P_0\bar{U}(1-P_A) + EZ_A. \end{aligned}$$

Обозначив частоту пожаров на объекте $P_{\Sigma} = 2P_0$, а общий ущерб на объекте — $2U = U_{\Sigma}$, для варианта предпочтения использования АУП из (7) получим:

$$\bar{K}_1 > \bar{K}_2$$

или

$$2P_0U(2-R-2(1-P_A)) > E(Z_A - Z_{\text{п}}),$$

откуда

$$P_A > \frac{R}{2} + \frac{Z_A - Z_{\text{п}}}{P_{\Sigma}U_{\Sigma}}. \quad (8)$$

Область А экономического предпочтения использования АУП по сравнению с устройством противопожарной преграды с надежностью R представлена на рис. 1.

Заметим, что косвенные потери при пожаре можно учесть введением коэффициента косвенных потерь $R_k > 1$, что уменьшает наклон прямой — нижней границы относительно оси абсцисс и, естественно, расширяет область использования (А) АУП при $\bar{Z}_A > \bar{Z}_{\text{п}}$.

Весьма важно наличие информационного обеспечения задач выбора экономически обоснованных вариантов противопожарной защиты.

Надежность выполнения задачи АУП и вероятность возникновения пожаров для объектов различной функциональной пожарной опасности определяются по данным приложений к методикам [4, 7].

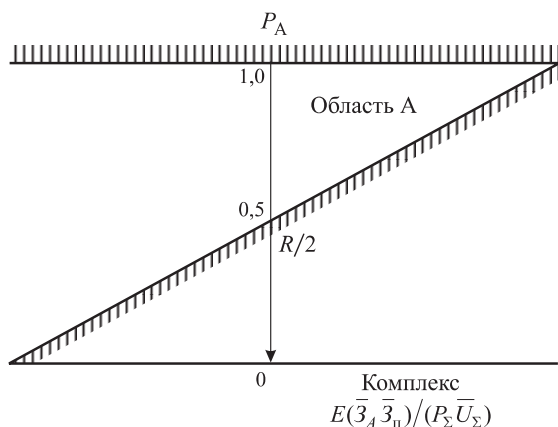


Рис. 1. Область А предпочтения автоматической установки пожаротушения устройству противопожарной преграды в помещении

Относительные прямые потери при пожарах устанавливаются по данным по пожарам на объектах с учетом балансовой стоимости зданий и оборудования, а при их отсутствии — экспертным путем с учетом степени огнестойкости зданий и специфики объектов. Затраты $З_A$ и $З_n$ определяются по проектным материалам.

Надежность R противопожарных перегородок, стен с учетом наличия заполнения проемов в них, огнезадерживающих клапанов и т. д. определяется как

$$R = R_{\text{пер}} R_{\text{зап}}, \quad (9)$$

где $R_{\text{пер}}$ — надежность противопожарной преграды;
 $R_{\text{зап}}$ — надежность заполнения проемов, клапанов и т. п.

Согласно [2] в первом приближении надежность конструкции при пожаре $R_{\text{пр}}$ определяется по выражению

$$R_{\text{пр}} = \Phi \left(\frac{\bar{t}_{\text{ог}} - \bar{t}_{\text{экв}}}{\sqrt{\sigma_{\text{ог}}^2 + \sigma_{\text{экв}}^2}} \right), \quad (10)$$

где Φ — функция нормированного нормального распределения [10];

$\bar{t}_{\text{ог}}$, $\bar{t}_{\text{экв}}$ — математические ожидания случайных величин — пределов огнестойкости $t_{\text{ог}}$ и эквивалентной продолжительности пожара $t_{\text{экв}}$ по одному из определяющих огнестойкость конструкций параметров (например, для железобетонных плит перекрытий — по несущей способности), мин;
 $\sigma_{\text{ог}}^2$, $\sigma_{\text{экв}}^2$ — дисперсии соответственно пределов огнестойкости и эквивалентной продолжительности пожаров.

Характеристики $\bar{t}_{\text{ог}}$ и $\sigma_{\text{ог}}$ для отдельных строительных конструкций определяются, как правило, расчетным путем или в результате огневых испытаний по стандартному режиму пожара. Расчетные методы реализуются в виде имитационных систем

при розыгрыше входных параметров, рассматриваемых как случайные входные величины [2].

