

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОГНЕСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Г. Зверев, В. А. Назаренко*, А. Ф. Цимбалюк

Томский государственный университет, 634050 Томск, zverev@niipmm.tsu.ru

*ФГУП «Московский институт теплотехники», ЗАО НПП «Спецэнерготехника», 127273 Москва

Исследовано влияние тепловых потерь на показатели огнестойкости плоской металлической пластины при ее испытаниях в режиме стандартного пожара. Численно изучена зависимость динамики роста температуры незащищенной и защищенной покрытием пластины от теплофизических свойств изоляции при воздействии тепловой нагрузки пожара. Полученные результаты указывают на необходимость использования сопряженной постановки задачи и стандартизации типа и теплофизических свойств теплоизоляционного материала для корректного моделирования и проведения испытаний теплоогнезащиты металлической пластины, особенно малой приведенной толщины. Предложены интегральные критерии, характеризующие тепловые потери и эффективность изоляции тыльной поверхности пластины.

Ключевые слова: металлические конструкции, огнестойкость, теплоогнезащита, теплоизоляция.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения противопожарной защиты промышленных и гражданских объектов чрезвычайно актуальна для современного общества. Большинство используемых на практике конструкционных материалов при нагреве теряют свою прочность и не выдерживают разрушительного действия огня [1].

Одним из путей решения проблемы является применение теплозащитных материалов и покрытий. Выступая в качестве барьера между защищаемой поверхностью и объемом пламени, они снижают уровень теплового потока и тем самым повышают сопротивляемость конструкций к воздействию пожара.

Время огнестойкости защищенных конструкций определяется на основе результатов испытаний с привлечением расчетных методик [1–4]. Для металлических конструкций произвольного профиля это сводится к испытанию плоской пластины приведенной толщины в режиме стандартного пожара [2], принципиальная схема которого показана на рис. 1. Теоретическое обоснование эквивалентности этих испытаний [2] по времени огнестойкости требует соблюдения идеальности тепловой изоляции тыльной поверхности пластины. В реальных условиях всегда имеет место сток тепла в массив теплоизоляции.

В условиях длительного времени воздействия тепловой нагрузки ($\approx 1 \div 2$ ч), малости

приведенной толщины металла, а также применения современных эффективных теплозащитных материалов, сильно снижающих тепловые потоки в подложку, возрастает влияние тепловых потерь на результаты испытаний огнестойкости пластины. Это приводит к более низкому уровню температуры металлической пластины, который отличается от действительного. Как следствие, имеет место завышение времени огнестойкости пластины (время достижения критической температуры 500°C — для стали) и, значит, степени эффективности ее теплоогнезащиты. Этот вопрос особенно актуален для вспенивающихся покрытий высокой кратности, пенококссы которых по теплофизическим параметрам не уступают современным теплоизоляционным мате-

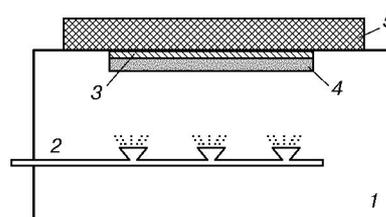


Рис. 1. Принципиальная схема проведения испытаний огнестойкости плоской металлической пластины:

1 — огневая камера, 2 — форсунки с топливом, 3 — пластина, 4 — огнезащитное покрытие, 5 — слой изоляции

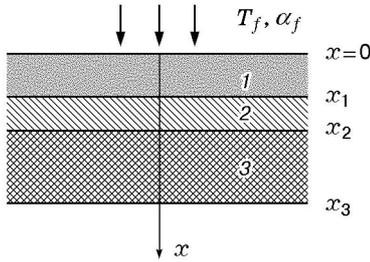


Рис. 2. Схема расположения слоев:

1 — огнезащитное покрытие, 2 — пластина, 3 — теплоизоляция

риалам [5, 6].

Цель данной работы — повышение достоверности результатов испытаний огнестойкости металлических конструкций.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим трехслойную систему, включающую в себя термически инертное огнезащитное покрытие, металлическую пластину и слой изоляции. Схема расположения слоев и система координат показаны на рис. 2.

