

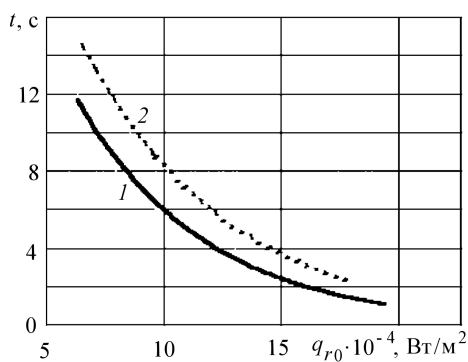
УДК 614.841:620.193.6

В. Н. Елисеев, А. В. Товстоног,  
В. А. Товстоног

## РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОГНЕТЕПЛОЗАЩИТЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ

*Приведены результаты исследований в области создания огнетеплозащиты объектов для условий экстремальных ситуаций, сопровождаемых крупномасштабными пожарами, когда имеет место высокоинтенсивное воздействие излучения на окружающую среду. Показано, что для этих условий эффективно использование частично прозрачных для излучения объемно-отражающих материалов. Рассмотрены некоторые типы волокнистых и дисперсно-наполненных материалов и их теплозащитные характеристики. Предложена система комбинированной огнетеплозащиты подвижных технических средств на основе вспучивающегося и объемно-отражающего материала и приведены ее основные характеристики.*

Экстремальная ситуация, определяемая как совокупность условий, чрезвычайных по сложности или опасности, является следствием плохо прогнозируемых природных или техногенных катастроф или аварий, часто сопровождаемых скоротечным высокоинтенсивным тепловым воздействием на окружающую среду и находящиеся там объекты. Ряд таких ситуаций — массированные лесные пожары, пожары при разливах и истечении жидких топлив, пожары при разгерметизации продуктопроводов или емкостей для хранения горючих газов — и соответствующие им модели теплового воздействия рассмотрены в работе [1]. Показано, что в этих условиях основное тепловое воздействие связано с широкополосным излучением видимого и ИК-диапазонов спектра из высокотемпературной области горения. Параметры излучения соответствуют эквивалентному излучателю с температурой от 1000 до 3000 К, характерное время воздействия излучения составляет от нескольких секунд до нескольких минут при максимальной интегральной плотности потока излучения до  $20 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, область воздействия излучения составляет сотни метров. Излучение с такими параметрами может привести к катастрофическим последствиям, если объекты не обеспечены средствами тепловой защиты.



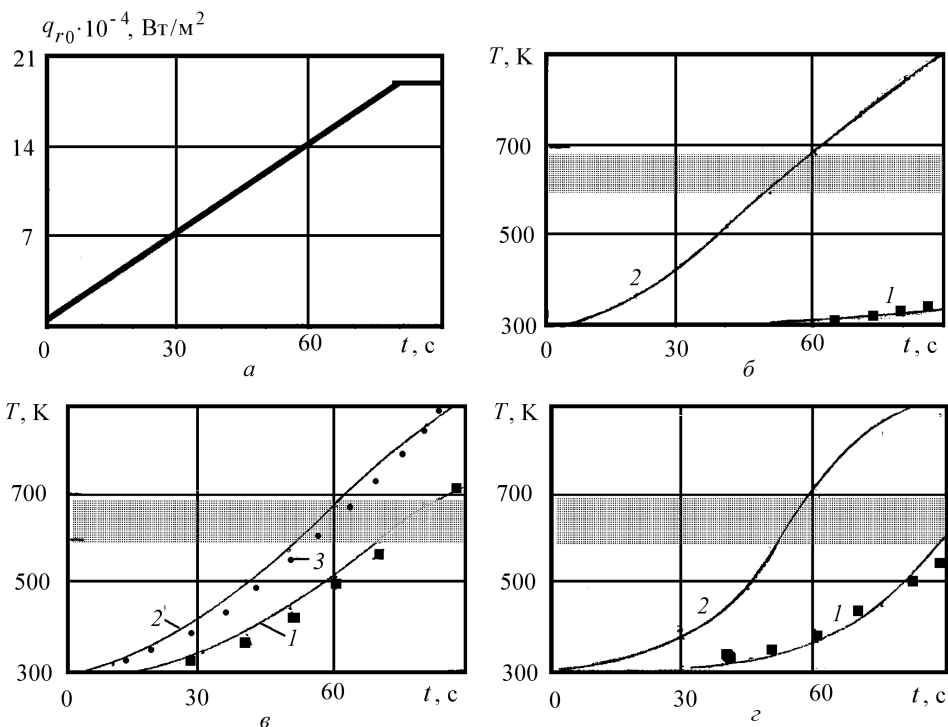
**Рис. 1.** Графики зависимости времени воспламенения хлопчатобумажной ткани от плотности потока падающего излучения:

1 — сухая ткань; 2 — промасленная ткань

—  $10^{\circ}\text{C}$ , из которых, в частности, следует, что ткань воспламеняется на большом расстоянии от области энерговыведения (зоны горения), что наиболее характерно в случаях экстремальных ситуаций, рассмотренных в работе [1]. (Несколько необычный результат — повышенная сопротивляемость зажиганию промасленной ткани — связан с фактом увеличения прозрачности ткани по отношению к излучению при промасливании.)

На рис. 2 приведены графики температурных зависимостей при нагреве образцов потоком излучения, моделирующим воздействие излучения лесного пожара (рис. 2, а). Из рис. 2, б–г видно, что предел огнестойкости для рассмотренных материалов (затененная полоса) — стали, стеклопластика, резины — достигается задолго до непосредственного попадания во фронт пламени.

Разработка эффективных средств огнетеплозащиты объектов, потенциально опасных в условиях экстремальных ситуаций, или предназначенных для ведения операций в таких условиях — исключительно актуальная проблема государственного значения, так как подобные ситуации стали чуть-ли не повседневным явлением. Так, согласно Государственному докладу МЧС РФ, в 2003 г. произошло 33 тыс. лесных пожаров, площадь поражения составила 2 309 тыс. га; 239 300 пожаров на объектах экономики и в жилом секторе (погибло 19 275 человек и уничтожено  $\sim 7500$  ед. техники); 48 крупных аварий на магистральных нефте- и газопроводах (давление в магистральном газопроводе  $\sim 12$  МПа), сопровождающихся пожарами, причем основная причина таких аварий — высокая степень износа трубопроводов ( $\sim 75\%$ , причем 15% трубопроводов работают на пределе нормативного срока службы). И в соответствии с прогнозами, не следует ожидать скорого улучшения положения с чрезвычайными ситуациями, особенно в техногенной сфере.



**Рис. 2. Графики зависимости плотности потока падающего излучения (а) и температуры на тыльной (1) и нагреваемой (2, 3) поверхностях образцов материалов от времени:**

*б* — армированная резина толщиной 15 мм; *в* — стеклопластик (1, 2) и сталь (3) толщиной 2 мм; *з* — стеклопластик толщиной 4 мм

При экстремальных ситуациях, сопровождаемых массивными пожарами, многие традиционные средства огнетеплозащиты неэффективны. Поэтому необходимы новые решения, учитывающие специфические условия теплового воздействия, а именно, преобладающую роль нагрева излучением. Требования, предъявляемые к огнетеплозащитному материалу, определяются его целевым назначением, совокупностью необходимых эксплуатационных свойств (например, вибростойкостью, стойкостью к климатическим факторам и механическим воздействиям) и внешними условиями теплового нагружения. Эффективность огнетеплозащитного материала, в первую очередь, определяется физическими процессами, способствующими снижению доли внешнего теплового потока, непосредственно идущей на нагрев защитного покрытия. Для рассматриваемых условий (при преимущественной роли нагрева излучением) этого можно достичь лишь за счет высокой отражательной способности покрытия в спектре действующего излучения. В простейшем варианте для этого могут использоваться тонкопленочные металлические покрытия или экраны. Однако высокая теплопро-

водность, а для пленочных покрытий и легкость разрушения пленки при механических воздействиях ограничивают возможности применения таких защитных средств. Наиболее перспективным представляется использование объемно-отражающих (рассеивающих) материалов [4]. Их основное свойство — это частичная прозрачность (полупрозрачность) в спектре действующего излучения и оптическая неоднородность, благодаря которой достигается эффект объемного отражения при многократном рассеянии излучения на неоднородностях среды. По сути — это композиционные материалы, содержащие дисперсионную среду с распределенной в ней дисперсной фазой (рассеивающими частицами), и свойства такой многофазной системы, в том числе и способность отражать излучение, определяются физическими свойствами и концентрацией компонентов композиции; варьирование параметрами композиции позволяет синтезировать материал, в наибольшей степени удовлетворяющий заданным требованиям.

При этом возможны два подхода: *экспериментальный* — целенаправленный перебор параметров композиции и оценка свойств материала, определяющих его практическую применимость; *теоретический* — описание структуры материала и процессов ее взаимодействия с внешними факторами математическими моделями, адекватно отражающими реальные процессы. Второй подход позволяет реализовать перебор практически неограниченного числа вариантов композиции и установить область ее оптимальных параметров.

