



ISSN 1818-8575

2/2012

ВЕСЦІ БДПУ

Серія 3

ФІЗИКА

МАТЭМАТЫКА

ІНФАРМАТЫКА

БІЯЛОГІЯ

ГЕАГРАФІЯ

УДК 539.16

*В.Р. Соболев, доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей
и теоретической физики БГПУ;*

*П.Н. Гоман, преподаватель Государственного
учреждения образования «Командно-инженерный
институт» МЧС Республики Беларусь;*

*Ю.С. Кедич, магистрант кафедры общей
и теоретической физики БГПУ*

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В СЛАБОПРОВОДЯЩЕМ МАТЕРИАЛЕ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАДИАЦИОННОГО ОБОГРЕВА

Введение. Разогрев элементов тепловой защиты, содержащей способные к разрушению или возгоранию материалы, при кратковременном контактом, особенно лучистом энергообмене, осуществляется не мгновенно по всему объему, а постепенно, через передачу тепла вглубь от внешней разогреваемой грани. Для выявления действительности тепловой изоляции требуется оценивать быстроту увеличения температуры T в наиболее уязвимых областях. При этом темп нарастания T зависит как от интенсивности и длительности поступления энергии, так и условий ее отвода за счет теплопередачи. В этом смысле при кратковременном воздействии лучевого потока элементы тепловой защиты должны иметь в меру большие коэффициенты теплопроводности, чтобы обеспечивать рассредоточение энергии по объему без чрезмерного перегрева наружного слоя. Методологически анализ подобной задачи и формализуется в приближении нестационарных соотношений энергетического баланса, записываемых для каждой точки среды в виде дифференциального уравнения второго порядка в частных производных [1–6]. Для получения решения, отвечающего конкретному режиму облучения, уравнение теплового баланса дополняют граничными условиями связи рассматриваемой среды с окружением. В общем случае граничные условия достаточно сложны, поскольку теплоотвод из зоны разогрева, как известно, является нелинейной функцией времени [7–11].

Для сравнительно малых временных интервалов возможно упростить анализ, выбрав приближение адиабатичности по не-облучаемой тыльной стороне плоского слоя.

Такой подход логичен при кратковременном действии источника радиации, например, достаточно быстром выгорании и истощении мощности излучения во время пожара. С учетом изложенного при выявлении термической стойкости способных к разрушению либо горению материалов целесообразно сочетать анализ с экспериментом в том смысле, что опыт позволяет подкорректировать граничные условия во времени и дополнить результаты расчета. Соответственно, процедура оценок становится более действенной и позволяет эффективней применять метод экстраполяции при выявлении обоснованных норм по длительности безопасного облучения интенсивным потоком с учетом тепловых характеристик материала.

Постановка задачи, техника эксперимента и расчета. В работе представлены результаты исследования характера воздействия достаточно интенсивного потока лучистой энергии на некоторые слабопроводящие материалы, отвечающие по свойствам древесине, мху, асбестоцементу. Так, экспериментально смоделировано поведение материалов, родственных по свойствам указанным, что часто реализуется в процессе эксплуатации систем тепловой энергетики, обогрева помещений, обработки древесины, в том числе и при воздействии излучения открытых очагов пламени на деревянные строения и растительный покров на местности. Выявлены закономерности прогревания и формирования температурного поля в приповерхностной области со стороны облучаемой грани для естественных условий окружения. Установлена степень влияния тепловых свойств на температуру в началь-

ные моменты разогрева, что позволяет сделать вывод о быстроте достижения критического состояния по термическому разрушению или воспламенению.

Для экспериментальной части работы применена лабораторная установка, в состав которой входит блок источника радиации, опорная станина и подвижная платформа для позиционирования тестируемых образцов, система контроля плотности лучистого потока, система регистрации параметров температурного поля в объеме (рисунок 1). Излучатель формирует контролируемый поток энергии с плотностью 5 кВт/м^2 и выше, который воздействует на образец, расположенный внутри тонкостенного кольца из асбеста, размещенного на асбестоцементном листе толщиной $0,01 \text{ м}$. Лист соединен с держателем образца, расположенным на подвижной платформе, которая посредством противовеса перемещает образец в зону обогрева.