Для ряда конструкций характеристики $\bar{t}_{\text{ог}}$ и $\sigma_{\text{ог}}$ могут быть получены аналитически, путем решения теплотехнической задачи (уравнений теплопроводности Фурье) при ряде упрощающих предпосылок.

Например, расчет предела огнестойкости $t_{\text{ог}}$ простых плоских изгибаемых железобетонных элементов при известной критической температуре растянутой арматуры $T_{\text{кр}}$ [11] может быть выполнен по формуле

$$t_{\text{ог}} = \frac{1}{60} \left[\frac{K + (h + K_1 d / \sqrt{a_{\text{пр}}})}{3,25 \frac{1 - \sqrt{T_{\text{кр}} - t_{\text{н}}}}{1250 - t_{\text{н}}}} \right]^2, \quad (11)$$

где K — коэффициент, учитывающий изменение температуры площади обогреваемой поверхности в зависимости от объемной массы сухого бетона, $ч^{1/2}$;

h — толщина защитного слоя бетона до края арматурного стержня, м;

d — диаметр арматурного стержня, м;

K_1 — коэффициент, учитывающий влияние массы металла стержня на его прогрев в зависимости от объемной массы сухого бетона;

$a_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент теплопроводности бетона при 450 °С, $м^2/ч$;

$t_{\text{н}}$ — температура нагрева бетона, °С.

Прологарифмируем выражение (11):

$$\ln t_{\text{ог}} = \ln \left[\frac{1}{3,25 (1 - \sqrt{T_{\text{кр}} - t_{\text{н}}}) / (1250 - t_{\text{н}})} \right]^2 + \ln \left(K + \frac{h + K_1 d}{\sqrt{a_{\text{пр}}}} \right) - \ln 60. \quad (12)$$

Считая (как принято при расчетах пределов огнестойкости плоских изгибаемых железобетонных элементов), что на величину $t_{\text{ог}}$ в первую очередь влияет толщина защитного слоя бетона [11], продифференцируем выражение (12):

$$\frac{\sigma_{\text{ог}}}{\bar{t}_{\text{ог}}} = \frac{2\sigma_h}{K\sqrt{a_{\text{пр}}} + \bar{h} + K_1 d}, \quad (13)$$

где $\bar{h}$, σ_h — математическое ожидание и стандартное отклонение толщины защитного слоя бетона.

Параметры $\bar{h}$ и σ_h определяются инструментально для конкретных конструкций, после чего по выражению (13) находится $\sigma_{\text{ог}}/\bar{t}_{\text{ог}}$, из формулы (11) — $t_{\text{ог}}$ и из формулы (13) — $\sigma_{\text{ог}}$.

Надежность средств защиты заполнения $R_{\text{зап}}$ проемов в противопожарных преградах и клапанов определяется по статистическим данным по пожарам.

Характеристики эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций $\bar{t}_{\text{экв}}$ и $\sigma_{\text{экв}}$ зависят от параметров помещений и пожарной нагрузки, ориентации конструкций и т. д. и могут быть оценены несколькими способами:

1) на основе детерминированных расчетов [12, 13] по критическому значению температуры арматуры или (огнезащищенных) металлических конструкций, основанных на интегральной модели пожара;

2) с помощью полевой модели динамики пожара в помещении и решения теплотехнической задачи по эквивалентной продолжительности $t_{\text{экв}}$ для железобетонных и незащищенных стальных конструкций [14].

Рассмотрим подробнее применение номограмм, построенных в результате численных экспериментов с интегральными моделями пожаров, на примере локального пожара в помещении [12], который возможен при выполнении ряда условий, указанных в [12, 13].

При этом, например, для железобетонных и огнезащищенных металлических изгибаемых (горизонтальных) конструкций эквивалентная продолжительность пожара $t_{\text{экв}}$ является функцией параметров $H/\sqrt{F_n}$, $T_{\text{кр}}$ и t_n , т. е.

$$t_{\text{экв}} = f\left(\frac{H}{\sqrt{F_n}}, T_{\text{кр}}, t_n\right), \quad (14)$$

где H — высота плоскости горения до горизонтальной конструкции, м;

F_n — площадь очага пожара твердых горючих веществ и материалов, м^2 ;

$T_{\text{кр}}$ — критическая температура металла, $^{\circ}\text{C}$;

t_n — продолжительность локального пожара, мин (рис. 2) [3].