Свойства оптически неоднородной рассеивающей среды (материала), определяющие основную проектную характеристику защитного материала (покрытия) — отражательную способность, зависят от большого числа параметров: комплексных показателей преломления дисперсионной среды  $m_{\lambda}^c = n_{\lambda}^c - ik_{\lambda}^c$  и дисперсной фазы  $m_{\lambda}^p = n_{\lambda}^p - ik_{\lambda}^p$  (индекс  $\lambda$  подчеркивает зависимость этих параметров от длины волны излучения), размера, формы и концентрации рассеивателей (рассеивающих частиц). Практически дисперсионная среда должна иметь как можно меньшее поглощение в спектре действующего излучения (для сильно рассеивающих материалов  $k_{\lambda}^c \rightarrow 0$ ), а отношение действительных частей показателя преломления  $|n_{\lambda}^p - n_{\lambda}^c|/n_{\lambda}^c$  должно быть наибольшим [5]. Этим критериям для излучения видимой и ближней ИК-областей спектра, где сосредоточена основная доля излучения продуктов горения, в наибольшей степени удовлетворяют диэлектрические материалы — полимеры, оксидные и фторидные керамики. Так, например, отражательная способность кварцевой керамики с пористостью 12–20 % достигает  $\sim 0,99$  в широком спектральном интервале [6].

Непосредственная связь отражательной способности покрытия  $\mathcal{R}$  с оптическими характеристиками компонентов композиции устанавли-

вается при решении уравнения переноса излучения для рассеивающей среды [4], свойства которой как континуума описываются коэффициентами поглощения  $\kappa_\lambda$ , рассеяния  $\sigma_\lambda$  и ослабления  $\varepsilon_\lambda = \sigma_\lambda + \kappa_\lambda$ , непосредственно связанными со структурой композиции и физическими характеристиками ее компонентов (комплексными показателями преломления)<sup>1</sup>. Установление такой связи — отдельная задача оптики рассеивающих сред [7]. В первом приближении эта процедура может быть реализована с использованием соотношений теории Ми, основанной на решениях уравнений Максвелла для электромагнитной волны, рассеиваемой одиночной частицей [8, 9]. Согласно этому методу, рассчитываются факторы эффективности ослабления  $Q_{ex}$ , рассеяния  $Q_s$  и поглощения  $Q_p = Q_{ex} - Q_s$  рассеивателем определенной формы и размеров для заданной длины волны излучения  $\lambda$  и соответствующие сечения ослабления  $\Sigma_{ex}$ , рассеяния  $\Sigma_s$  и поглощения  $\Sigma_p$ :

$$\Sigma_{ex} = Q_{ex} S; \quad \Sigma_s = Q_s S; \quad \Sigma_p = Q_p S,$$

где  $S$  — эффективная площадь рассеивающей частицы: для сфероида  $S = \pi r^2$  ( $r$  — радиус частицы); для цилиндрического волокна  $S = dl$  ( $d$  — диаметр,  $l$  — длина, причем  $l \gg d$ ); для бесформенной частицы объемом  $V$  и характерной длиной  $L$  это может быть  $S = V/L$ .

Угловое распределение излучения, рассеянного частицей, описывается индикатрисой рассеяния  $\gamma(\beta)$ , где  $\beta$  — угол между направлениями падающего и рассеянного лучей. Индикатрисы рассеяния частиц, соизмеримых с длиной волны излучения, сильно анизотропны, что может быть учтено введением приведенного фактора рассеяния

$$Q_{s,ef} = Q_s \left[ 1 - 0,5 \int_0^\pi \gamma(\beta) \sin \beta \cos \beta d\beta \right].$$

Эффективные значения оптических характеристик среды как совокупности однородных рассеивателей определяются простым аддитивным сложением:

$$\varepsilon = N \Sigma_{ex}; \quad \sigma = N \Sigma_s; \quad \kappa = N \Sigma_p,$$

где  $N$  — концентрация частиц в единице объема. Если же среда неоднородна по размерам частиц, то

$$\varepsilon = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} N(L) \Sigma_{ex}(L) dL; \quad \sigma = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} N(L) \Sigma_s(L) dL; \quad \kappa = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} N(L) \Sigma_p(L) dL,$$

<sup>1</sup> Далее спектральный индекс  $\lambda$  будет опущен; подразумевается, что спектральная зависимость всех оптических свойств имеет место.

где  $N(L)$  — функция распределения частиц по размерам, выражающая число частиц с размерами от  $L$  до  $L + \Delta L$  в единице объема, т.е.

$$dN(L) = N(L) dL.$$

Сечения ослабления, рассеяния и поглощения индивидуальной частицы выражаются через коэффициенты амплитудных функций рассеяния, найденные из решений уравнения Максвелла. Приведем их выражения для наиболее распространенных рассеивателей.

**Сферическая частица** радиусом  $r$  (в оптике рассеивающих сред размер частицы обычно характеризуются параметром дифракции  $\chi = 2\pi r/\lambda$ ):

$$Q_{ex} = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n);$$

$$Q_s = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2).$$

Коэффициенты комплексных амплитудных функций определяются соотношениями

$$a_n = \frac{A_n(m\chi) \psi_n(\chi) - m\psi'_n(\chi)}{A_n(m\chi) \xi_n(\chi) - m\xi'_n(\chi)}; \quad b_n = \frac{mA_n(m\chi) \psi_n(\chi) - \psi'_n(\chi)}{mA_n(m\chi) \xi_n(\chi) - \xi'_n(\chi)},$$

где  $\psi_n(\chi)$  и  $\xi_n(\chi)$  — функции Рикатти–Бесселя;  $A_n(m\chi) = \psi'_n(m\chi)/\psi_n(m\chi)$ .

**Цилиндрическая частица** (волокно) диаметром  $d$  ( $\chi = \pi d/\lambda$ ; отношение длины частицы к диаметру  $l/d > 5$ ):

$$Q_{ex} = \frac{1}{\chi} \operatorname{Re} \left\{ (a_0 + b_0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + b_n) \right\};$$

$$Q_s = \frac{1}{\chi} \left\{ (|a_0|^2 + |b_0|^2) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (|a_n|^2 + |b_n|^2) \right\},$$

где коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  выражаются через логарифмическую производную  $d[\ln I_n(\chi)]/d\chi$  функций Бесселя  $I_n(\chi)$   $n$ -го порядка и функции Ганкеля  $H_n^1(\chi)$ :

$$a_n = \frac{[D_n(m\chi)/m + n/\chi] I_n(\chi) - I_{n-1}(\chi)}{[mD_n(m\chi)/m + n/\chi] H_n^1(\chi) - H_{n-1}^1(\chi)};$$

$$b_n = \frac{[mD_n(m\chi) + n/\chi] I_n(\chi) - I_{n-1}(\chi)}{[mD_n(m\chi) + n/\chi] H_n^1(\chi) - H_{n-1}^1(\chi)};$$

$$D_n(m\chi) = I'_n(m\chi)/I_n(m\chi).$$

**Оптическая модель вещества.** Первичная характеристика однородного вещества, определяющая все закономерности его взаимодействия с излучением — это комплексный показатель преломления  $m_\lambda = n_\lambda - ik_\lambda$ , действительная и мнимая часть которого зависят от длины волны излучения. Этот показатель отражает атомно-молекулярную структуру вещества, причем  $n_\lambda$  относительно слабо зависит от длины волны излучения по сравнению с показателем поглощения  $k_\lambda$  излучения в веществе (в технических приложениях обычно используют коэффициент поглощения вещества  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ ).

Зависимость поглощения излучения от длины волны проявляется в существовании полос поглощения, соответствующих колебаниям той или иной группы атомов, и соответствующих им областей прозрачности и непрозрачности. Это необходимо учитывать при расчетах параметров взаимодействия излучения с веществом, формально это учитывается интегрированием характеристик, отражающих такое взаимодействие (поток излучения или его дивергенция), по спектру источника излучения. Для сложных спектров это непростая задача, поэтому в технических приложениях целесообразно использовать групповую модель, смысл которой — представление спектра поглощения вещества совокупностью полос  $\Delta\lambda_i$ , в пределах каждой оптические свойства вещества считаются постоянными. Сюда же включаются и полосы непрозрачности  $\Delta\lambda_j$ , где  $k_\lambda \rightarrow \infty$ . В области непрозрачности поглощение излучения носит не объемный, а поверхностный характер. Таким образом, согласно этой модели поток излучения действующего источника может быть представлен в виде

$$q_{r0} = \sum_i q_{r0,\lambda_i}^{ht} + \sum_j q_{r0,\lambda_j}^{bb}, \quad (1)$$

где  $q_{r0,\lambda_i(j)} = \int_{\Delta\lambda_{i(j)}} q_{r0}(\lambda) d\lambda$  — плотность потока излучения в спек-

тральном интервале  $\Delta\lambda_{i(j)}$ , соответствующем  $i(j)$ -й спектральной полосе в области полупрозрачности (индекс  $ht$ ) или непрозрачности (индекс  $bb$ ). Очевидно, что  $\sum_j q_{r0,\lambda_j}^{bb} \sim -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}$ , т.е. тепловому пото-

ку, передаваемому вглубь нагреваемого тела путем теплопроводности ( $x$  — координата вдоль нормали к поверхности).