Тепловое состояние многослойной системы изучается в рамках сопряженной задачи нестационарной теплопроводности [7, 8]:

$$(\rho c)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad i = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

$$x = 0: \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_f (T_f - T_1) + \sigma \varepsilon_{rf} (T_f^4 - T_1^4), \quad (2)$$

$$x = x_i: \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=x_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_i+0}, \quad (3)$$

$$T_i \Big|_{x=x_i-0} = T_{i+1} \Big|_{x=x_i+0}, \quad i = 1, 2,$$

$$x = x_3: \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_3} = \alpha_e (T_e - T_3) + \sigma \varepsilon_{re} (T_e^4 - T_3^4), \quad (4)$$

$$t = 0: \quad T_i = T_0 = T_e, \quad i = \overline{1, 3}. \quad (5)$$

Здесь i — номер слоя (1 — покрытие, 2 — стальная пластина, 3 — изоляция); ρ_i , c_i , λ_i , T_i — плотность, теплоемкость, теплопроводность и температура материала i -го слоя; α — коэффициент теплообмена; t — время; x —

координата, отсчитываемая от наружной поверхности покрытия; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\varepsilon_{rf} = (1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_1 - 1)^{-1}$, ε_{re} — приведенные степени черноты систем «пламя — покрытие» и «изоляция — окружающая среда». Индексы f и e — относятся к характеристикам пожара и окружающей среды за слоем изоляции.

В системе уравнений (1)–(5) радиационно-конвективное воздействие пожара характеризуется правой частью граничного условия (2), при этом считается, что температура $T_f(t)$ изменяется по закону [2, 9]

$$T_f(t) = T_0 + 345 \lg(0,133t + 1),$$

где T_0 — начальная температура, время t измеряется в секундах. Условие (4) на тыльной поверхности изоляции описывает теплоотдачу в окружающую среду посредством конвекции и излучения. Непрерывность температуры и теплового потока на границе слоев x_1 и x_2 отражена в граничных условиях четвертого рода (3) [8, 10]. В случае отсутствия огнезащитного покрытия тепловая нагрузка (2) пожара переносится на наружную поверхность пластины.

С целью качественного анализа системы уравнений (1)–(5) рассмотрим ее возможные упрощения. Высокая теплопроводность металла, на два порядка превышающая типичные значения для покрытия и изоляции, а также его малая толщина обеспечивают равномерность профиля температуры по толщине пластины. Это позволяет перейти от трехслойной системы к двухслойной с сосредоточенной теплоемкостью на границе $x = x_1$ системы «покрытие — изоляция». Для этого достаточно проинтегрировать уравнение (1) при $i = 2$ от x_1 до x_2 , полагая $T_2(t, x) \approx T_2(t)$ и учитывая условия сопряжения (3) при x_1 и x_2 . В результате получим модифицированное граничное условие для двухслойной системы «покрытие — изоляция» при $x = x_1$:

$$x = x_1, \quad x_2 = x_1: \quad (\rho c \delta)_2 \frac{dT_2}{dt} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_1+0} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1-0} = q_1 - q_3, \quad (6)$$

$$T_2 \Big|_{x=x_1} = T_1 \Big|_{x=x_1-0} = T_3 \Big|_{x=x_1+0}, \quad q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x},$$

Теплофизические свойства материалов изоляции

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ε	a , м ² /с	ε_s , Вт·с ^{1/2} /(м ² ·К)
Асбоцемент	1800	0,349	837	0,56	$0,23_{10}^{-6}$	725,1
Стекловата	200	0,037	670	0,56	$0,28_{10}^{-6}$	70,4
Базальт полужесткий МПСГ	400	0,05	800	0,56	$0,16_{10}^{-6}$	126,5

где q — плотность теплового потока. Соотношение (6) имеет простой физический смысл: изменение теплосодержания пластины равно разности тепловых потоков — поступившего (q_1) через покрытие и ушедшего (q_3) в изоляцию.