Для локального пожара параметры H и F_n могут считаться известными. На основе результатов ма-

шинных экспериментов И. С. Молчадским показано [12], что для изгибаемых строительных конструкций параметр $t_{\text{экв}}$ слабо зависит от величины $T_{\text{кр}}$.

В связи с этим параметр $H/\sqrt{F_n}$ в формуле (14) может рассматриваться как детерминированная величина, т. е. случайная величина $t_{\text{экв}}$ зависит лишь от одной случайной величины t_n , определяемой для однородной пожарной нагрузки [13] как

$$t_n = G/\Psi, \quad (15)$$

где G — удельная пожарная нагрузка на 1 м^2 , $\text{кг}/\text{м}^2$;

Ψ — скорость выгорания пожарной нагрузки, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

Разложим функцию $f_{\text{экв}}$ в ряд Тейлора в окрестности точки $t_n = \bar{t}_n$ (где $\bar{t}_n$ — математическое ожидание t_n для определенных значений $H/\sqrt{F_n}$ и $T_{\text{кр}}$):

$$t_{\text{экв}} = f(\bar{t}_n) + (t_n - \bar{t}_n) f'(\bar{t}_n) + \frac{(t_n - \bar{t}_n)^2}{2} f''(\bar{t}_n) + R_{\text{ост}}, \quad (16)$$

где $R_{\text{ост}}$ — остаточный член [10].

Отсюда математическое ожидание $t_{\text{экв}}$

$$\begin{aligned} E(t_{\text{экв}}) &= \bar{t}_{\text{экв}} = E(f(\bar{t}_n)) + E(t_n) f'(\bar{t}_n) - \\ &- \bar{t}_n f'(\bar{t}_n) + \frac{1}{2} f''(\bar{t}_n) V(t_n) + E(R_{\text{ост}}) \approx \\ &\approx f(\bar{t}_n) + \frac{1}{2} f''(\bar{t}_n) V(t_n), \end{aligned} \quad (17)$$

где E , V — математическое ожидание и дисперсия t_n .

Если дисперсия t_n мала, то из (17) получим:

$$\bar{t}_{\text{экв}} \approx f(\bar{t}_n).$$

Из (16) будем иметь приближенное значение дисперсии $t_{\text{экв}}$:

$$\begin{aligned} V(t_{\text{экв}}) &\approx V(f(\bar{t}_n)) + V((t_n - \bar{t}_n) f'(\bar{t}_n)) \approx \\ &\approx [f'(\bar{t}_n)]^2 V(t_n). \end{aligned} \quad (18)$$

Формула (18) — приближенная; при этом учитывается, что $f(\bar{t}_n)$ — достаточно гладкая функция (см. рис. 2).

Используя разложение в ряд Тейлора, из формулы (15) для случайной величины t_n получим:

$$\bar{t}_n = \bar{G}/\bar{\Psi}; \quad (19)$$

$$\sigma_{t_n}^2 = \sigma_G^2 \left(\frac{1}{\bar{\Psi}} \right)^2 + \sigma_{\Psi}^2 \left(\frac{\bar{G}}{\bar{\Psi}} \right)^2, \quad (20)$$

где $\bar{G}$, $\bar{\Psi}$ — средние значения соответственно удельной пожарной нагрузки и скорости выгорания пожарной нагрузки;

σ_G^2 , σ_{Ψ}^2 — дисперсии соответственно удельной пожарной нагрузки и скорости выгорания пожарной нагрузки.

При этом $\sigma_{t_n}^2 = V(t_n)$. Величины $\bar{G}$ и σ_G^2 определяются по результатам натурных обследований

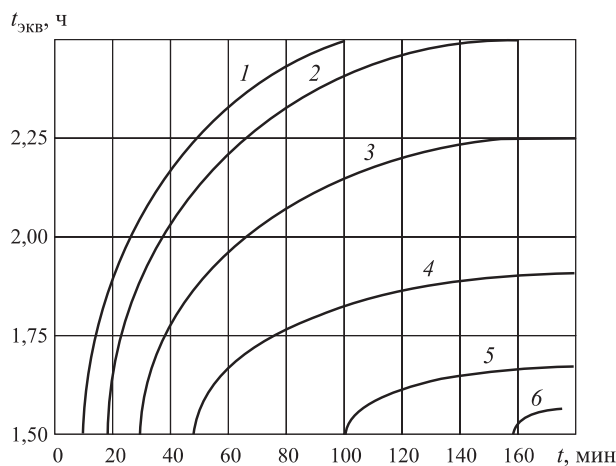


Рис. 2. Зависимость $t_{\text{экв}}$ от продолжительности пожара t_n при $H/\sqrt{F_n}$: 1 — 1,2; 2 — 1,5; 3 — 1,8; 4 — 2,2; 5 — 2,4; 6 — 3,6

