

*А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ*

## **О КРИТЕРИЯХ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

(представлено д.т.н. Абрамовым Ю.О.)

Показано, что среди параметров, характеризующих пожарную безопасность веществ, первичным является температура нагреваемого объекта. Последовательный переход к другим параметрам требует нахождения динамической зависимости температуры поверхности от теплового потока и времени. Существуют ситуации, в которых определение условий безопасности сводится к решению более простой задачи об энергетическом балансе.

**Ключевые слова:** критерий пожарной безопасности, критическая температура, критическое время, критический тепловой поток.

**Постановка проблемы.** Пожар является опасным явлением, в связи с чем существует проблема обеспечения пожарной безопасности.

Для разрешения данной проблемы необходимо уметь определять опасность ситуации, возникающей при пожаре. В качестве параметров, отображающих опасность теплового воздействия пожара, используются температура нагреваемого объекта, тепловой поток, падающий на объект, время воздействия этого потока на объект. При определении условия безопасности наличие нескольких к тому же связанных между собой параметров порождает неопределенность. Ситуация дополнительно усложняется, если имеется несколько взаимосвязанных объектов, например, защищаемая поверхность и тело, являющееся защитой. Описанное положение делает актуальным выяснение соотношения между критериями пожарной безопасности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Значительная часть работ, связанных с пожарами, посвящена исследованию параметров пожарной безопасности. Так в работе [1] теоретически и экспериментально исследуется поведение предела огнестойкости вспучивающихся покрытий в процессе их старения. В работе [2] проводится сравнение экспериментальных и теоретических значений предела огнестойкости металлических конструкций. Работа [3] посвящена огнезащите стальных конструкций плиточным материалом, приведены особенности определения предела огнестойкости таких образований. В работе [4] приведен расчет температуры на поверхности, защищаемой огнезащитной шторой. Работа [5] посвящена попытке упростить расчет нестационарных температуры и теплового потока на поверхностях тел.

Указанные работы, как и многие другие, исследуют различные параметры, отображающие тепловое воздействие пожара, и соответственно ориентируются на разные критерии пожарной безопасности, не ставя вопрос о первичности используемых критериев.

**Постановка задачи и ее решение.** Задачей работы является нахождение взаимосвязи между критериями пожарной безопасности и определение первичного из них.

Во время пожара тела подвергаются тепловому воздействию. Это воздействие отображается либо падающим на тело удельным тепловым пото-

ком  $q$ , либо температурой горячей среды  $t_f$ , контактирующей с телом. Первым шагом в определении условия безопасности является определение безопасности каждого элементарного звена (объекта), среди которых самым значимым является защищаемый объект. После этого необходимо анализировать условия безопасности системы. Для объекта ситуацию считают безопасной, если соответствующие параметры не достигли своих критических значений, а именно критического значения температуры поверхности  $t_{cr}$ , критической величины удельного теплового потока  $q_{cr}$ , критического времени теплового воздействия  $\tau_{cr}$ . Понятно, что эти параметры связаны между собой, что порождает группу требующих прояснения вопросов:

- 1) Какой критерий первичен?
- 2) Какой вид имеют формула связи критических параметров в разных ситуациях?
- 3) Что подразумевается, когда используется не первичный критерий (например, отслеживается исключительно величина падающего на объект удельного теплового потока  $q$ ) без явной фиксации значений других параметров?

Относительно ясен ответ на первый вопрос. Как правило, первичным параметром, определяющим безопасность тела, нагреваемого пожаром, является температура этого тела  $t$  (или, если тело неоднородно, самой уязвимой его части). Дело в том, что потеря безопасности связана со сменой состояния нагреваемого тела, и именно температура является основным параметром состояния, отображающим такие изменения. Критический уровень безопасной температуры определяется нагреваемым материалом. При достижении критической температуры происходят какие-либо опасные структурные изменения (например, металлическая конструкция теряет механическую стойкость), либо становятся возможными нежелательные процессы (например, становится возможным возгорание жидкости). Так при нагревании несущих металлических конструкций критической является температура  $t_{cr} \approx 500^\circ\text{C}$ , при которой теряется упругость металла. При тепловом облучении человека, критической является температура кожного покрова  $t_{cr} \approx 42^\circ\text{C}$ , при которой сворачиваются белки крови, что проявляется как ожог.