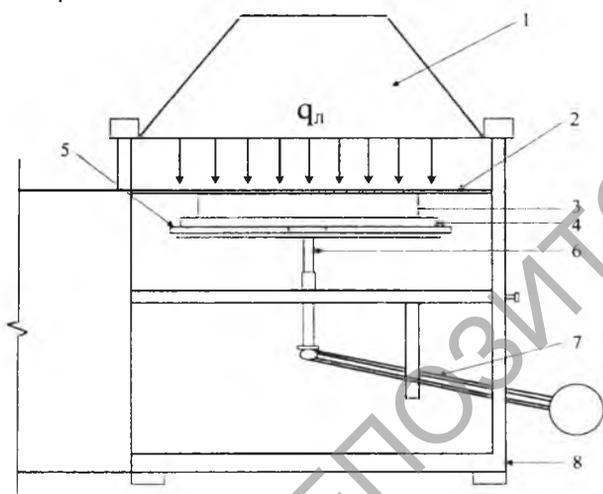


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для моделирования воздействия интенсивных энергетических потоков

- 1 – радиационная панель с нагревательным элементом;
- 2 – защитная плита;
- 3 – кольцо из асбеста для размещения образца;
- 4 – асбестоцементный лист;
- 5 – держатель образца в форме лопатки;
- 6 – передвижная платформа;
- 7 – рычаг с противовесом;
- 8 – опорная станина в сборе

Для измерения распределения температуры по объему, то есть по глубине испытуемого материала, в образце создают цилиндрические каналы, в которых позиционируют термодатчики. Место размещения установки оборудовано защитными экранами, чтобы предотвратить действие возмущающих тепловых потоков.

По мере экспонирования температура изолирующего кольца и асбестоцементного листа начинает повышаться. Тем не менее ввиду большой массы и теплоемкости процесс прогревания опоры достаточно инерционен. Кроме этого, контролируя температуру тыльной стороны разогреваемого слоя, можно оценить степень теплоотдачи и ее влияние на граничные условия.

Аналитическое моделирование процесса нагревания в данном случае реально осуществлять с применением условий второго рода, как наиболее адекватных бесконтактному поглощению одной поверхностью и незначительному теплоотводу, по крайней мере, в начальные периоды процесса облучения, с другой, тыльной поверхности образца.

Противоположная, тыльная поверхность соприкасается с асбестоцементным листом и вначале имеет T окружающей среды T_0 . Характерно, что для $T = 300 \text{ К}$ равновесный тепловой поток составляет не более 460 Вт/м^2 и на порядок меньше плотностей от 5 кВт/м^2 , реализуемых в опыте и отвечающих $T = 540 \text{ К}$ и более. Таким образом, пока T задней грани остается в пределах $300\text{--}400 \text{ К}$, с потоком q , не превышающим 1500 Вт/м^2 , теплоотводом через заднюю грань можно пренебречь, особенно при экспозиционных $q = 5, 10, 15 \text{ кВт/м}^2$. Временной интервал, требуемый для достижения заднюю гранью 400 К , можно принять как характерный диапазон, в течение которого на данной грани выполняется стационарное граничное условие с отсутствием теплоотвода.

В аналитической части рассмотрен плоский слой толщиной D , который отвечает условиям теплоизоляции своей тыльной поверхности ($x = D$) и в исходном состоянии имеет температуру окружающей среды T_0 . Затем с момента времени $t = 0$ на лицевую поверхность ($x = 0$) начинает падать поток, который с учетом коэффициента черноты материала составляет q . Задача отвечает одномерному уравнению диффузии, с соответствующими граничными условиями.

$$\begin{aligned} c\rho \frac{dT}{dt} &= \lambda \frac{d^2T}{dx^2}; \quad q(x=0) = q; \\ q(x=D) &= 0; \quad T(x=D)|_{t=0} = T_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь c , ρ и λ – теплоемкость, плотность и теплопроводность материала образца. Условие $T(x=D)|_{t=0} = T_0$ отвечает конечности скорости распространения тепла. Для решения уравнения (1) естественно применить тради-

ционный подход, согласно которому температуру $T_1(x, t)$ можно определить методом разделения переменных

$$T_1 = W(x) + \alpha t. \quad (2)$$

В данном случае качественная зависимость $T_1(x, t)$ от t и x следует из физических соотношений и вида (1), то есть T должна увеличиваться с течением времени. Это приводит к решению для $W(x)$ вида

$$W(x) = \frac{1}{2} \frac{\alpha}{\lambda} \rho x^2 + Ax + B. \quad (3)$$

Для частного решения (3) величины постоянных A и B следует из условий (1). Искомое частное решение неоднородной задачи представим как сумму (2) и общего решения однородного уравнения T_2 .