объекта, а $\bar{\Psi}$ и σ_{Ψ} — по справочным данным. Здесь можно принять:

$$\bar{\Psi} = \frac{\Psi_{\max} + \Psi_{\min}}{2}; \quad 3\sigma_{\Psi} = \frac{\Psi_{\max} - \Psi_{\min}}{2},$$

где $[\Psi_{\min}, \Psi_{\max}]$ — диапазон изменения табличных данных Ψ .

Замечания

1. При необходимости содержание критерия приведенных затрат может быть легко расширено за счет учета косвенных потерь при пожарах, детализировки ущерба по зданию, оборудованию с помощью коэффициентов потерь и т. д. [8].

2. Аналитический подход к оценке стохастических параметров эквивалентной продолжительности пожара на примере локальных пожаров может быть распространен на строительные конструкции в условиях объемных свободно развивающихся пожаров путем использования результатов численных экспериментов [12].

3. В принципе, внедрение имитационных систем моделирования пожаров, использующих случайные входные параметры и полевые модели пожаров, позволяет получить более обоснованные результаты для выбора рациональных вариантов защиты. Однако в силу сложности реализации такого подхода

для получения инженерных оценок параметров защиты в практической деятельности научно-исследовательских и проектных организаций в настоящее время могут быть использованы указанные аналитические подходы.

4. Наличие в пожарной нагрузке различных материалов следует учитывать согласно предложениям [12], приведя нагрузку к стандартной древесине.

Выводы

1. Разработаны теоретические основы инженерного метода расчета рациональных вариантов противопожарной защиты помещений зданий, включающей противопожарные преграды и автоматические установки пожаротушения.

2. Предложен аналитический подход к оценке надежности строительных конструкций, учитывающий как стохастические параметры конструкций, так и параметры помещений, в которых они используются, а также характеристики пожарной нагрузки в помещениях.

3. Предложенный инженерный метод реализует критерий приведенных затрат, а также критерий экономической целесообразности, который в сочетании с критерием индивидуальной пожарной безопасности [6] позволяет получить рациональный вариант защиты объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DIN 18230. Baulicher Brandschutz im Industriebau — Teil 1 und 2. — November 1982. URL: <http://www.baunormenlexikon.de/Normen/DIN/DIN%2018230-3/e44098d5-bb4c-4727-a116-1f889b0c4c48> (дата обращения: 22.03.02016).
2. *Присадов В. И.* Разработка методов выбора рациональных вариантов систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : ВНИИПО, 1990. — 506 с.
3. МДС 21-3.2001. Методика и примеры технико-экономического обоснования противопожарных мероприятий к СНиП 21-01-97*. — Введ. 01.01.2001. — М. : ГУП ЦПП, 2001. — 59 с.
4. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404 (в ред. приказа МЧС России от 14.12.2010 № 649). — Введ. 10.07.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
5. *Ермина Т. Ю., Сухотина М. А., Тихонова Н. В.* Сравнение подходов к построению логических деревьев событий при определении расчетных величин пожарного риска на производственных объектах и в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности // XXIV Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания института : тез. докл. — М. : ВНИИПО, 2012. — Ч. 1. — С. 347–351.
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федер. закон от 28.07.2008 № 123-ФЗ // Собр. законодательства РФ. — 2008. — № 30 (ч. I), ст. 3579.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
8. *Присяжнюк Н. Л., Александров Г. В., Кузьмичев И. И., Кузнецова Е. С., Соловьева Т. Н.* Экономика пожарной безопасности. — М., 2009. — 247 с.
9. *Присадов В. И., Мусликова С. В., Костерин И. В., Соболев А. И.* Нормирование материальных потерь от пожаров в промышленных зданиях // Пожарная безопасность. — 2016. — № 1. — С. 59–64.
10. *Капур К., Ламберсон Н.* Надежность и проектирование систем. — М. : Мир, 1980. — 604 с.