В связи с изложенным выше при отслеживании других параметров (удельного теплового потока  $q$  и времени теплового воздействия  $\tau$ ) критическими являются такие их значения, которые приводят к достижению телом критической температуры. Такая ситуация делает необходимым нахождение зависимости  $t(q, \tau)$ . Знание этой зависимости позволяет ответить на вопрос о связи критических значений параметров – они являются решением уравнения

$$t(q, \tau) = t_{cr}. \quad (1)$$

Соответствующие записи имеют вид

$$q_{cr} = q(\tau, t_{cr}), \quad \tau_{cr} = \tau(q, t_{cr}), \quad (2)$$

где  $q(\tau, t)$  и  $\tau(q, t)$  – функции известного вида.

Аналитическое решение уравнения (1) известно в некоторых относительно простых ситуациях (например, нагревание плоской поверхности термически толстого тела постоянным тепловым потоком либо средой с постоянной температурой). Нахождение зависимости  $t(q, \tau)$  с последующим решением уравнения (1) является зачастую сложной задачей, которую необходимо решать отдельно для каждой качественно различной ситуации.

Рассмотрим пример термически толстого тела (полупространства), защищаемого от внешнего воздействия плоской пластиной толщиной  $h$  [6]. Схематически ситуация изображена на рис. 1, на котором массивному телу отвечают значения пространственной координаты  $x > 0$ , а защитному покрытию –  $0 > x > -h$ .

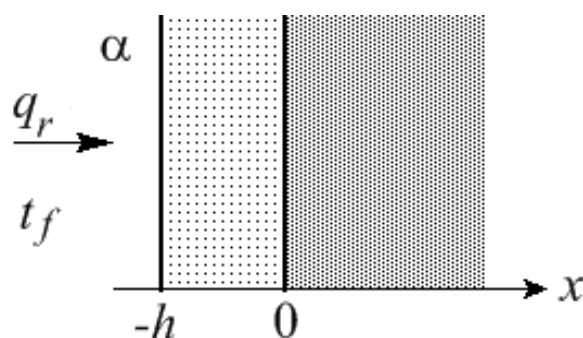


Рис.1. Пространственная схема прогрева

Описывающие процесс прогрева известные уравнения нестационарной теплопроводности, определяющие поле температур  $t(x, \tau)$ , содержат параметры  $a$  и  $a_*$ , являющиеся коэффициентами температуропроводности. (Здесь и далее коэффициенты со звездочкой (\*) относятся к материалу массивного тела, а коэффициенты без звездочки соответствуют материалу защитного слоя.) Они равны

$$a = \frac{\lambda}{c'}, \quad a_* = \frac{\lambda_*}{c'_*}, \quad \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1},$$

где величины  $\lambda, \lambda_*$  – коэффициенты теплопроводности,  $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$ ;  $c', c'_*$  – удельные объемные изобарные теплоемкости,  $\text{Дж м}^{-3} \text{К}^{-1}$ .

Граничными условиями к уравнениям являются:

1) требование непрерывности полного потока тепла на границе с внешней средой ( $x = -h$ ):

$$-\lambda \left. \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-h} = q_r - \alpha \cdot [t(-h, \tau) - t_f], \quad (3)$$

где  $q_r$  – результирующая плотность потока теплового излучения, падающего на поверхность,  $\text{Вт м}^{-2}$ ;  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи с данной поверхности в воздух,  $\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-1}$ ;  $t_f$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;

2) непрерывность температуры и удельного теплового потока на границе покрытия с массивным телом ( $x = 0$ ):

$$t(-0, \tau) = t(+0, \tau), \quad -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-0} = -\lambda_* \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=+0}; \quad (4)$$

3) ограниченность величины температуры массивного тела:

$$t(x, \tau) \Big|_{x=\infty} < \text{const}. \quad (5)$$

Начальным условием задачи принято однородное распределение температуры в покрытии и защищаемом теле ( $-h < x$ ):

$$t(x, 0) = t_0, \quad (6)$$

где  $t_0$  – считающаяся известной начальная температура.