Пользуясь групповой моделью, оценим оптические характеристики некоторых волокнистых (тканей) и композиционных материалов на органических и неорганических связующих с наполнителями в виде дисперсных частиц или армирующих волокон, предполагаемых к использованию в системах тепло- и огнезащиты, основное функциональное

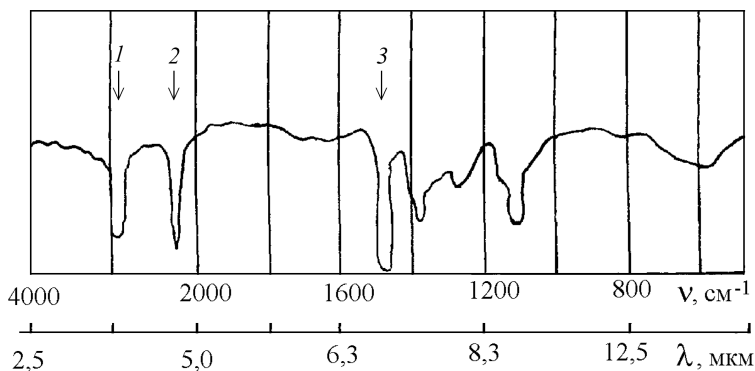


Рис. 3. Спектр пропускания полиакрилонитрила

назначение которых — объемное отражение (рассеяние) воздействующего излучения.

**Оптические характеристики волокнистых материалов.** Волокнистые материалы широко используются или индивидуально в виде тканей, или в составе композиционных материалов как армирующий наполнитель. Для тканых материалов оптические свойства определяются физическими свойствами материала волокна и его диаметром, а также плотностью плетения (числом волокон в единице объема). Дадим сравнительную оценку характеристик волокнистых материалов на основе полиакрилонитрила (нитрон) и двуокиси кремния (стекловолокно).

**Волокна полиакрилонитрила.** Полиакрилонитрил (ПАН) — полимер с линейным строением макромолекулы  $(-\text{CH}_2 - \text{CH}(\text{C} \equiv \text{N})-)$  имеет полосы поглощения, расположенные в ИК-области (рис. 3), и слабое поглощение в видимой области спектра. Плотность волокна ПАН  $\sim 1180 \text{ кг/м}^3$ , показатель преломления  $n = 1,52$ . Коэффициент поглощения  $\alpha \simeq 65 \text{ мм}^{-1}$  в пределах наиболее интенсивной полосы поглощения ближней ИК-области спектра (3,2...3,5 мкм) и  $\alpha = 0,7 \text{ мм}^{-1}$  вне этой полосы вплоть до  $\lambda \sim 6,5 \text{ мкм}$ ; для дальнейшего анализа принята трехполосная оптическая модель ПАН.

*Групповая модель поглощения полиакрилонитрила*

Спектральная полоса $\lambda_i$ , мкм .....	0,4–3,2	3,2–3,5	3,5–6,0
Коэффициент поглощения $\alpha$ , $\text{мм}^{-1}$ .....	0,7	65	0,7

Расчеты по ранее приведенному алгоритму показывают, что рассеивающие свойства волокна — сильная функция параметра дифракции  $\chi$  (длины волны излучения) и  $Q_{ex} \simeq Q_s \gg Q_p$ , причем в пределах каждой полосы  $Q_p \sim \Sigma_p \simeq \text{const}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.



Сечения поглощения волокна полиакрилонитрила  $\bar{\Sigma}_p$ , мм<sup>2</sup>

$d$ , мкм	Диапазон длин волн $\lambda$ , мкм		
	0,4–3,2	3,2–3,5	3,5–6,0
10	$0,8 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$
15	$0,17 \cdot 10^{-3}$	$0,98 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^{-3}$
20	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-1}$	$0,32 \cdot 10^{-3}$

Для оценки влияния спектральных характеристик рассеивающей среды на параметры взаимодействия с излучением внешнего источника, в качестве последнего удобно рассмотреть нагретый объект (среду), излучающий как черное тело с температурой  $T_b$  (реальную среду всегда можно представить черным (серым) излучателем с некоторой эффективной температурой). Такой подход особенно удобен при сравнительных оценках. На рис. 4 приведены результаты расчетов среднеинтегральных величин факторов ослабления (эффективного, т.е. с учетом индикатрисы рассеяния) и поглощения ПАН-волокна в спектре черного излучателя с использованием следующих формул:

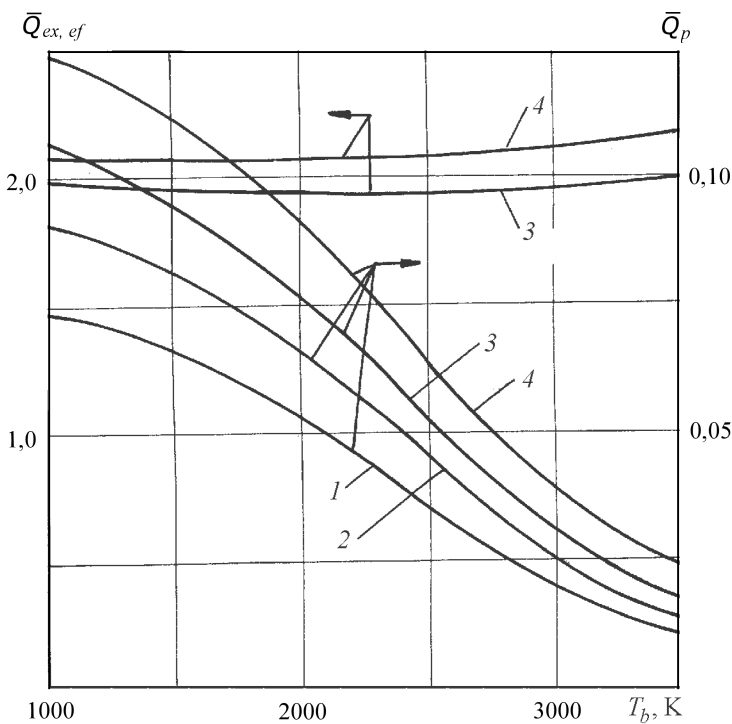
$$\bar{Q}_{ex,ef} = \frac{\sum_3 Q_{ex,ef,i} \int_{\Delta\lambda_i} B_0(T_b) d\lambda}{\sum_3 \int_{\Delta\lambda_i} B_0(T_b) d\lambda}; \quad \bar{Q}_p = \frac{\sum_3 Q_{p,i} \int_{\Delta\lambda_i} B_0(T_b) d\lambda}{\sum_3 \int_{\Delta\lambda_i} B_0(T_b) d\lambda},$$

где  $B_0(T_b)$  — функция Планка.

Как видно, в широком диапазоне изменения температуры излучателя  $\bar{Q}_{ex,ef} = \bar{Q}_{s,ef} + \bar{Q}_p \approx \text{const}$ . Кроме того, эта величина относительно слабо зависит и от диаметра волокна в диапазоне наиболее реальных значений  $d = 10 \dots 30$  мкм и может быть принята равной  $\bar{Q}_{ex,ef} = 2,05$ . Фактор поглощения, напротив, сильная функция температуры излучателя и с ее уменьшением заметно увеличивается. Причина этого — смещение спектра излучения в длинноволновую область с уменьшением  $T_b$ , где расположена основная полоса поглощения полиакрилонитрила.

Отметим, что температурная зависимость фактора поглощения с хорошей точностью описывается аналитической функцией

$$\bar{Q}_p = a_0(d) + a_1(d) \frac{T}{1000} + a_2(d) \left( \frac{T}{1000} \right)^2 + a_3(d) \left( \frac{T}{1000} \right)^3,$$



**Рис. 4. Зависимости факторов эффективности ослабления и поглощения волокон полиакрилонитрила от температуры излучателя:**  
 волокна диаметром 10 (1), 15 (2), 20 (3) и 30 мкм (4) соответственно

где

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 6,00 \cdot 10^{-3} + 5,22 \cdot 10^{-3}d - 8,00 \cdot 10^{-5}d^2; \\
 a_1 &= 3,97 \cdot 10^{-2} + 1,52 \cdot 10^{-3}d - 3,36 \cdot 10^{-6}d^2; \\
 -a_2 &= 5,98 \cdot 10^{-2} - 3,83 \cdot 10^{-3}d + 1,70 \cdot 10^{-4}d^2; \\
 a_3 &= 3,25 \cdot 10^{-3} + 2,21 \cdot 10^{-4}d - 1,73 \cdot 10^{-6}d^2;
 \end{aligned}$$

диаметр волокна измеряется в мкм ( $10^{-6}$  м).