В отсутствие огнезащитного слоя поток q_1 в (6) заменяется выражением тепловой нагрузки пожара. Уравнение теплового баланса незащищенной пластины (6) в этом случае принимает вид

$$x = 0: (\rho c \delta)_2 \frac{dT_2}{dt} = \alpha_f (T_f - T_2) + \sigma \varepsilon_{rf} (T_f^4 - T_2^4) - q_3, \quad (7)$$

Как правило, при математическом моделировании огневых испытаний последним слагаемым в (6), (7) пренебрегают, полагая

$$q_3 = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

В реальных условиях всегда присутствует сток тепла q_3 в изоляцию. Если его уровень значительно ниже поступающего в пластину теплового потока q_1 , то такая ситуация близка к идеальной. В противном случае, при $q_1 \approx q_3$, правая часть (6) становится близкой к нулю, в эксперименте фиксируется низкая скорость роста температуры пластины и отдалается время достижения критической температуры. Все это создает ложные представления об эффективности огнезащитного покрытия.

Согласно (6) при прочих равных условиях влияние стока тепла в большей степени сказывается при испытаниях наиболее эффективных огнезащитных покрытий. Это обусловлено тем, что они значительно снижают уровень поступающего теплового потока и тем самым увеличивают период t_{fr} нагрева пластины до критической температуры T_* . Последнее приводит к увеличению количества тепла, поглощаемого изоляцией.

Качественные представления о влиянии теплофизических свойств изоляции на величину теплового потока может дать аналитическое

решение задачи о прогреве полупространства, на границе которого температура повышается на величину $T_3 - T_0$. Формулы для теплового потока $q_{loss}(t)$ и удельного расхода тепла $Q_{loss}(t)$ в этом случае имеют вид [8, 10]

$$q_{loss}(t) = (T_3 - T_0) \sqrt{\frac{(\lambda \rho c)_3}{\pi t}}, \quad (9)$$

$$Q_{loss}(t) = \int_0^t q_{loss}(t) dt = 2(T_3 - T_0) \sqrt{\frac{(\lambda \rho c)_3 t}{\pi}}.$$

Из (9) следует, что тепловые потери определяются коэффициентом тепловой активности материала $\varepsilon_s = \sqrt{\lambda \rho c}$, при этом высокие значения ε_s характерны для теплоемкой изоляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Численный расчет сопряженной задачи (1)–(5) проводился с использованием неявной монотонной разностной схемы [11], имеющей порядок аппроксимации $O(\tau, h^2)$, где τ , h — дискретные шаги по координатам t , x соответственно.

Исходные параметры задачи: $\alpha_f = 20$ Вт/(м²·К), $\varepsilon_f = 0,85$, теплофизические свойства стальной пластины — $\rho_2 = 7800$ кг/м³, $c_2 = 465$ Дж/(кг·К), $\lambda_2 = 47$ Вт/(м·К), степень черноты поверхности $\varepsilon_2 = 0,56$. Свойства материалов изоляции приведены в таблице (a — температуропроводность). Коэффициент теплообмена при свободной конвекции на тыльной поверхности (изоляция, пластина) $\alpha_e = 5$ Вт/(м²·К), приведенная степень черноты $\varepsilon_{re} = (1/\varepsilon_3 + 1/\varepsilon_e - 1)^{-1}$, причем $\varepsilon_e = 1$. Рассматривался толстый слой изоляции ($\delta_3 = 0,5$ м), моделирующий полупространство, чтобы исключить этот параметр из числа определяющих.