Данная задача в случае постоянства величин  $a$ ,  $a_*$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_*$ ,  $q_r$ ,  $\alpha$ ,  $t_f$  и  $t_0$  решается при помощи преобразований Лапласа, проведенных по временной переменной нестационарного поля  $t(x, \tau)$  отдельно в областях  $-h < x < 0$  и  $x > 0$ .

В итоге всех преобразований в пределе времен

$$\tau \gg \tau_0, \quad (7)$$

больших по сравнению с характерным временем прогрева защитного по-

крытия  $\tau_0 \equiv \frac{h^2}{a}$ , для температуры на защищаемой поверхности получается выражение

$$t(0, \tau) = t_0 + (t_{\max} - t_0) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_\Sigma}\right) \cdot \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_\Sigma}}\right) \right], \quad (8)$$

в котором символом  $\text{erfc}(Z)$  обозначена дополнительная функция ошибок Гаусса;

$$t_{\max} = \frac{q_r}{\alpha} + t_f \quad (9)$$

- максимальное значение температуры, к которому асимптотически стремится температура защищаемой поверхности, °С; параметр

$$\tau_\Sigma(h) = \lambda_* c_* \cdot \left( \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \quad (10)$$

имеет смысл характерного времени прогрева поверхности массивного тела, покрытого защитным слоем.

Отметим, что слагаемые в скобках в правой части формулы (10) представляют собой термические сопротивления теплопроводности защитного слоя и теплоотдачи. Это означает, что в пределе (7) нанесение защитного слоя эквивалентно соответствующему увеличению термиче-

ского сопротивления теплоотдачи.

Отметим, что при  $h = 0$ , согласно формуле (10),

$$\tau_{\Sigma}(0) = \tau_* \equiv \frac{\lambda_* c'_*}{\alpha^2}$$

и соотношение (8) дает известный результат задачи прогрева (охлаждения) поверхности массивного тела в отсутствии защитного покрытия [7].

Для получения общего вида связи критериев безопасности в данной задаче представим соотношение (8) в безразмерном виде

$$\theta(\tilde{\tau}) = 1 - \exp(-\tilde{\tau}) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}}), \quad (11)$$

в котором используется относительная избыточная температура поверхности

$$\theta \equiv \frac{t(0, \tau) - t_0}{t_{\max} - t_0}, \quad (12)$$

и относительное время

$$\tilde{\tau} \equiv \frac{\tau}{\tau_{\Sigma}}. \quad (13)$$

В данных переменных уравнение (1), задающее поведение критической температуры, принимает вид

$$\theta_{\text{cr}} = 1 - \exp(-\tilde{\tau}) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}}), \quad (14)$$

в котором

$$\theta_{\text{cr}} \equiv \frac{t_{\text{cr}} - t_0}{t_{\max} - t_0}. \quad (15)$$

В соответствии с формулами (14), (15), зависимость критического значения предельной температуры (9) от времени и критической температуры имеет вид

$$t_{\max, \text{cr}} = t_0 + \frac{t_{\text{cr}} - t_0}{1 - \exp(-\tilde{\tau}) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}})}. \quad (16)$$

Зависимость критического значения времени от критической температуры получается разрешением уравнения (14) относительно переменной  $\tilde{\tau}$ . Можно получить явный вид этой зависимости в пределе больших значений  $\tilde{\tau}$ , что соответствует близким к единице значениям  $\theta_{\text{cr}}$ , используя известное асимптотическое разложение функции ошибок:

$$\operatorname{erf}(A) = 1 - \frac{\exp(-A^2)}{\sqrt{\pi} \cdot A} \left[ 1 + O\left(\frac{1}{A^2}\right) \right],$$

где выражением  $O(Z)$  обозначается величина порядка  $Z$ .

Результат имеет вид

$$\tilde{\tau}_{\text{cr}} = \frac{1}{\pi \cdot (1 - \theta_{\text{cr}})^2}, \quad (17)$$

что в размерных переменных записывается формулой

$$\tau_{\text{cr}} = \frac{\tau_{\Sigma}}{\pi} \cdot \left( \frac{t_{\text{max}} - t_0}{t_{\text{max}} - t_{\text{cr}}} \right)^2 = \frac{\tau_{\Sigma}}{\pi} \cdot \left[ \frac{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_0)}{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_{\text{cr}})} \right]^2, \quad (18)$$