**Стекловолокно** — материал на основе двуокиси кремния, имеющий высокую прозрачность в видимой и ближней ИК- областях спектра до  $\lambda \sim 2,5$  мкм, но в более длинноволновой области наблюдаются интенсивные полосы поглощения (рис. 5). Плотность стекловолокна составляет  $\sim 2540$  кг/м<sup>3</sup>, показатель преломления  $n \approx 1,45$ . Для целей проводимого анализа принята шестиполосная модель поглощения стекловолокна, соответствующая спектру поглощения двуокиси кремния<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Отметим, что среднеинтегральный коэффициент поглощения материала широко распространенного стекловолокна марки Е в видимой области спектра  $\bar{\kappa} \approx 0,012$  мм<sup>-1</sup>

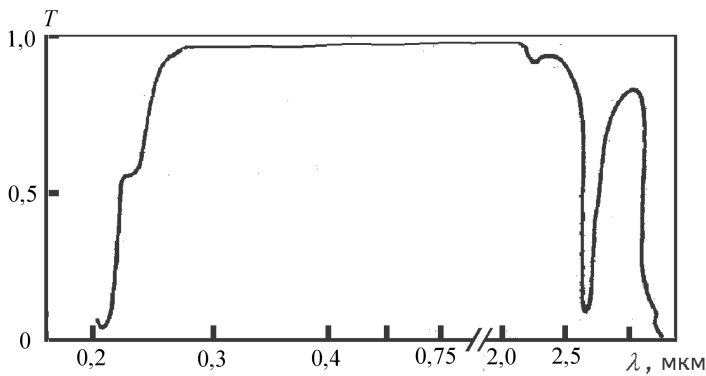


Рис. 5. Спектр пропускания диоксида кремния

*Групповая модель поглощения стекловолокна*

Длина волны $\lambda$ , мкм . . . . .	0,4–1,6	1,6–2,2	2,6–2,8	2,8–3,4	3,4–4,2	4,2–6,0
Коэффициент поглощения $\alpha$ , $\text{мм}^{-1}$ . . . . .	0,012	0,12	44	2	20	80

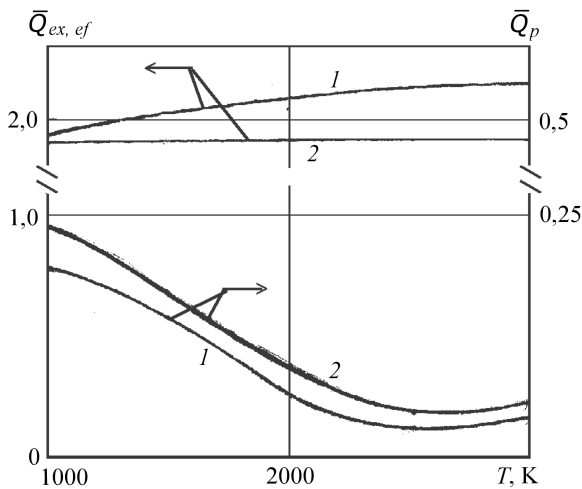
Результаты расчетов спектральных сечений ослабления и поглощения стекловолокна приведены в табл. 2, а среднеинтегральных величин факторов эффективности ослабления и поглощения в зависимости от температуры излучателя — на рис. 6.

Таблица 2

**Сечения поглощения кварцевого стекловолокна  $\bar{Q}_p$ ,  $\text{мм}^2$**

$d$ , мкм	Диапазон длин волн $\lambda$ , мкм					
	0,4–1,6	1,6–2,6	2,6–2,8	2,8–3,4	3,4–4,2	4,2–6
10	$0,12 \cdot 10^{-5}$	$0,13 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^{-2}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$0,64 \cdot 10^{-2}$
15	$0,27 \cdot 10^{-5}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$0,77 \cdot 10^{-2}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,41 \cdot 10^{-2}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$
20	$0,48 \cdot 10^{-7}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-1}$	$0,96 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-1}$

Отметим, что для стекловолокна зависимость  $\bar{Q}_p$  от диаметра волокна более слабая, чем у полиакрилонитрила (см. рис. 4). Кроме того, величина фактора поглощения  $\bar{Q}_p$  стекловолокна при одном и том же диаметре более чем в 2 раза превышает значения  $\bar{Q}_p$  ПАН-волокна в спектре низкотемпературного излучателя ( $T_b < 2000 \text{ К}$ ), но несколько меньше в спектре высокотемпературного излучателя ( $T_b \approx 3000 \text{ К}$ ). Это — следствие более интенсивного поглощения излучения в ИК-области спектра стеклом по сравнению с полиакрилонитрилом, а следовательно



**Рис. 6. Зависимости факторов эффективности ослабления и поглощения стекловолокна от температуры излучателя:**  
 волокна диаметром 10 (1) и 20 мкм (2)

и более слабым отражением излучения низкотемпературных излучателей.

**Сравнительная эффективность волокнистых материалов.** Эффективность рассеивающих материалов по отношению к воздействию излучения будем характеризовать коэффициентом отражения оптически толстого (полубесконечного) слоя, для оценки которого может быть использована формула [10]

$$\mathcal{R}_\infty = \frac{0,5\alpha - 1}{0,5\alpha + 1},$$

где  $\alpha = \sqrt{3(1 + \gamma_e)}$ ,  $\gamma_e = \sigma_e/\kappa \equiv Q_{ex.ef}/Q_p = (Q_{ex.ef} - Q_p)/Q_p = Q_{ex.ef}/Q_p - 1$  (для простоты полагаем, что среда состоит из однородных рассеивающих частиц).

На рис. 7 приведены расчетные значения  $\mathcal{R}_\infty$  рассеивающих сред из ПАН- и стекловолокна в спектре черного излучателя. Как видно, отражательная способность ПАН-волокна существенно слабее зависит от температуры излучателя, чем отражательная способность стекловолокна, причем в спектре низкотемпературного излучателя ( $T_b < 1500$  К) отражательная способность ПАН-волокна существенно выше. Так как в рассматриваемых условиях экстремальных ситуаций имеют место преимущественно низкотемпературные излучающие среды ( $T_b \sim 1000 \dots 1300$  К), защитные покрытия на основе ПАН-волокна в некоторых условиях могут оказаться более эффективными, чем на основе стекловолокна. К этим условиям относится прежде всего допустимая температура нагрева: для ПАН-волокна она ограничивается

$T \approx 200^\circ\text{C}$ , когда начинается циклизация линейных молекул полиакрилонитрила, а следовательно, происходит и увеличение поглощательной способности; для стекловолокна допустимая температура существенно выше ( $T \sim 1000^\circ\text{C}$ ). Однако допустимая температура — это не единственный фактор, определяющий выбор материала защитного покрытия; к определяющим может быть отнесен целый комплекс параметров: вес, атмосферостойкость, гигроскопичность, вибростойкость и т.д.

Рассмотрим массовые и теплоизолирующие характеристики волокнистых материалов, приняв в качестве критерия эквивалентности отражательную способность.

Отражательная способность полубесконечного слоя и слоя конечной оптической толщины связаны следующим соотношением [4]:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_\infty \frac{1 - e^{-2\alpha\tau^*}}{1 - \mathcal{R}_\infty^2 e^{-2\alpha\tau^*}},$$

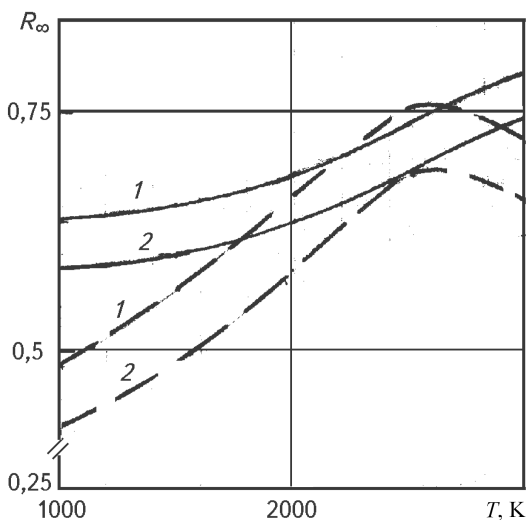
где  $\tau^* = \kappa h$ ,  $h$  — толщина слоя. При  $\zeta = e^{-\alpha\tau^*} = 0,1$   $\mathcal{R}_\infty - \mathcal{R} \simeq 10^{-3}$ , т.е. рассеивающий слой с  $\zeta \approx 0,1$  можно считать полубесконечным, а его отражательную способность — наибольшей при заданных оптических свойствах. Физическая толщина такого слоя

$$h = -\frac{1}{\alpha\kappa} \ln 0,1. \quad (2)$$

Например, для среды из полиакрилонитрильных волокон диаметром  $d = 10$  мкм толщина полубесконечного слоя  $h \sim 0,05$  мм при концентрации волокон  $N = 10^4 \text{ мм}^{-3}$  (это соответствует плотной упаковке волокон) и  $h \sim 0,5$  мм при  $N = 10^3 \text{ мм}^{-3}$ .