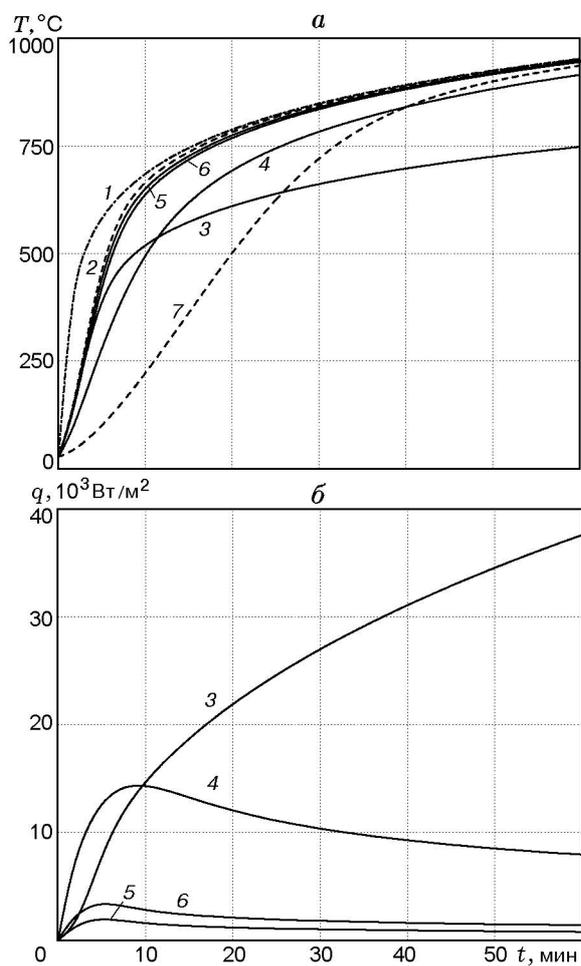


Рис. 3. Динамика процесса нагрева незащищенной металлической пластины при различной изоляции ее тыльной поверхности:

a — температура, b — плотность теплового потока в изоляцию, 1-6 — $\delta_{steel} = 2$ мм, 1 — условия стандартного пожара [1, 2], 2 — адиабатическое условие, 3 — открытая поверхность, 4 — асбоцемент, 5 — стекловата, 6 — базальт полужесткий МПСГ, 7 — $\delta_{steel} = 20$ мм, адиабатическое условие

Незащищенная пластина

На рис. 3, a показана динамика нагрева незащищенной пластины с приведенной толщиной металла [2] $\delta_{steel} = 2$ мм при различном виде изоляции ее тыльной поверхности. Кривая 2 является предельной, сравнение с ней показывает влияние тепловых потерь на показатели огнестойкости пластины. Другая крайняя ситуация, связанная с полным отсутствием теплоизоляции, представлена кривой 3.

Как следует из расчетов, время достижения критической температуры $T_* = 500$ °С (далее — огнестойкость) для тонкой (2 мм) сталь-

ной пластины с идеальной изоляцией $t_{fr}^* \approx 5,4$ мин. Это очень низкий показатель, учитывая, что сама температура пожара $T_f(t)$ достигает значения 500 °С только при $t \approx 3$ мин. При открытой тыльной поверхности пластины наблюдаемая огнестойкость составляет $t_{fr} \approx 9$ мин, что дает по сравнению с t_{fr}^* ошибку порядка $\delta_{fr} \approx 40$ % ($\delta_{fr} = |(t_{fr} - t_{fr}^*)/t_{fr}| \cdot 100$ %) и указывает на необходимость применения изоляции. Кривые 5, 6, характеризующие различные материалы изоляции, расположены достаточно близко к идеальной траектории нагрева 2, и увеличение огнестойкости практически отсутствует. Обращает на себя внимание действие другого материала — асбоцемента (кривая 4), часто используемого в лабораторных и стендовых испытаниях. Согласно расчетам его применение в качестве изоляции дает завышение огнестойкости незащищенной пластины толщиной 2 мм на 85 %.

Уменьшение толщины металлической пластины усиливает влияние стока тепла в изоляцию. Толстая пластина, наоборот, в силу своей инерционности малочувствительна к тепловым потерям и типу изоляции. Однако даже при $\delta_{steel} = 20$ мм (кривая 7 на рис. 3, a) повышение устойчивости к воздействию пожара все еще ниже необходимого по нормам противопожарной безопасности минимального предела огнестойкости 0,5 ч [1, 2], и проблема теплозащиты остается актуальной для толстых слоев металла.