Бывают ситуации, в которых зависимость  $t(q, \tau)$  резко меняется вблизи некоторых значений  $q = q_{\text{cr}}$ . Так при  $q < q_{\text{cr}}$  функция  $t(q, \tau)$  выходит на стационарный режим, в котором  $t(q, \tau) < t_{\text{cr}}$ , а при  $q = q_{\text{cr}}$  происходит резкое изменение вида зависимости  $t(q, \tau)$  и температура относительно быстро достигает значения  $t_{\text{cr}}$ . В этом случае нет необходимости решать динамическую задачу о нахождении  $t(q, \tau)$ , надо решить задачу о определении соотношения между  $q$  и  $q_{\text{cr}}$ . Последняя обычно является более простой задачей энергетического баланса. Описанный вариант соответствует случаю вопроса 3. Примером может являться нагрев кожного покрова живого организма: до некоторого значения теплового потока  $q < q_{\text{cr}}$  организм отводит тепло от нагреваемого участка кожи, но при  $q > q_{\text{cr}}$  организм перестает справляться, что приводит к ожогу.

Изложенное выше, относится к защищаемому объекту. Если рассматривать систему, состоящую из объекта и его защиты, возможно существенное усложнение критерия безопасности. Такая ситуация реализуется, если защита может под действием тепловой нагрузки изменить свои свойства, например разрушиться. В этом случае безопасным временем системы становится минимальное из безопасных времен отдельных элементов.

По поводу основного уравнения (1) следует отметить следующее. 1) Если фиксировать не тепловой поток  $q$ , а температуру горячей среды  $t_f$ , то построения будут аналогичными. 2) Если падающий поток является не константой, а заданной функцией, то уравнение (1) превращается в функциональное, что, как правило, значительно усложняет рассмотрение.

**Выводы.** Приведенное обсуждение показало, что среди параметров, характеризующих пожарную безопасность, первичным является температура нагреваемого объекта. Последовательный переход к другим параметрам требует нахождения динамической зависимости  $t(q, \tau)$  и решения уравнения (1). Существуют ситуации, в которых определение ус-

ловий безпеки сводиться к решению более простой задачи об энергетическом балансе. В системах, состоящих из тела и его защиты, безопасность определяется защитным ресурсом самого слабого звена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Maciulaitis R., Grigonis M, Malaiskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // Fire Safety Journal. – 2018- Vol. 98 – P. 15-23.
2. Lou Guobiao, Wang Chenghao, Jiang Jian, Jiang Yaqiang, Wang Liangwei, Li Guo-Qiang. Experimental and numerical study on thermal-structural behavior of steel portal frames in real fires // Fire Safety Journal. – 2018 – Vol. 98. – P. 48-62.
3. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2016 – Т. 25(11) – С. 8-16.
4. Кораблев В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В., Романов Н.Н. Тепловой режим огнезащитной шторы в условиях интенсивного теплового воздействия. // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2017 – Т. 26(4) – С. 29-36.
5. Горев В.А., Фомина М.В. Упрощенный расчет теплообмена на плоских поверхностях. // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2016 – Т. 25(3) – С. 5-14.
6. Шаршанов А.Я. Расчет защиты массивного тела теплозащитным покрытием. // Проблемы пожарной безопасности. – 2006.- Вып. 20. – С. 166-172.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967.- 600 с.

*Получено редколлегией 04.10.2018*

А.Я. Шаршанов

### **О критеріях пожежної небезпеки**

Показано, що серед параметрів, що характеризують пожежну безпеку речовин, первинним є температура нагрівання об'єкта. Послідовний перехід до інших параметрів вимагає знаходження динамічної залежності температури поверхні від теплового потоку і часу. Існують ситуації, в яких визначення умов безпеки зводиться до вирішення більш простий задачі про енергетичний баланс.

**Ключові слова:** критерій пожежної безпеки, критична температура, критичний час, критичний тепловий потік

A. Sharshanov

### **About fire safety criteria**

It is shown that among the parameters characterizing the fire safety of substances, the temperature of the heated object is primary. A consistent transition to other parameters requires finding the dynamic dependence of surface temperature on heat flux and time. There are situations in which the determination of safety conditions is reduced to solving a simpler problem about the energy balance.

**Keywords:** fire safety criterion, critical temperature, critical time, critical heat flux.