Для двух различных сред с концентрацией рассеивателей  $N$  получим

$$h_1 = -\frac{1}{\alpha_1 \Sigma_p^{(1)} N_1} \ln 0,1; \quad h_2 = -\frac{1}{\alpha_2 \Sigma_p^{(2)} N_2} \ln 0,1.$$



**Рис. 7.** Графики зависимости отражательной способности оптически толстого слоя волокон полиакрилонитрила (сплошные линии) и стекловолокна (штриховые) от температуры излучателя: волокна диаметром 10 (1) и 20 мкм (2)

Имеем  $\alpha = \sqrt{3(1 + \gamma_e)} = \sqrt{3(Q_{ex.ef}/Q_p)}$  и  $\Sigma_p = Q_p N$ , следовательно при одинаковой концентрации рассеивателей

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\alpha_2 Q_p^{(2)}}{\alpha_1 Q_p^{(1)}} = \sqrt{\frac{Q_p^{(2)} Q_{ex.ef}^{(2)}}{Q_p^{(1)} Q_{ex.ef}^{(1)}}} \approx \sqrt{\frac{Q_p^{(2)}}{Q_p^{(1)}}},$$

так как для сравниваемых сред (ПАН- и стекловолокно)  $Q_{ex.ef}^{(2)} \approx Q_{ex.ef}^{(1)}$ . Тогда отношение погонных масс покрытий (массы на единицу площади поверхности) можно выразить как

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{h_1 \rho_1}{h_2 \rho_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \sqrt{\frac{Q_p^{(2)}}{Q_p^{(1)}}},$$

где  $\rho$  – плотность материала волокна. Для ПАН- и стекловолокна

$$\frac{M_{пан}}{M_{ст.в}} = 0,46 \sqrt{\frac{Q_p^{(ст.в)}}{Q_p^{(пан)}}}.$$

Из результатов, приведенных на рис. 4 и 6, следует, что  $\overline{Q_p^{ст.в}}/\overline{Q_p^{пан}} \approx \approx 2,3 \dots 2,4$ , тогда для сопоставимых значений  $\mathcal{R}_\infty$  ( $\mathcal{R}_\infty^{ст.в} \approx \mathcal{R}_\infty^{пан}$ ) получим

$$\frac{M_{пан}}{M_{ст.в}} \approx 0,7 \quad \text{и} \quad \frac{h_{пан}}{h_{ст.в}} \approx 1,5.$$

Таким образом, при сопоставимых значениях отражательной способности (например, для температуры излучателя  $T_b \approx 2000$  К) покрытие из ПАН-волокна на  $\sim 30$  % легче, чем покрытие из стекловолокна, при толщине, в 1,5 раза превышающей последнее.

Известно, что эффективная теплопроводность неоднородной среды пропорциональна объемной концентрации компонентов, для рассматриваемого случая — это концентрация рассеивателей (волокон). Следовательно, при одинаковой объемной концентрации волокон эффективная теплопроводность рассматриваемых сред будет определяться теплопроводностью материала волокна. Для стекловолокна  $\lambda_{ст.в} \approx 1,7$  Вт/(м · К) и для полиакрилонитрила  $\lambda_{пан} \approx 0,2$  Вт/(м · К). Если для характеристики теплоизолирующей способности слоя среды толщиной  $h$  использовать его термическое сопротивление  $K_T = h/\lambda$ , определяющее кондуктивный тепловой поток при заданном перепаде температур на границах  $q_T = -\frac{1}{K_T} \Delta T$ , или перепад температур при заданном тепловом потоке  $\left( \Delta T_1 = \Delta T_2 \frac{K_T^{(1)}}{K_T^{(2)}} \right)$ , то для рассматриваемых

сред получим

$$\frac{K_{\text{T}}^{\text{пан}}}{K_{\text{T}}^{\text{ст.в}}} \simeq 1,5 \frac{\lambda_{\text{ст.в}}}{\lambda_{\text{пан}}} \approx 12,$$

т.е. теплоизолирующая способность покрытия на основе ПАН-волокон существенно превышает теплоизолирующую способность аналогичного по отражательной способности покрытия на основе стекловолокна.

Таким образом, по ряду показателей тканые материалы на основе волокон полиакрилонитрила перспективны для применения в условиях экстремальных ситуаций. Следует также отметить такие положительные свойства полиакрилонитрила, как высокую свето- и атмосферостойкость, устойчивость к действию микроорганизмов и органических растворителей (бензин, ацетон и др.).

**Оптические характеристики дисперсно-наполненных материалов.** Дисперсно-наполненные материалы представляют собой композицию связующего (матрица) и наполнителя в виде дисперсных частиц определенного фракционного состава. Такие материалы используются чрезвычайно широко благодаря практически неограниченной возможности модификации всего комплекса физико-химических и механических характеристик и созданию композиции с заданными свойствами. Сюда относятся, например, все лакокрасочные материалы. Если матрица (связующее) прозрачна для излучения, то использование в качестве наполнителя дисперсных частиц различных веществ позволяет получить рассеивающие композиционные материалы и покрытия, в той или иной степени отражающие излучение, возможные для применения в целях огнетеплозащиты.

В качестве связующих в композиционных материалах могут использоваться органические и неорганические вещества. Органические вещества (смолы) обладают ценным комплексом физико-механических характеристик, но низкой термостойкостью, неорганические — большей термостойкостью, но, чаще всего, малой пластичностью. Поэтому выбор того или иного связующего определяется, в первую очередь, условиями эксплуатации. Однако для целей применения в условиях экстремальных ситуаций, сопровождаемых пожарами, одна из важнейших характеристик — это отражательная способность по отношению к действующему излучению. В связи с этим проведем сравнительный анализ дисперсно-наполненных материалов на органическом и неорганическом связующем, принимая за критерий отражательную способность. Из связующих будут рассмотрены — силикатное связующее (жидкое стекло) и полиэтилен. Выбор последнего обусловлен относительно малым числом полос поглощения в ИК-области спектра

по сравнению со смолами, традиционно используемыми в качестве связующих, например эпоксидными, фенольными и др. Такое свойство полиэтилена обусловлено простой молекулярной структурой — линейная молекула без боковых заместителей ( $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2-$ ).

У силикатного связующего основные полосы поглощения расположены в области длин волн  $9 \dots 11$  мкм (исключая полосу поглощения гидратированной воды при  $2,8 < \lambda < 3,1$  мкм). Исходя из этого, как допущение, связующие будем считать прозрачными вне полос поглощения и полностью непрозрачными в полосах поглощения.

При выборе наполнителя принимали во внимание следующие соображения. Во-первых, рассеивающие свойства композиционных материалов определяются соотношением показателей преломления связующего и наполнителя, разность которых должна быть как можно большей. У рассматриваемых связующих показатель преломления в области прозрачности  $n \approx 1,5$  — для полиэтилена и  $n \approx 1,43$  — для жидкого стекла. В связи с этим использование в качестве наполнителя такого распространенного материала, как диоксид кремния (стекло), неэффективно, так как его показатель преломления  $n \approx 1,45 \dots 1,5$ . Поэтому для получения композиций с высокими рассеивающими свойствами рассматривались такие материалы, как оксиды магния ( $n \approx 1,7$ ) и цинка ( $n \approx 1,95$ ), сульфид цинка ( $n \approx 2,25$ ), диоксид титана ( $n \approx 2,4$ ). Во-вторых, наполнители должны иметь слабое поглощение в спектре действующего излучения. И, в-третьих, плотность их должна быть как можно меньше. Исходя из этого, в качестве наполнителя выбрана алюмо-магниева шпинель ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) как один из наиболее эффективных по рассеивающим свойствам наполнителей [11] (плотность  $\rho = 3620$  кг/м<sup>3</sup>; оптические свойства приведены в табл. 3). Рассмотрена монодисперсная система частиц с диаметром  $d = 10$  мкм.

Таблица 3

**Показатель преломления алюмо-магниева шпинели**

$\lambda$ , мкм	$n_\lambda$	$k_\lambda$
0,4–1,5	1,73	$0,15 \cdot 10^{-5}$
1,5–2,5	1,73	$0,66 \cdot 10^{-5}$
2,5–3,5	1,73	$0,54 \cdot 10^{-4}$
3,5–4,5	1,73	$0,96 \cdot 10^{-4}$
4,5–5,5	1,73	$0,60 \cdot 10^{-4}$
5,5–6,0	1,73	$0,24 \cdot 10^{-3}$

Композиция шпинель/жидкое стекло ( $n_2 = 1,43$ ) имеет полосу непрозрачности  $2,8 < \lambda < 3,1$  мкм, а композиция шпинель/полиэтилен ( $n_2 = 1,51$ ) — полосы непрозрачности  $2,3 < \lambda < 2,5$  мкм и