Закономерности прогрева системы «пластина — изоляция» хорошо прослеживаются на кривых $q(t)$ (рис. 3, b). Для открытой и защищенной тыльной поверхностей они имеют принципиально разный характер. В первом случае (кривая 3) с ростом температуры металла непрерывно возрастает рассеиваемый в окружающей среде тепловой поток, причем в основном за счет переизлучения. Во втором случае после нагрева прилегающего к пластине слоя материала наблюдается его снижение. Максимум теплового потока в слой стекловаты, согласно кривой 5 рис. 3, b , не превышает 2 кВт/м², что почти в семь раз меньше, чем в асбоцементную плиту (кривая 4).

С точки зрения тепловых потерь важной характеристикой является толщина L_{is} прогретого слоя изоляции. Ее можно оценить из аналитического решения задачи о нагреве полупространства. Согласно [9]

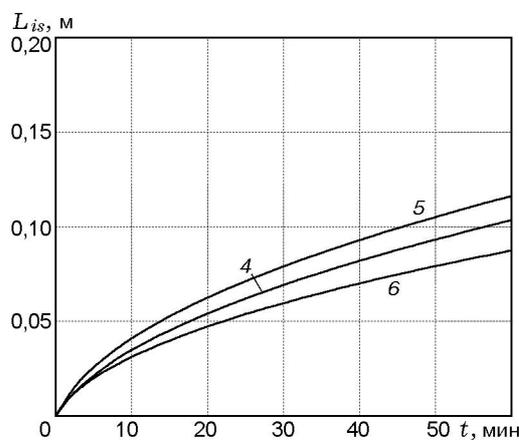


Рис. 4. Глубина прогрева изоляции для незащищенной металлической пластины ($\delta_{steel} = 2$ мм):

4 — асбцемент, 5 — стекловата, 6 — базальт полужесткий МПСГ

$$4\sqrt{a_3 t} > L_{is} > 2\sqrt{a_3 t}, \quad (10)$$

где t — время испытаний, $a_3 = \lambda_3 / \rho_3 c_3$ — температуропроводность изоляционного материала. На рис. 4 показана полученная расчетным путем глубина прогрева изоляции при стандартных огневых испытаниях пластины, которая определена по положению избыточной изотермы $\Delta T = T - T_0 = 5$ °С. При длительности испытаний 1 ч прогрев базальтостекловолоконной плиты МПСГ составляет $\approx 8,5$ см, стекловаты — ≈ 12 см, что находится в пределах оценки (10).

Следует отметить, что приведенный выше анализ относится к термически инертным материалам. Однако именно этим свойством должна обладать изоляция для обеспечения контроля стока тепла. Выполнение условия (10) гарантирует затухание тепловой волны в массиве изоляции, в этом случае не возникает проблем с постановкой невозмущенного краевого условия при математическом моделировании огневых испытаний.

Пластина с теплозащитным покрытием

Наличие дополнительного слоя между газовой средой пожара и металлической пластиной приводит к заметному снижению уровня поступающего теплового потока и, следовательно, к увеличению продолжительности испытания. На этом фоне значительно возрастает роль утечек тепла. На рис. 5,а в ка-