11. Научно-технический прогресс в пожарной охране / Аверин Ю. Ф., Антонов А. В., Атаманенко М. Э., Баратов А. Н., Безродный И. Ф., Брежнев А. А., Вайсман М. Н., Вилитенко А. Г., Вогман Л. П., Воронин Б. И., Гаврилей В. М., Герасимов А. А., Дмитриенко В. М., Дьяконов В. П., Евдаков А. П., Жартовский В. М., Жевлаков А. Ф., Зозуля И. И., Исавнин Н. В., Казаков М. В., Колганова М. Н., Корольченко А. Я., Кузнецов Л. М., Кузьмичев И. И., Левитес Ф. А., Логинов В. И., Мелихов А. С., Метелкин Г. А., Мешалкин Е. А., Мешман Л. М., Минаев С. Н., Недзельский В. В., Нестеренко Г. Г., Николаев В. М., Простов Н. И., Пустынников С. С., Савошик А. Н., Салахутдинов Х. Х., Смелков Г. И., Сорокин Ю. М., Тарадайко В. П., Тарасов В. Н., Третьяков В. А., Тубашов Л. К., Турков А. С., Федотов М. Н., Чиркунов В. Н., Чурей И. Н., Шаповалов А. А., Шевчук А. П., Юрченко Д. И., Яковенко Ю. Ф., Яковлев А. И. — М. : Стройиздат, 1987. — 376 с.
12. Молчадский И. С. Пожар в помещении. — М. : ВНИИПО, 2005. — 456 с.
13. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. — М. : Стройиздат, 1988. — 447 с.
14. Шебеко Ю. Н., Шебеко А. Ю., Гордиенко Д. М. Расчетная оценка эквивалентной продолжительности пожара для строительных конструкций на основе моделирования пожара в помещении // Пожарная безопасность. — 2015. — № 1. — С. 31–39.
15. Hasofer A. M., Qu J. Response surface modelling of Monte-Carlo fire data // Fire Safety Journal. — 2002. — Vol. 37, Issue 8. — P. 772–784. DOI: 10.1016/S0379-7112(02)00028-0.
16. Chow W. K., Chow C. L. Evacuation with smoke control for atria in green and sustainable buildings // Building and Environment. — 2005. — Vol. 40, No. 2. — P. 195–200. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.07.008.
17. Chow W. K., Huo R., Fong M. K. PolyU/USTC atrium: a full-scale burning facility — preliminary experiments // Journal of Applied Fire Science. — 1998–1999. — Vol. 8, No. 3. — P. 229–241. DOI: 10.2190/tfc2-2v7n-fydx-e9vl.
18. Capote J. A., Alvear D., Albreu O. V., Lazaro M., Espina P. Scale tests of smoke filling in large atria // Fire Technology. — 2009. — Vol. 45, No. 2. — P. 201–220. DOI: 10.1007/s10694-008-0074-4.
19. Yung D. Principles of fire risk assessment in buildings. — Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2008. — 248 p. DOI: 10.1002/9780470714065.
20. Hasofer A. M., Beck V. R., Bennetts I. D. Risk analysis in building fire safety engineering. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2007. — 208 p. DOI: 10.4324/9780080467269.
21. NFPA 92B. Standard for smoke management systems in malls, atria and large spaces. 2009 Edition. — Quincy : National Fire Protection Association, 2009. — 65 p.

Материал поступил в редакцию 7 апреля 2016 г.

Для цитирования: Присадков В. И., Муслakова С. В., Костерин И. В., Фадеев В. Е., Шамаев А. М. Инженерный метод выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов с экономической ответственностью // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 8. — С. 49–57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57.

English

ENGINEERING METHOD OF SELECTION OF RATIONAL VARIANT OF FIRE PROTECTION OF OBJECTS WITH ECONOMIC RESPONSIBILITY

PRISADKOV V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection
of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Moscow Region, Balashikha, 143903,
Russian Federation; e-mail address: z080637@yandex.ru)

MUSLAKOVA S. V., Candidate of Technical Sciences, Deputy Head
of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection
of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Moscow Region, Balashikha, 143903,
Russian Federation; e-mail address: k708@yandex.ru)

KOSTERIN I. V., Candidate of Technical Sciences, Head of Research
Expertise and Consulting Department, Ivanovo Fire and Rescue Academy
of the State Fire Service of Emercom of Russia (Stroiteley Avenue, 33,
Ivanovo, 153040, Russian Federation; e-mail address: kosteriniv@gmail.com)