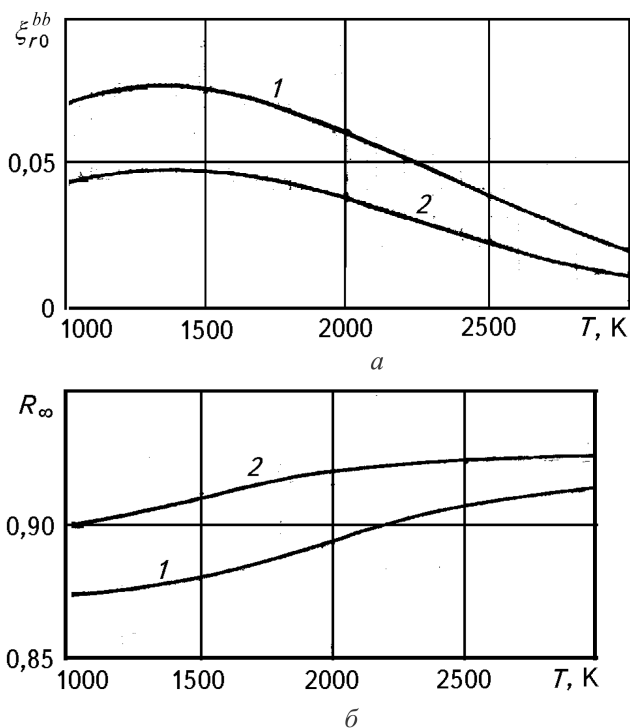
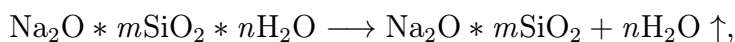


Рис. 8. Зависимости доли потока падающего излучения (а) в полосах непрозрачности и отражательной способности (б) полубесконечного слоя покрытий на основе полиэтилена 1 и жидкого стекла 2

$3,3 < \lambda < 3,6$  мкм. Наличие полос поглощения определяет тот факт, что часть воздействующего потока излучения  $\xi_{r0}^{bb} = \sum_j q_{r0,\lambda_j}^{bb} / q_{r0}$  поглощается на поверхности (см. формулу (1)). На рис. 8, а приведены зависимости  $\xi_{r0}^{bb}$  от температуры черного излучателя, а на рис. 8, б — зависимости отражательной способности оптически толстого слоя этих композиций с учетом полос поглощения для наполнителя с диаметром частиц  $d = 10$  мкм.

Как видно, композиция на основе жидкого стекла по отражательной способности несколько эффективнее композиции на основе полиэтилена. Кроме того, ее преимущество — большая термостойкость. Это связано с тем, что при температуре разложения жидкого стекла  $T \simeq 300 \dots 400$  °С выделяется кристаллогидратная вода, поглощается значительное количество теплоты при ее испарении:



и образуется твердый термостойкий остаток. Однако композиции на основе жидкого стекла гигроскопичны и хрупки. Поэтому композиция на основе полиэтилена (или других термопластов) хотя и менее термо-

стойка (температура размягчения полиэтилена  $\sim 125^\circ\text{C}$ , а интенсивной термодеструкции —  $320 \dots 375^\circ\text{C}$ ), но имеет ряд ценных эксплуатационных свойств, таких как влаго- и атмосферостойкость, вибростойкость, пластичность, хорошее сцепление с подложками и другие, и применение защитных рассеивающих покрытий на основе полиэтилена в ряде случаев может иметь преимущество перед другими типами покрытий.

**Комбинированная система огнетеплозащиты.** Любой огнетеплозащитный материал имеет ограниченную область применения как по параметрам внешних воздействий, так и по эксплуатационным свойствам. Особенно наглядно это проявляется при решении проблемы огнетеплозащиты применительно к подвижным объектам (транспортным средствам, пожарным роботам и т.п.). Огнетеплозащитный материал для подвижного объекта должен обладать целым комплексом специфических эксплуатационных качеств, таких как вибростойкость, эластичность, стойкость к климатическим и механическим воздействиям, стабильность свойств в течение длительного времени. Для таких объектов наиболее эффективным следует считать использование вспучивающихся огнезащитных материалов. Механизм огнезащиты такого материала состоит в образовании теплоизолирующего слоя с большим термическим сопротивлением (большой толщиной и малой теплопроводностью) при вспучивании материала под действием внешнего источника нагрева [12]. Слой огнезащитного материала в исходном состоянии обычно не превосходит нескольких миллиметров, что не накладывает серьезных ограничений при нанесении такого материала на конструкцию.

Существует ряд вспучивающихся огнезащитных материалов (СК-Л, ВПМ-2, ВПМ-3 и др.), разработанных для огнезащиты строительных конструкций. Однако условия их применения ограничиваются сухой неагрессивной средой, отсутствием силовых и динамических нагрузок. Для других же условий применения наиболее совершенным по комплексу эксплуатационных свойств — огнезащитным характеристикам, атмосферо- и влагостойкости, эластичности, стойкости к статическим и динамическим нагрузкам, сроку эксплуатации — является материал СГК-1 [13].

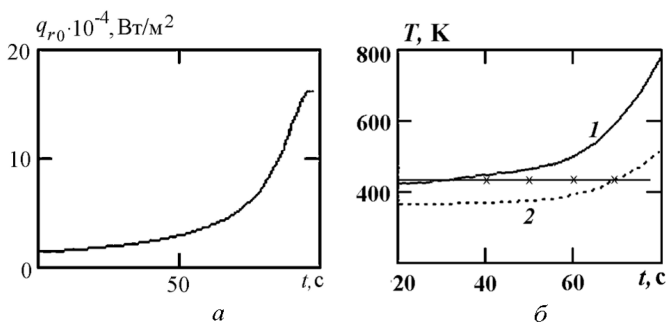
Композиционный огнезащитный материал СГК-1 — двухкомпонентный, на основе хлорсульфурированного полиэтилена и терморасширяющегося графита. При температуре, большей  $\sim 400 \dots 450\text{ K}$ , происходит разложение связующего, выделяющиеся газы пиролиза вспучивают массу наполнителя, образуя малотеплопроводный высокопористый слой кокса, который и обеспечивает теплозащиту и повышение предела огнестойкости конструкции. Изменение толщины защит-

Плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	900
Стойкость к климатическим факторам:	
температура эксплуатации, °С .....	±50
относительная влажность, % .....	до 100
Стойкость к вибрациям:	
амплитуда, м/с <sup>2</sup> .....	до 30
частота, Гц .....	до 200
Гарантийный срок эксплуатации, лет .....	10

ного слоя при вспучивании (кратность вспучивания) и соответствующее уменьшение плотности достигают величин в 15...20 раз [14]. В связи с этим прочность образующегося вспученного слоя невысока, а материал СГК-1, как и другие материалы этого типа, следует отнести к классу одноразовых.

Негативное свойство материала СГК-1 — высокая поглощательная способность  $\sim 0,8 \dots 0,95$  в спектре пламени. Этот показатель может быть улучшен путем модификации поверхностного слоя с приданием ему высокоотражающих свойств, что позволяет реализовать систему комбинированной многофункциональной огнезащиты — внешний слой с высокой отражательной способностью служит для защиты нижнего слоя от нагрева излучением, а нижний — из материала СГК-1 — выполняет роль своеобразного “предохранителя”, срабатывающего при непосредственном контакте с пламенем. Такая система защиты перспективна для объектов, работающих вблизи очагов пожаров.

Наиболее просто система комбинированной огнетеплозащиты может быть реализована путем окрашивания внешней поверхности отражающим составом: в работе [15] показано, что в спектре излучения лесного пожара коэффициент отражения титановых белил составляет  $\sim 0,75 \dots 0,85$ . В целях оценки возможностей такой теплозащиты проведены расчеты температурного состояния двухслойной системы — стальная пластина толщиной 2 мм с внешним слоем огнезащитного материала СГК-1 толщиной 2 мм (рис. 9, б, кривая 1) и той же системы, с поверхностью, окрашенной титановыми белилами (кривая 2), в условиях воздействия излучения лесного пожара. Как видно, в первом случае температура поверхности достигает критического значения для материала СГК-1 на  $\sim 40$  с, а во втором — значительно позднее — на 70...80 с, но все же, еще до момента попадания во фронт пламени. Отметим также, что при использовании этой системы огнетеплозащиты возникает проблема механической прочности и стабильности оптических свойств слоя краски. В связи с этим рассмотрим возможности применения объемно-отражающих материалов.



**Рис. 9.** Графики зависимости плотности потока падающего излучения при лесном пожаре (а) и температура поверхности огнезащитного покрытия СГК-1 на стальной подложке в исходном состоянии (1) и окрашенного титановыми белилами (2); —x— — температура терморазложения связующего

Для подвижных объектов внешний отражающий слой должен обладать эксплуатационными характеристиками — прочностью, влаго- и атмосферостойкостью не хуже, чем основной материал защиты, т.е. СГК-1, и иметь с ним хорошее сцепление. Кроме того, отражательные характеристики внешнего слоя не должны сильно изменяться при его частичном разрушении (это свойство присуще лишь объемноотражающим материалам). В наиболее полной мере перечисленным требованиям может удовлетворить материал внешнего слоя на основе полиэтилена: близость химического строения основы материала СГК-1 (связующего) и внешнего слоя обуславливает высокую прочность их сцепления и также соответствие других эксплуатационных характеристик, а насыщение внешнего слоя дисперсными частицами позволяет оптимизировать его отражательную способность.