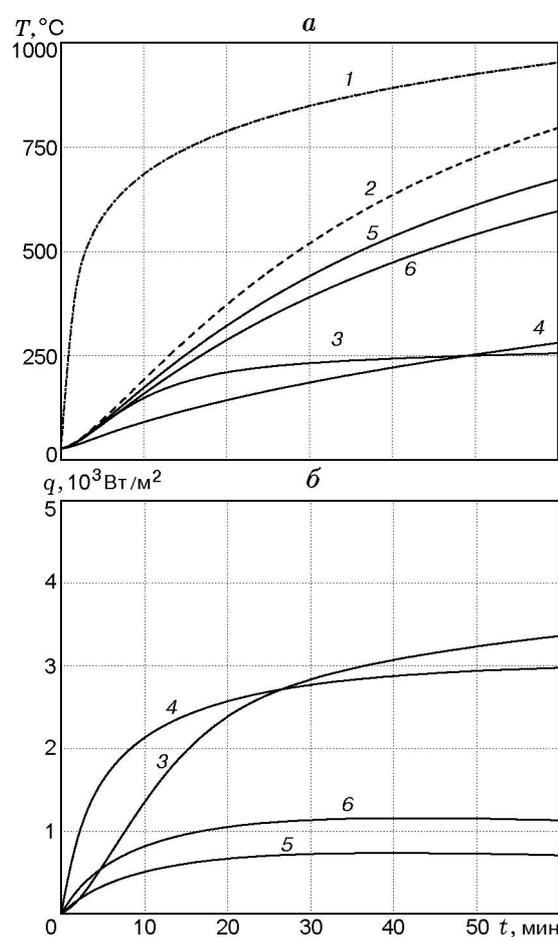


Рис. 5. Нагрев металлической пластины с огнезащитным покрытием ($\delta_{steel} = 2$ мм, $\delta_1 = 10$ мм):

а — температура, б — плотность теплового потока в изоляцию, 1 — температура пламени, 2 — адиабатическое условие, 3 — открытая тыльная поверхность, 4 — асбцемент, 5 — стекловата, 6 — базальт полужесткий МПСГ

честве примера показан нагрев двухмиллиметрового слоя металла с негорючим огнезащитным покрытием типа пенококса толщиной $\delta_1 = 10$ мм с теплофизическими параметрами $\rho_1 = 50$ кг/м³, $c_1 = 800$ Дж/(кг·К), $\lambda_1 = 0,05$ Вт/(м²·К), $\varepsilon_1 = 0,8$. Фактически перед пластиной находится более эффективный теплоизолятор, чем с тыльной стороны. Картина тепловых потоков в изоляцию для рассматриваемого случая представлена на рис. 5,б.

Согласно кривой 2 на рис. 5,а в адиабатических условиях время стойкости пластины с покрытием равняется $t_{fr}^* = 28$ мин. При открытой тыльной поверхности пластины температура металла (кривая 3) вообще не дости-

гает 500 °С, что означает качественно неверный результат. Этот вывод можно отнести и к кривой 4, соответствующей изоляции на основе асбоцемента. Кривые 5, 6 заметно отклоняются от идеальной траектории нагрева 2 и тем самым завышают огнестойкость пластины на 9 ÷ 15 мин, что дает ошибку $\delta_{fr} \approx 25 \div 35 \%$.

Данный уровень отличия сопоставим с минимальным интервалом времени (0,25 ч) шкалы пределов огнестойкости. Неучет этого обстоятельства завышает возможности огнезащиты и может привести к необоснованной эксплуатации конструкций на объектах повышенной пожарной опасности. Теплофизические свойства материала изоляции напрямую влияют на время огнестойкости t_{fr} , особенно при испытаниях тонких пластин с покрытием, поэтому для корректного моделирования этого процесса необходимо применение сопряженной постановки задачи. Анализ рассмотренных случаев показывает, что методическое обеспечение проведения огневых испытаний должно содержать конкретизацию типа и теплофизических свойств изоляционного материала, а возможно, и их стандартизацию. Это позволит уменьшить разброс данных по определению показателя огнестойкости на различных установках и стендах.

Наличие покрытия не меняет общих закономерностей влияния толщины пластины на роль утечек тепла. Увеличение толщины металла ослабляет их действие, а уменьшение, наоборот, усиливает.

О КРИТЕРИЯХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

С практической точки зрения представляет интерес отношение тепловых потерь J_{loss} в изоляцию к собственному теплосодержанию пластины Q_{plate} , полученному в ходе проведения испытания:

$$\bar{J}(t) = \frac{J_{loss}(t)}{Q_{plate}(t)} \approx \frac{\int_0^t q_{loss}(\tau) d\tau}{\rho_2 c_2 \delta_2 (T_2(t) - T_0)}, \quad (11)$$

где $q_{loss}(t)$ — тепловой поток в изоляцию.