$$T = T_1 + T_2. \quad (4)$$

Решение T_2 логично выбрать в виде ряда по собственным функциям, удовлетворяющим однородным условиям для градиента температуры. Тогда с учетом вида (2), (4) и граничных условий получим искомое решение:

$$T = \frac{qx^2}{2\lambda D} - q \frac{x}{\lambda} - \frac{2qD}{\lambda} \frac{1}{\pi^2} \sum_n \left[\frac{\cos\left(\frac{n\pi x}{D}\right) e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 \lambda t}{D^2 c\rho}\right)}}{n^2} \right] + \frac{2qD}{\lambda} \left(\frac{1}{\pi^2} \right) \sum_n \left(\frac{\cos(n\pi)}{n^2} \right) + \frac{qt}{c\rho D} + \frac{qD}{2\lambda} + T_0. \quad (5)$$

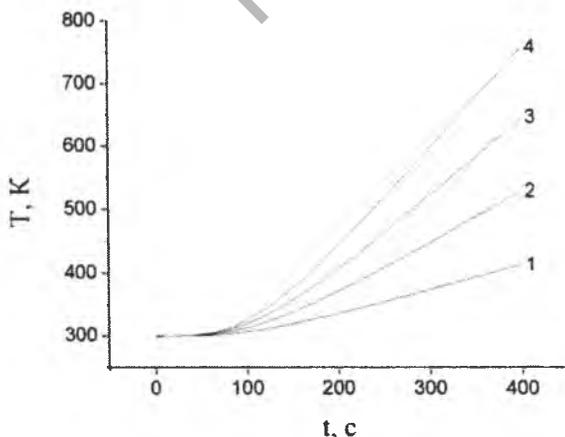


Рисунок 2 – Температура в слое гипотетического материала ($c = 3000$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0,08$ Вт/(м·К), $D = 0,03$ м, $\rho = 200$ кг/м³) на глубине $x = 0,01$ м при воздействии радиационного потока энергии для q , кВт/м²:
5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4)

Как отмечено ранее, полученное решение не может быть адекватным для больших времен, когда по мере накопления тепловой энергии T повышается по всему объему и выходит за принятое приближение адиабатичности по задней грани с отсутствием теплообмена.

Результаты эксперимента, расчета и их обсуждение. В качестве иллюстрации закономерностей распределения температурного поля на рисунках 2, 3 отображены характерные особенности численного моделирования временной $T(x = \text{Const}, t)$ и пространственной $T(x, t = \text{Const})$ зависимостей T для слоя гипотетической среды, у которой параметры ρ , c и λ , близки к параметрам привлекаемых материалов. В частности, увеличение плотности потока приводит к росту T в слое, четырехкратное увеличение q при его воздействии в течение 400 с приводит к повышению T на глубине 0,01 м от лицевой поверхности в 1,7 раза.

Кроме того, вначале воздействия при времени облучения до 90 °С температура T практически не изменяется на всем интервале выбранных интенсивностей, что связано с поэтапным нагревом материала, осуществляемым с конечной скоростью. Такое время необходимо для прогревания верхнего слоя при слабой зависимости накопления энергии от величины поглощаемой мощности.

Распределение температуры $T(x, t = \text{Const})$ вглубь по разогреваемому слою отображает, в частности, что по истечении 180 °С при воздействии указанной интенсивности материал может прогреться лишь на глубину не более 0,015 м (рисунок 3).

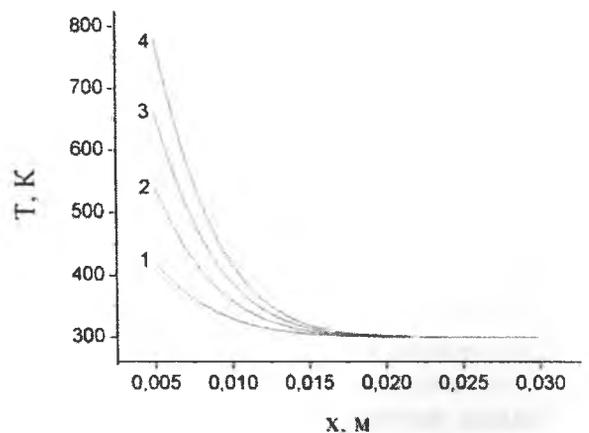


Рисунок 3 – Распределение температурного поля по слою модельного материала толщиной $D = 0,03$ м ($c = 3000$ Дж/(кг·К), $\rho = 200$ кг/м³, $\lambda = 0,08$ Вт/(м·К)) к моменту времени $t = 180$ с в условиях воздействия радиационного потока энергии для q , кВт/м²:
5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4)