Оценим массовые и теплофизические характеристики композиции на основе полиэтилена, насыщенного частицами алюмомагниевого шпинели, предполагая, что толщина слоя должна обеспечить предельно высокий коэффициент отражения и полное блокирование внешнего излучения относительно нижележащего слоя поглощающего материала СГК-1, т.е. внешний слой должен быть оптически толстым (полубесконечным). Оценку физической толщины такого рассеивающего слоя можно получить из соотношения (2), задавая среднеинтегральные по спектру действующего излучения величины  $\bar{\alpha} = \sqrt{3(1 + \bar{Q}_{ex.ef}/\bar{Q}_p)}$  и  $\bar{\tau} = \bar{\Sigma}_p SN$  ( $S, N$  — площадь сечения и концентрация частиц, среда предполагается монодисперсной); приведенные далее результаты соответствуют черному излучателю с температурой  $T_b = 1300$  К, характерной для пламени.

Физические характеристики композиции определяются характеристиками составляющих ее компонентов (табл. 4) и их концентрацией.

## Характеристики компонентов композиции

Компонент	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Полиэтилен	930	2100	0,4
Шпинель MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3620	850	14

Пусть  $z_n$  — массовая доля наполнителя, тогда [16]: плотность композиции

$$\rho_0 = \frac{1}{\frac{z_n}{\rho_n} + \frac{1 - z_n}{\rho_c}};$$

теплоемкость

$$c_{p0} = z_n c_{pn} + (1 - z_n) c_{pc};$$

теплопроводность

$$\lambda_0 = \frac{\rho_0 z_n}{\rho_n} \lambda_n + \frac{\rho_0 (1 - z_n)}{\rho_c} \lambda_c;$$

термическое сопротивление

$$K_0 = h_\infty / \lambda_0;$$

концентрация частиц

$$N = \frac{3}{4} \frac{\rho_0 z_n}{\pi r_n^3};$$

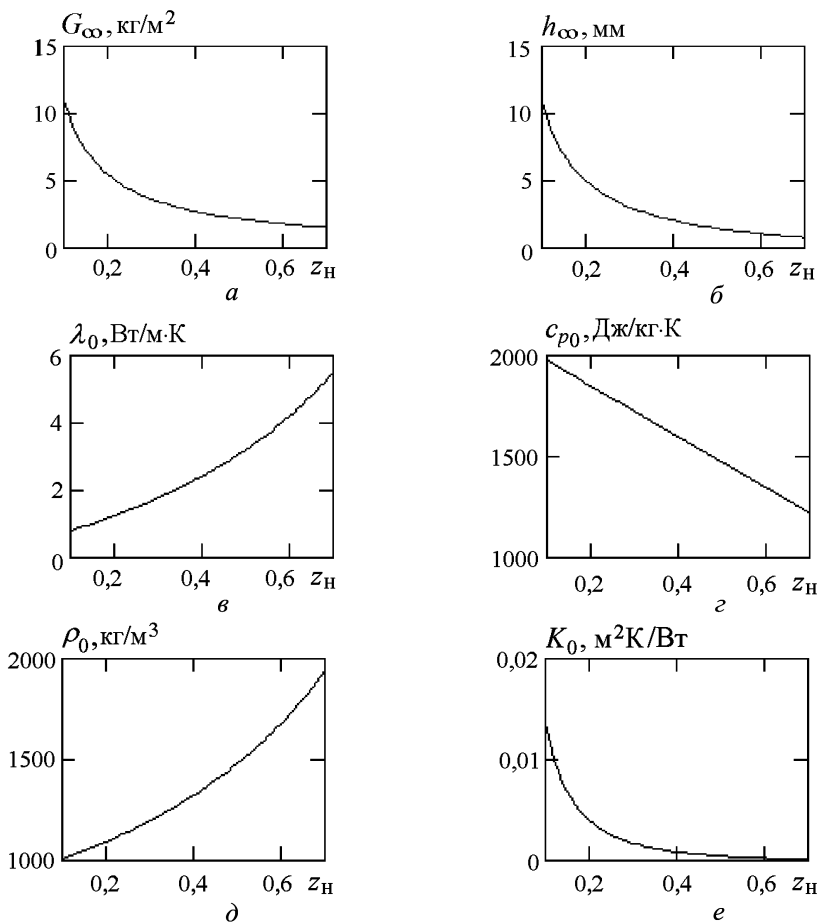
погонная масса (масса на единицу площади)

$$G_\infty = h_\infty \rho_0.$$

Рассчитанные значения характеристик рассматриваемой композиции приведены на рис. 10; далее они использованы при сравнительном анализе системы теплозащиты подвижных технических средств (ПТС).

Создание системы огнетеплозащиты — сложная многоплановая проблема и для получения конкретных оценок выберем базовую модель теплового нагружения и возможный сценарий событий.

Из рассмотренных в работе [1] случаев экстремальных ситуаций наиболее масштабным является лесной пожар. Необходимость проведения работ с привлечением ПТС может быть вызвана угрозой попадания в зону пожара особо опасных объектов — хранилищ топлива, складов взрывчатых веществ и боеприпасов или высокоопасных химических веществ и т.п. При этом ПТС должны сохранить возможность функционирования в течение времени воздействия основного фактора

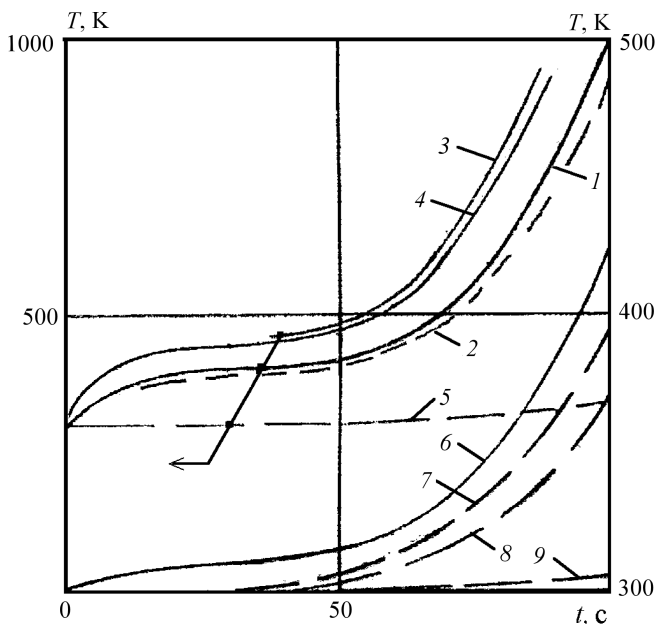


**Рис. 10. Характеристики дисперснонаполненного полиэтилена:**

$a, b$  — погонная масса и толщина оптически толстого (полубесконечного) слоя;  $v, z, d, e$  — коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность, коэффициент термического сопротивления

лесного пожара — излучения фронта пламени и, возможно, при непосредственном попадании в зону горения. В качестве базовой модели теплового воздействия примем условия беглого верхового пожара (см. рис. 9,  $a$ ), а в качестве объекта, подверженного воздействию, примем стальную пластину в условиях естественной конвекции (коэффициент теплоотдачи принят  $\alpha_B = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ).

На рис. 11 приведены рассчитанная температурная зависимость нагреваемой (1) и тыльной (2) поверхностей пластины толщиной 2 мм, из которых видно, что еще до момента соприкосновения с фронтом пламени температура достигает предела огнестойкости (для стали предел огнестойкости обычно соответствует температуре  $T \cong 800 \text{ К}$ ) и превышает температуру воспламенения органических веществ — масел, пластиков, красок, изоляции кабелей и других материалов, типичных



**Рис. 11.** Зависимости изменения температуры в характерных точках системы подложка–покрытие СГК-1–слой дисперсно-наполненного полиэтилена

для любого технического устройства. Следовательно, необходимо использование средств огнезащиты. В качестве альтернативных средств рассмотрены следующие материалы и покрытия:

- прошивные маты из супертонкого базальтового волокна БСТВ (ТУ 95-2348-92);
- огнезащитный материал СГК-1;
- двухслойное покрытие из дисперсно-наполненного полиэтилена и материала СГК-1;
- двухслойное покрытие с внешним чехлом из нитрона (ПАН-ткани) и материала СГК-1;
- двухслойное покрытие с внешним чехлом из стеклоткани и материала СГК-1.