С использованием этого параметра можно определить «коэффициент полезного действия» изоляции

$$\eta(t) = \frac{Q_{plate}(t)}{Q_{plate}(t) + J_{loss}(t)} = \frac{1}{1 + \bar{J}}. \quad (12)$$

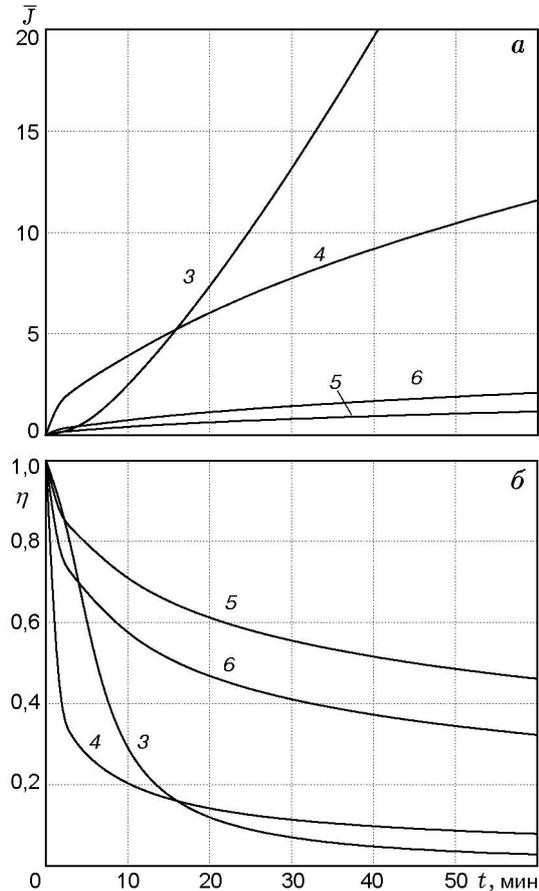


Рис. 6. Тепловые потери (а) и коэффициент эффективности изоляции (б) для незащищенной металлической пластины ($\delta_{steel} = 2$ мм): 3 — открытая тыльная поверхность, 4 — асбоцемент, 5 — стекловата, 6 — базальт полужесткий МПСГ

Для идеального случая (т. е. адиабатических условий) $\bar{J} = 0$, поэтому $\eta = 1$ и вся тепловая нагрузка пожара идет на нагрев пластины. Для теплоемкой изоляции $\bar{J} \rightarrow \infty$ и $\eta \rightarrow 0$. Ясно, что должно выполняться условие $\bar{J} < 1$, в противном случае все тепло будет аккумулироваться в изолирующем массиве. Для стали $T_* = 500$ °С, поэтому тепловые потери за время t_{fr}^* испытания не должны превышать значения

$$\int_0^{t_{fr}^*} q_{loss}(\tau) d\tau < 1,7 \cdot 10^9 \delta_2 \text{ [Дж/м}^2\text{]}. \quad (13)$$

Графики $\bar{J}(t)$ и $\eta(t)$ для незащищенной и защищенной металлической пластины с изоляцией различного вида представлены на рис. 6, 7. При

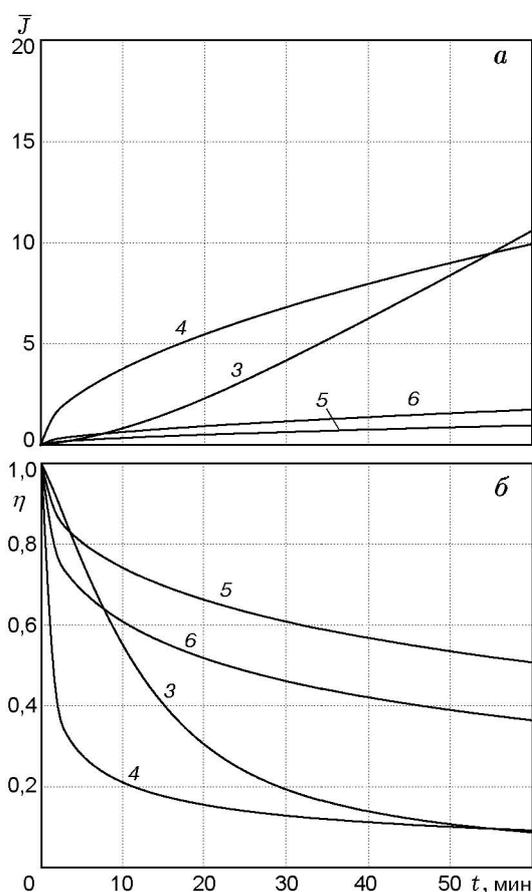


Рис. 7. Тепловые потери (а) и коэффициент эффективности изоляции (б) для металлической пластины ($\delta_{steel} = 2$ мм) с огнезащитным покрытием ($\delta_1 = 10$ мм):