При этом изменение q оказывает существенное влияние на формирование температурного поля только до глубины порядка 0,01 м от верхней плоскости облучения, после чего перестает сказываться.

На рисунках 4–6 представлены результаты экспериментального исследования динамики температурного поля в слое образцов из древесины сосны и мха. Как видно из рисунка, на первоначальной стадии прогрев испытуемых образцов происходит с некоторым опережением данных расчета, что, вероятно, связано с неомогенностью среды, содержащей определенное количество влаги в виде наполнителя пористой структуры и в связанном состоянии [10–11]. Кроме того, воздействие потока q в приповерхностной области ($x \leq 0,01$ м) приводит к распределению температурного поля по закону, близкому к линейному, что особенно характерно для верхнего значения из выбранного диапазона интенсивностей (20 кВт/м^2 , кривая 4). По мере удаления точки наблюдения вглубь T материала, как и ожидалось, постепенно уменьшается и на тыльной стороне в указанном временном интервале облучения не изменяется.

Для нижних уровней поглощаемой мощности расхождение между экспериментом и расчетом почти отсутствует, что означает присутствие дополнительного воздействия потока энергии и температуры на тепловые характеристики. На более длительном интер-

вале времени расхождение между экспериментом и расчетом проявляется отчетливой не только для малых, но и для больших экспозиционных потоков из выбранного диапазона. Эксперимент обнаруживает изменение закона температурного прироста (рисунок 5). Так, на временной зависимости температуры наблюдаются участки слабого прироста как для менее, так и более глубоких точек по толщине, напоминающие фазовый переход первого рода.

Участок слабого прироста отвечает одному значению T и для более глубокой точки более длителен во времени. Это может означать, что режим поглощения и диссипации энергии на указанном временном промежутке не одинаковый, и условия на тыльной стороне тестируемого образца при действии потока 20000 Вт/м^2 изменяются и по истечении восьмисот секунд. По сути, задняя поверхность начинает обнаруживать потери энергии на излучение и теплоотвод за счет конвекции по достижении температуры $350\text{--}400 \text{ К}$.

На рисунке 6 представлена зависимость температуры в функции времени для образца в виде слоя мха. Поведение T более существенно отличается от временных зависимостей T в слое древесины и рассчитанной модели. Однако именно на характеристике также присутствуют участки слабого прироста при $T = 300\text{--}350 \text{ К}$.

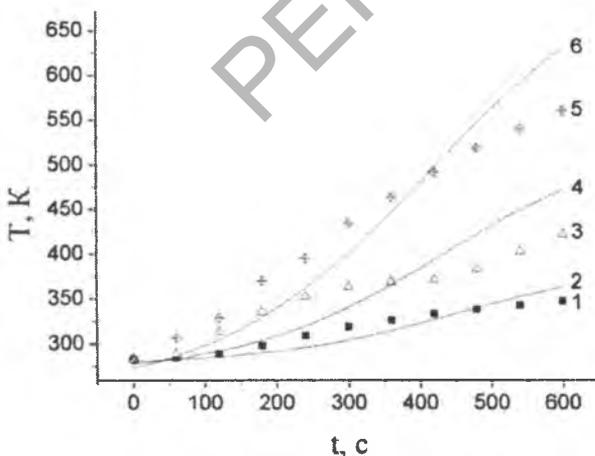


Рисунок 4 – Значения температуры в слое D древесины сосны влажности $w \approx 40\%$, плотности ρ на глубине x по данным эксперимента (1, 3, 5) и расчета (2, 4, 6 – $c = 2800 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\lambda = 0,23 \text{ Вт/(м·К)}$) при действии потока q , кВт/м^2 : 10 ($D = 0,035 \text{ м}$, $\rho = 585 \text{ кг/м}^3$, $x = 0,014 \text{ м}$), (1, 2); 20 ($0,0375 \text{ м}$, 640 кг/м^3 , $0,012 \text{ м}$), (3, 4); 30 ($0,0385 \text{ м}$, 615 кг/м^3 , $0,011 \text{ м}$), (5, 6)