FADEEV V. E., Chief Inspector of Normative and Technical Department, Supervisory and Preventive Efforts Department of Emercom of Russia (Vatutina St., 1, Moscow, 121357, Russian Federation; e-mail address: fadeev_v@mail.ru)

SHAMAEV A. M., Deputy Head of Supervisory Activities in Moscow Region of Reutov, Moscow Region Directorate of Russian Ministry for Emergency Situations (Lenina St., 12, Moscow Region, Reutov, 143964, Russian Federation; e-mail address: z080637@yandex.ru)

ABSTRACT

Over the past three decades there are worked out the general principles of flexible standardization fire protection facilities, taking into account material losses in fires.

However, practical implementation of this approach is hampered by the absence of reliable data on the effectiveness of fire prevention measures and estimated effects of fire material. Often this is done expertly, at best — for statistical data on fires. The reasons for this state of affairs were the following factors:

- 1) the random nature of the process of real fires and fighting them, spreads of building structures parameters and characteristics of fire protection engineering;
- 2) lack of engineering tools to evaluate and compare the performance of individual fire protection measures, allowing to set the sound application of the relevant measures.

In this connection, the article seeks to develop theoretical foundations of engineering method of choice of rational variants of objects of protection with economic responsibility.

This will be used probabilistic approach (analysis), allowing not only to more adequately take into account the physics of the processes, but slightly lower requirements for accuracy of data than the deterministic analysis.

The theoretical foundation of engineering method of calculation of rational fire protection options premises of buildings, including fire barriers and automatic fire suppression system is worked. It's proposed an analytical approach to assessing the reliability of building structures, taking into account both the stochastic parameters of designs and parameters of the premises in which they are used, as well as the characteristics of the fire load in the premises. The proposed engineering method implements the criterion of reduced costs, economic feasibility criteria, which in conjunction with the criterion of individual fire possible to obtain a rational way to protect the object. If necessary, the content of the criterion of reduced costs can easily be expanded by taking into account indirect losses from fires, detailing the damage on buildings, equipment via loss ratios, etc.

Analytical approach to the evaluation of stochastic parameters of the equivalent length of a fire on an example of local fires can be extended to constructions in terms of volume fires, fires developing freely, by using the results of numerical experiments. In principle, the introduction of simulated fire simulation systems using random input parameters and field model of fires, yield more valid results for the rational choice of protection options. However, due to the complexity of such an approach for the engineering protection of the parameter estimates in the practice of scientific research and design organizations can currently be used in these analytical assessments.

Keywords: objects from an economic liability; criterion of reduced costs; method of evaluating the reliability; fire barriers; engineering method of choice; streamlined version of fire protection; damage.

REFERENCES

1. DIN 18230. *Baulicher Brandschutz im Industriebau — Teil 1 und 2*. November 1982. Available at: <http://www.baunormenlexikon.de/Normen/DIN/DIN%2018230-3/e44098d5-bb4c-4727-a116-1f889b0c4c48> (Accessed 22 March 2016).
2. Prisadkov V. I. *Development of methods of a choice of rational variants of fire protection systems for industrial buildings*. Dr. tech. sci. diss. Moscow, VNIPO Publ., 1990. 506 p. (in Russian).
3. MDS 21-3.2001. *Methods and examples of the feasibility study fire prevention measures to the SNIP 21-01-97**. Moscow, GUP TsPP Publ., 2001. 59 p. (in Russian).
4. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk on production objects*. Order of Emercom of Russia on 10.07.2009 No. 404 (ed. on 14.12.2010 No. 649). Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).