3 — открытая тыльная поверхность, 4 — асбоцемент, 5 — стекловата, 6 — базальт полужесткий МПСГ

длительности испытаний ≈ 30 мин (достижение температуры 500°C , рис. 5,а) для стекловаты тепловые потери составляют $\bar{J}(t) \approx 0,64$ (рис. 7,а), несколько выше для базальтоволоконистых плит — $\bar{J}(t) \approx 1,17$, что дает значения эффективности изоляции $\eta \approx 60$ и 46% соответственно (рис. 7,б). В случае открытой тыльной поверхности $\bar{J}(t) \approx 4,2$ (рис. 7, а), для асбоцементных плит $\bar{J}(t) \approx 6,8$, т. е. тепловые потери в несколько раз превышают собственное теплосодержание пластины, поэтому значения $\eta \approx 19$ и 13% (рис. 7,б) очень малы. Это свидетельствует о важности вопроса тепловой изоляции тыльной поверхности пластины и необходимости правильного выбора материала для этой цели. Увеличение толщины металла при прочих равных условиях ослабляет

влияние утечек тепла и тем самым повышает коэффициент эффективности изоляции.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при испытаниях металлической пластины имеет место значительное влияние тепловых потерь на время огнестойкости. Количественно оно зависит от многих факторов — толщины металла, теплофизических свойств изоляции, покрытия, времени испытаний. Установление такой связи — предмет отдельного исследования. Однако ясно, что для повышения достоверности огневых испытаний, особенно длительных (2 ÷ 3 ч), следует учитывать тепловые стоки и вносить соответствующую поправку (в сторону уменьшения) в фиксируемое при испытаниях время огнестойкости. Величина тепловых потерь в ходе эксперимента может оцениваться различными способами, например, по данным измерений теплового поля в изоляции. Математически точным для этой цели является восстановление теплового потока в изоляцию по известной температурной зависимости от времени на границе «металл — изоляция» с помощью обратной задачи теплообмена [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе математического моделирования показано влияние тепловых потерь на результаты испытаний огнестойкости плоской металлической пластины.

2. Наличие внешнего слоя покрытия, малая приведенная толщина металла и большая продолжительность огневых испытаний приводят к росту влияния тепловых потерь при определении времени огнестойкости. Для корректного моделирования испытаний теплоогнезащиты пластины необходимо использовать сопряженную постановку задачи, учитывающую распространение тепла в изоляцию. Предложены интегральные критерии, характеризующие эффективность теплоизоляции.

3. Методическое обеспечение проведения огневых испытаний должно содержать конкретизацию, а возможно, и стандартизацию типа и теплофизических свойств изоляционного материала. Необходимо путем измерения теплового поля в изоляции и применения обратных задач теплообмена осуществлять контроль стока тепла. Это позволит уменьшить разброс данных по определению показателя огнестойкости металлических конструкций на различных установках и стендах и в конечном

счете повысить объективность этих испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романенков И. Г., Левитес Ф. А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991.
2. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1985.
3. НПБ 236-97. Огнезащитные составы для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности.
4. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу. Методика. М.: ВНИИПО, 1998.
5. Решетников И. С., Антонов А. В., Халтуринский И. И. Математическое описание горения вспучивающихся систем // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 6. С. 48–67.
6. Зверев В. Г., Гольдин В. Д., Несмелов В. В., Цимбалюк А. Ф. Моделирование тепло- и массопереноса во вспучивающихся огнезащитных покрытиях // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 2. С. 90–98.
7. Гришин А. М., Фомин В. М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
9. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990.
10. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976.
11. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981.
12. Алифанов О. М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. (Введение в теорию обратных задач). М.: Машиностроение. 1979.
13. Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч., мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989.

Поступила в редакцию 25/VIII 2003 г.