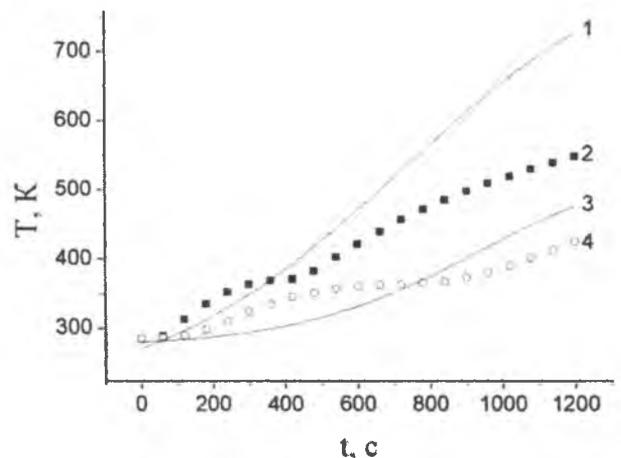


Рисунок 5 – Температура в функции времени для слоя древесины (сосна, толщина $D = 0,0375 \text{ м}$, $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$, $w \approx 40\%$) на глубине в точках $x_1 = 0,012 \text{ м}$ (1, 2) и $x_2 = 0,02 \text{ м}$ (3, 4); плотность потока тепла 20 кВт/м^2 ; расчет (1, 3; $c = 2800 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\lambda = 0,23 \text{ Вт/(м·К)}$); эксперимент (2, 4)

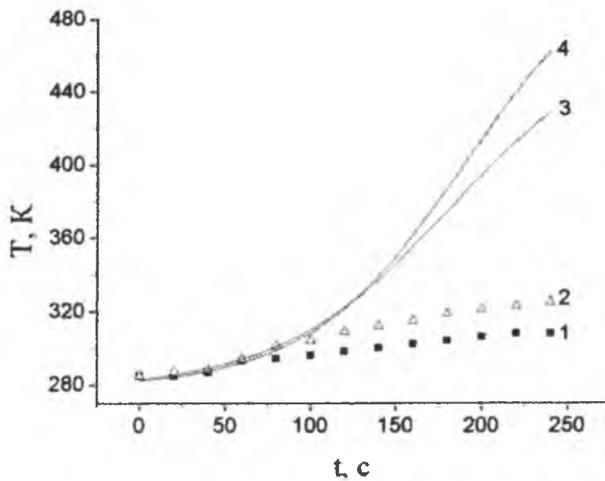


Рисунок 6 – Временная зависимость температуры в слое мха толщиной D в условиях теплового облучения ($D = 0,03$ м, $\rho = 75$ кг/м³, $c = 2300$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0,07$ Вт/(м·К), $w = 40\%$) на глубине $x = 0,015$ м по эксперименту (1, 2) и расчету (3, 4) для плотности потока q , кВт/м²: 5 (1, 3); 10 (2, 4)

Результаты расчета коррелируют с экспериментом только на малом временном интервале, что можно проинтерпретировать значительной пористостью материала, приводящей к действию нескольких механизмов передачи тепла внутри объема, включая и конвекцию через пустоты и поры. Достаточно малая плотность и теплопроводность приводят к быстрому локальному разогреву в отдельных точках и к неоднородности температурного поля при нерегулярном теплоотводе в глубину. Малость ρ и λ мха в сравнении с древесиной тем не менее не стимулируют быстрый рост T , как следует из расчетной модели, а обеспечивают прирост T на величину, сравнимую с приростом у древесины. Естественно допустить, что формирование температурного фронта происходит под влиянием процессов воздействия тепловой энергии на воду в различных состояниях и ее высвобождение из объема.

Совокупный анализ распределения температурных полей в слоистой среде показывает, что аналитическое рассмотрение накопления и передачи тепловой энергии от поглощающего лицевого слоя соответствует принятой модели тепловой изоляции для интервалов времени, ограничивающих допустимый уровень прогрева задней грани над температурой окружающей среды. Временные интервалы соответствия эксперимента модели теплоизоляции определяются прежде всего величиной поглощаемой энергии и степенью превышения приведенной температуры теплового потока над температурой окружения.