5. Eremina T. Yu., Sukhotina M. A., Tikhonova N. V. Comparison of approaches to constructing events logical tree when determining the estimated values of fire risk at work sites and in buildings, construction and structures of various classes of functional fire danger. In: *XXIV International Scientific-Practical Conference on the problems of fire safety, dedicated 75th anniversary of the creation of institute*. Theses. Moscow, VNIPO Publ., 2012, part 1, pp. 347–351 (in Russian).
6. Technical regulations for fire safety requirements. Law of Russian Federation on 22.07.2008 No. 123. *Sobraniye zakonodatelstva RF (Collection of Laws of the Russian Federation)*, 2008, no. 30 (part I), art. 3579 (in Russian).
7. *Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger*. Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 2009 (in Russian).
8. Prisyazhnyuk N. L., Aleksandrov G. V., Kuzmichev I. I., Kuznetsova E. S., Solovyeva T. N. *Fire safety economy*. Moscow, 2009. 247 p. (in Russian).
9. Prasadkov V. I., Muslakova S. V., Kosterin I. V., Sobolev A. I. Rationing of material fire damage in industrial buildings. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2016, no. 1, pp. 59–64 (in Russian).
10. Kapur K., Lamberson N. *Reliability and system design*. Moscow, Mir Publ., 1980. 604 p. (in Russian).
11. Averin Yu. F., Antonov A. V., Atamanenko M. E., Baratov A. N., Bezrodnyy I. F., Brezhnev A. A., Vaysman M. N., Vilitenko A. G., Vogman L. P., Voronin B. I., Gavriley V. M., Gerasimov A. A., Dmitrienko V. M., Dyakonov V. P., Yevdakov A. P., Zhartovskiy V. M., Zhevlakov A. F., Zozulya I. I., Isavnin N. V., Kazakov M. V., Kolganova M. N., Korolchenko A. Ya., Kuznetsov L. M., Kuzmichev I. I., Levites F. A., Loginov V. I., Melikhov A. S., Metelkin G. A., Meshalkin Ye. A., Meshman L. M., Minaev S. N., Nedzelskiy V. V., Nesterenko G. G., Nikolaev V. M., Prostov N. I., Pustynnikov S. S., Savoshchik A. N., Salakhutdinov Kh. Kh., Smelkov G. I., Sorokin Yu. M., Taradayko V. P., Tarasov V. N., Tretyakov V. A., Tubashov L. K., Turkov A. S., Fedotov M. N., Chirkunov V. N., Churey I. N., Shapovalov A. A., Shevchuk A. P., Yurchenko D. I., Yakovenko Yu. F., Yakovlev A. I. *Scientific and technological progress in fire protection*. Moscow, Stroyizdat, 1987. 376 p. (in Russian).
12. Molchadskiy I. S. *Fire room*. Moscow, VNIPO Publ., 2005. 456 p. (in Russian).
13. Astapenko V. M., Koshmarov Yu. A., Molchadskiy I. S., Shevlyakov A. N. *Thermogasdynamics fires in rooms*. Moscow, Stroyizdat, 1988. 447 p. (in Russian).
14. Shebeko Yu. N., Shebeko A. Yu., Gordienko D. M. Assessment of equivalent fire duration for building structures based on compartment fire modeling. *Pozharnaya bezopasnost (Fire Safety)*, 2015, no. 1, pp. 31–39 (in Russian).
15. Hasofer A. M., Qu J. Response surface modelling of Monte-Carlo fire data. *Fire Safety Journal*, 2002, vol. 37, issue 8, pp. 772–784. DOI: 10.1016/S0379-7112(02)00028-0.
16. Chow W. K., Chow C. L. Evacuation with smoke control for atria in green and sustainable buildings. *Building and Environment*, 2005, vol. 40, no. 2, pp. 195–200. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.07.008.
17. Chow W. K., Huo R., Fong M. K. PolyU/USTC atrium: a full-scale burning facility — preliminary experiments. *Journal of Applied Fire Science*, 1998–1999, vol. 8, no. 3, pp. 229–241. DOI: 10.2190/tfc2-2v7n-fydx-e9vl.
18. Capote J. A., Alvear D., Albreu O. V., Lazaro M., Espina P. Scale tests of smoke filling in large atria. *Fire Technology*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 201–220. DOI: 10.1007/s10694-008-0074-4.
19. Yung D. *Principles of fire risk assessment in buildings*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2008. 248 p. DOI: 10.1002/9780470714065.
20. Hasofer A. M., Beck V. R., Bennetts I. D. *Risk analysis in building fire safety engineering*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2007. 208 p. DOI: 10.4324/9780080467269.
21. NFPA 92B. Standard for smoke management systems in malls, atria and large spaces. 2009 Edition. Quincy, National Fire Protection Association, 2009. 65 p.

For citation: Prasadkov V. I., Muslakova S. V., Kosterin I. V., Fadeev V. E., Shamaev A. M. Engineering method of selection of rational variant of fire protection of objects with economic responsibility. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 8, pp. 49–57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57.