Характеристики используемых материалов приведены в табл. 5

*Прошивные маты БСТВ* на основе супертонкого базальтового волокна выпускаются промышленностью толщиной не менее 40 мм (что определяется сцеплением волокон), погонной массой  $G_{\infty} = 1,2 \text{ кг/м}^2$ , предназначены для теплоизоляции объектов в статических условиях; данные по свойствам в условиях динамического нагружения отсутствуют. Под нагрузкой происходит усадка материала с последующим восстановлением не более 50 % толщины. Расчетная температура поверхности покрытия показана на рис. 11 кривой 3. Так как толщина мата превышает толщину прогрева для выбранных условий, температура на подложке не изменяется. Кроме того, благодаря высокой термостойко-

## Характеристики материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$T_{\text{доп}}$ , К	$R_{\infty}$
Сталь	7850	460	60	800	0,05
БСТВ	25 ... 30	840	0,06	1000 ... 1100	0,05
СГК-1	900	1100	0,5	420 ... 450	0,05
ПЭ+MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> :			420 ... 450	0,9	
$z_n = 0,65, h_{\infty} = 1$ мм	1800	1290	4,8		
$z_n = 0,45, h_{\infty} = 2$ мм	1400	1540	2,8		
$z_n = 0,30, h_{\infty} = 3$ мм	1200	1725	1,8		
ПАН-ткань	330	151	0,055	480	0,65
Стеклоткань	730	830	0,21	800 ... 900	0,5

сти этот тип теплозащиты сохраняет работоспособность при непосредственном контакте с пламенем и таким образом имеет высокую эффективность, однако, по всей видимости, конструктивно трудно обеспечить однородность слоя теплозащиты по всей защищаемой поверхности (места крепления и стыков, подвижные и малогабаритные элементы и пр.). Необходимы также дополнительные исследования по поведению этого материала в условиях реальной эксплуатации, динамических нагрузок, атмосферных воздействий и т.д.

*Материал СГК-1* (толщина слоя  $h = 2$  мм); изменение температуры на внешней поверхности и на подложке показаны кривыми 4 и 5 на рис. 11. Как видно, температура “срабатывания”, т.е. начала термических превращений материала СГК-1, достигается на  $\sim 40$  с, т.е. задолго до попадания объекта в зону пламени. Поэтому целесообразно использовать двухслойное защитное покрытие с отражающим внешним слоем.

*Материал СГК-1* ( $h = 2$  мм) с внешним слоем из наполненного полиэтилена; графики изменения температуры на внешней поверхности показаны на рис. 11 кривой 6, на стыке с СГК-1 — кривыми 7 (при толщине внешнего слоя  $h_2 = 2$  мм) и 8 ( $h_2 = 3$  мм), на стальной подложке — кривой 9. Как видно, вплоть до непосредственного попадания в зону пламени температура на поверхности не превышает температуру, допустимую для внешнего слоя, а на подложке изменяется не более, чем на  $5^\circ$ . При толщине внешнего слоя  $h_2 = 1$  мм температура на стыке слоев составляет  $\sim 420$  К, т.е. близка к температуре “срабатывания” материала СГК-1; при  $h_2 = 2$  мм температурный “запас” составляет  $\sim 25$  К, а при  $h_2 = 3$  мм — не менее 50 К. Таким образом, использование такого двухслойного покрытия позволяет создать высокоэффективную систему огнетеплозащиты.



Материал СГК-1 ( $h = 2$  мм) с внешним чехлом из ПАН-ткани; изменение температуры на внешней поверхности при толщине чехла  $h_2 = 1$  мм показано на рис. 12 кривой 1, на стыке — кривой 2. Как видно, предельная для ПАН-ткани температура достигается на  $\sim 70$  с, что неприемлемо.

Материал СГК-1 ( $h_2 = 2$  мм) с внешним чехлом из стеклоткани; изменение температуры внешней поверхности показано на рис. 12 кривой 3 при толщине чехла  $h_2 = 2$  мм, на стыке с СГК-1 — кривой 4 (на подложке изменение температуры не превышает  $5^\circ$ ).

Как видно, этот вариант также позволяет получить приемлемые результаты — температура на внешней поверхности и на стыке не превышает допустимой температуры эксплуатации стеклоткани и температуры “срабатывания” материала СГК-1 (при толщине чехла  $h_2 < 2$  мм температура на стыке превышает температуру “срабатывания”).

Из проведенного анализа следует, что наиболее приемлемыми материалами огнетеплозащиты являются двухслойные покрытия с внутренним (предохранительным) слоем из материала СГК-1 толщиной не менее 2 мм и внешним слоем из дисперсно-наполненного полиэтилена толщиной не менее 2 мм или стеклоткани (толщиной также не менее 2 мм). В первом случае погонная масса составляет  $G_\infty \geq 4,6$  кг/м<sup>2</sup>, во втором —  $G_\infty \geq 3,3$  кг/м<sup>2</sup>. Однако использование чехлов из стеклоткани сопряжено с рядом проблем, таких как загрязнение и влагонасыщение (уменьшают отражательную способность), механические повреждения, сложность надежного крепления на конструкции и т.п. Поэтому для рассмотренных условий наиболее приемлемо комбинированное огнетеплозащитное покрытие на основе материала СГК-1 с внешним объемно-отражающим слоем из дисперсно-наполненного полиэтилена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Товстоног А. В. Модели и моделирование тепловых нагрузок применительно к условиям экстремальных ситуаций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2000. – № 1. – С. 48–69.
2. Елисеев В. Н., Товстоног В. А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2001. – № 4. – С. 3–32.

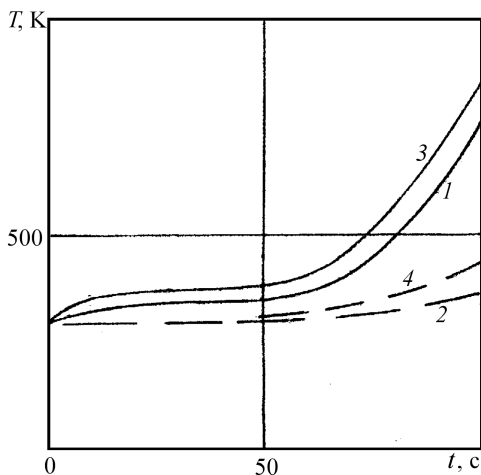


Рис. 12. Зависимости изменения температуры в характерных точках системы подложка–покрытие СГК-1–тканевый чехол

3. Елисеев В. Н., Страхов В. Л., Товстоног В. А., Атаманов Ю. М. Экспериментальный комплекс для исследований процессов тепло-массообмена и испытаний тепло- и огнезащитных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. "Машиностроение". – 1999. – № 3. – С. 116–120.
4. Товстоног В. А. Теплофизика рассеивающих материалов: прикладные проблемы и решения // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. "Машиностроение". – 2000. – № 3. – С. 67–85.
5. Гуревич М. М., Ицко Э. Ф., Середенко М. М. Оптические свойства лакокрасочных покрытий. – Л.: Химия, 1984. – 120 с.
6. Бородай С. П., Бородай Ф. Я. Использование кварцевой керамики в качестве эталона диффузного отражения // Оптико-механическая промышленность. – 1974. – № 5. – С. 45–47.
7. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. – Минск: Наука и техника, 1969. – 592 с.
8. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 536 с.
9. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
10. Елисеев В. Н., Товстоног В. А. Теоретические основы расчета сложного теплообмена в элементах конструкций. Ч. I. – М.: Изд-во МВТУ, 1982. – 52 с.
11. Товстоног В. А. Оценка огнезащитных свойств рассеивающих покрытий // ТВТ. – 1993. – Т. 31. – № 4. – С. 682–684.
12. Романенков И. Г., Левитес Ф. А. Огнезащита строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1991. – 320 с.
13. Страхов В. Л., Крутов А. М., Давыдкин Н. Ф. Огнезащита строительных конструкций. – М.: Изд-во "ТИМП", 2000. – 435 с.
14. Исаков Г. Н., Несмелов В. В. О некоторых закономерностях тепло- и массопереноса во вспучивающихся огнезащитных материалах // ФГВ. – 1994. – Т. 30. – № 2. – С. 57–63.
15. Товстоног А. В. Выбор программы тепловых испытаний объектов, обладающих спектрально-селективными свойствами, на установках лучистого нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. "Машиностроение". – 1997. – № 3. – С. 54–61.
16. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 391 с.

Статья поступила в редакцию 28.12.2004

Виктор Николаевич Елисеев родился в 1931 г., окончил МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1954 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры "Космические аппараты и ракеты-носители" МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 100 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов.

V.N. Yeliseev (b. 1932) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), professor of "Spacecrafts and Rocket Boosters" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of heat exchange in structures of flying vehicles.

Алексей Валерьевич Товстоног родился в 1973 г., в 1996 г. окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 2000 г. аспирантуру МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 2003 г. С.-Петербургскую академию гражданской авиации. Канд. техн. наук, автор ряда научных работ в области теплообмена конструкций в условиях экстремальных ситуаций.

A.V. Tovstonog (b. 1973) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1996 and Saint-Petersburg Academy for Civil Aviation. Ph. D. (Eng.). Author of a number of publications in the field of heat exchange in constructions.

Валерий Алексеевич Товстоног родился в 1947 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник. Автор свыше 100 научных работ в области специальных вопросов теплообмена, тепловой защиты и тепловых испытаний конструкций.

V.A. Tovstonog (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), senior researcher. Author of more than 100 publications in the field of special issues of heat exchange, thermal protection and heat testing of constructions.

### **ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”**

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” — с периодичностью 12 номеров в год.

#### **Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”**

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	150	300
72783	“Приборостроение”	2	150	300
79982	“Естественные науки”	2	150	300

#### **Подписывайтесь и публикуйтесь!**

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Тел.: (095) 263-62-60; 263-60-45.

Факс: (095) 265-42-98; 263-67-07.

E-mail: markir@bmstu.ru, press@bmstu.ru