Вторым фактором, определяющим справедливость применения приближения отсутствия теплоотвода из разогреваемого материала, является быстрота накопления и распространения энергии по объему среды с подавлением явлений перегрева за счет рассредоточения энергии, что существенно зависит от тепловых характеристик среды. Эти свойства в значительной степени определяются состоянием гомогенности и фазовым составом материала, что особенно характерно для неоднородной по плотности и теплопередаче системы типа мох, для которого упрощенная модельная картина формирования температурного фронта реалистична в пределе не более двух минут при потоках 5–10 кВт/м².

Заключение. Условие адиабатичности тыльной грани односторонне разогреваемого лучистым потоком слоя изолирующего материала справедливо до момента достижения теплового фронта тыльной стороны с перепадом температуры над окружением в 50–100 К; длительность приближения подавленности теплообмена зависит от поглощаемой мощности, тепловых свойств материала, его толщины.

Для слоя древесины толщиной 3 см, контактирующего с окружающей средой комнатной температуры, формирование температурного поля при одностороннем обогреве отвечает закону квазилинейного роста температуры по объему в течение 400–800 с при эффективном поглощении мощности в 10–20 кВт/м² и влажности материала 40 %.

Низкая плотность при высокой пористости и рыхлости такого материала, как мох, стимулирует сравнительно малые скорости прогрева в сравнении с расчетной моделью, что отвечает снижению эффективности передачи тепла за счет сильной неомогенности среды, которая воспринимает падающую энергию не лицевой поверхностью, а большей частью всего объема. Область соответствия эксперимента расчету для мха при потоках 5–10 кВт/м² реализуется в пределах интервала длительностью порядка двух минут.

Малая теплопроводность воздуха при отсутствии конвекционных процессов допускает пренебрегать фактором теплоотвода с точностью 10–15 % при превышении температуры поверхности материала на 50–100 К над окружением для случая действия лучистых потоков с плотностью 10–20 кВт/м².

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы и технологии» (зад. 1.19 «Разработка методов синтеза новых материалов, раздел «Выявление топологии и воздействия лучистого потока применительно к повышению эффективности тепловой зоны реактор», проекта № Ф11М-005 БРФФИ «Аналитическая и численная аппроксимация пространственного распределения и воздействия потоков лучистой энергии».

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев, Ю.В. Теплофизика высоких температур и проблемы тепловой защиты / Ю.В. Полежаев // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – № 4. – С. 632–637.
2. Груздев, В.А. Моделирование температурного поля в поверхностном слое при импульсном электронно-лучевом воздействии / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.Г. Руголь // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80. – № 2. – С. 20–25.
3. Еналеев, Р.Ш. Огнестойкость элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве / Р.Ш. Еналеев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 5. – С. 48–53.
4. Гришин, А.М. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии / А.М. Гришин [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2002. – № 1. – С. 30–35.
5. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел. / Г. Карслоу, Д. Эгер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
6. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
7. Падерин, Л.Я. Экспериментальное исследование теплопереноса в пористых полупрозрачных теплозащитных материалах / Л.Я. Падерин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 1. – С. 60–67.
8. Фролов, Г.А. Температурный профиль в стационарном и нестационарном режимах прогрева и уноса массы низкотеплопроводных материалов / Г.А. Фролов, В.Л. Баранов // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 6. – С. 49–56.
9. Гришин, А.М. Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя лесного горючего материала, включая данные экспериментов и натуральных наблюдений / А.М. Гришин, Н.В. Барановский // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 166–170.
10. Рудобашта, С.П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С.П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – № 4. – С. 705–715.
11. Кудинов, В.А. Аналитический метод решения задач теплопроводности на основе введения фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий / В.А. Кудинов, Е.В. Стефанюк // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82. – № 3. – С. 540–559.

SUMMARY

This paper presents the results of the study of thermal front formation process in surface region of a layered poor heat conducting medium when heating the front by face radiant flux. The experimental data obtained for timber sample, asbestos-cement, and moss specify boundary conditions and indications for using the approximation of insulation back side by low initial exposure times. The obtained results may be useful in ensuring thermal stability of insulating materials, comprising elements irradiated by intense energy fluxes in technological cycles, including materials, susceptible to rupture or ignition under the action of radiation from open broad flame sources.

Поступила в редакцию 26.01.2012.