

УДК 677.04:536.46

**МОДЕЛЬ ОСТАТОЧНОГО ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦА  
ДВУМЕРНОГО ПЛОСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА**

**MODEL OF RESIDUAL BURNING OF A SAMPLE  
OF 2D-FLAT TEXTILE MATERIAL**

*Е.П. ЛАВРЕНТЬЕВА, К.Э. РАЗУМЕЕВ*  
*E.P. LAVRENTYEVA, K.E. RAZUMEEV*

**(ОАО "Инновационный научно-производственный центр текстильной и легкой промышленности",  
Московский государственный университет дизайна и технологии)  
(JSC "Innovation Scientific-Producing Centre of Textile and Light Industry",  
Moscow State University of Design and Technology)  
E-mail: k.razumeev@rambler.ru**

*Построена модель процесса распространения остаточного горения по поверхности образца плоского материала. Приведены примеры применения модели и оценки влияния температуры воспламенения и количества выделяемого тепла материала образца на динамику остаточного горения.*

*Described the model of the process of residual burning of the surface of 2D-flat sample of textile material. Examples of the usage of the mentioned model and of measurement of influence of the flaming temperature and quantity of heat release by the sample of the material on the dynamics of residual burning.*

**Ключевые слова:** текстильные материалы, остаточное горение, образец двумерного плоского материала.

**Keywords:** textile materials, residual burning, sample of 2D-flat material.

В российском и мировом текстиле все более актуальными становятся вопросы создания одежды и других текстильных материалов с высокими защитными свойствами, в том числе огне- и термозащитными.

Создание текстильных материалов с огнезащитными свойствами, как правило, достигается двумя способами: 1) специальной пропиткой тканей из натуральных волокон; 2) применением огнестойких химических волокон, как в чистом виде, так и в смеси с натуральными волокнами.

Эффективная защита от таких поражающих факторов, как лазер, ионизирующее облучение, сварка и брызги расплавленного металла, повышенные температуры в течение длительного времени, высокие температуры рабочих сред и поверхностей, окружающего воздуха, неожиданное воспламенение и другие, требуется широкому комплексу отраслей промышленности и ряду ведомств.

В зависимости от назначения к текстильным материалам в отношении огнестойкости предъявляются различные требования. С целью прогнозирования показателя огнестойкости разрабатываемых материалов и соответственно подбора способа достижения огнезащитных свойств целесообразно разработать модель остаточного горения.

В соответствии со стандартом [1] проверки огнезащитных свойств ткани небольшая область образца подвергается воздействию пламени горелки. В результате эта область ткани воспламеняется, то есть начинает гореть или тлеть, после чего горелка удаляется. После удаления горелки в зависимости от свойств материала и структуры ткани и ее огнезащитной обработки

горение или тление области либо продолжается в течение некоторого времени, после чего прекращается, либо может перейти на соседние участки ткани. В первом случае выделяющееся тепло может передаваться соседним участкам ткани, но не приводит к их возгоранию. Со временем это тепло рассеивается, и горение или тление области прекращается. В другом случае происходит возникновение новых очагов горения на соседних участках, что приводит к выделению дополнительного тепла, продлевая процесс горения или тления, который захватывает площадь образца, превышающую площадь первоначальной области горения. Уровень огнезащитных свойств ткани определяется продолжительностью отрезка времени, в течение которого затухает горение образца, по сравнению с заданным значением стандарта.

Известно, что процесс горения представляет собой сложное сочетание физических, химических и механических процессов, протекающих одновременно и во взаимодействии друг с другом. Поэтому попытки теоретического описания горения математическими методами разделились на две категории.

Первая категория методов ограничивается обобщенным описанием основных черт процесса горения на качественном или приближенном количественном уровне. Начало этим работам положили труды акад. Н.Н. Семенова по теории цепных реакций [2], акад. Я.Б.Зельдовича и проф. Д.А.Франк-Каменецкого по математической [3] и химической [4] теории горения и взрыва.

Вторая категория методов нацелена на получение конкретных количественных результатов. Для этого строят сложные си-

стемы дифференциальных и алгебраических уравнений. Их решение возможно численными методами на ЭВМ [5], [6]. Однако при этом требуется задать значения ряда параметров, получаемых из экспериментов. Практическая ценность получаемых результатов оказывается невысокой, поскольку они, несмотря на сложность модели, не дают удовлетворительной точности.

В данной работе мы придерживаемся первого подхода и рассматриваем частную задачу передачи тепла от области воздействия горелки к соседним областям, которая описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a^2 \Delta T(r, t) + q(r, t, T), \quad (1)$$

где  $T(r, t)$  – температура ткани в точке  $r$  в момент времени  $t$ ; параметр  $a$  – коэффициент

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right) + q(r, t, T), \quad 0 \leq r \leq R; \quad t \geq 0. \quad (3)$$

При отсутствии источника тепла вне первоначальной области горения (то есть при  $q(r, t, T) = 0$ ) уравнение (1) (или (3)) является однородным линейным, и его решение известно для разных краевых условий. Так, если функция  $\varphi(r)$  задает начальное распределение температуры образца  $T(r, 0) = \varphi(r)$ , то распределение температуры по поверхности в любой момент времени определяется интегралом свертки этой функции с функцией Грина  $G(r, r', t)$  для уравнения (1):

$$T(r, t) = \int_s G(r, r', t) \varphi(r') dr'. \quad (4)$$

Способы определения функции Грина описаны в литературе [7]. Например, если образец имеет форму круга с центром в начале координат, то для двумерной осесимметричной стационарной задачи функция Грина равна:

$$G(r, r') = \ln \frac{1}{r} - \ln \frac{R/r^0}{r'}, \quad (5)$$

ент температуропроводности;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $q(r, t, T)$  – интенсивность источника тепловой энергии в точке  $r$  в момент времени  $t$ . Параметр  $a$  равен:

$$a = \sqrt{\frac{k}{C\rho}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности материала в соответствии с законом теплопроводности Фурье;  $C$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – объемная удельная плотность материала.

Рассматриваем передачу тепла только в материале ткани, причем область начального горения считаем точечной, а материал изотропным. Тогда задачу можно считать двумерной и осесимметричной, что позволяет представить уравнение (1) в виде:

где  $R$  – радиус круга;  $r^0$  – точка, сопряженная к точке  $r'$  относительно окружности.

Присутствие в уравнении (3) функции  $q(r, t, T)$ , зависящей не только от координаты  $r$  и времени  $t$ , но и температуры  $T(r, t)$  делает уравнение (3) нелинейным и неоднородным. Решение таких уравнений осуществляется численными методами и изучено в значительно меньшей степени [8]. Поэтому была разработана компьютерная программа для численного решения уравнения (3). Приведем некоторые результаты этого решения.

Моделировался образец материала, у которого область горения имела форму круга единичного радиуса. Наибольший радиус распространения тепла принят равным  $R = 50$  ед. Рассмотрено распространение тепла от области горения по плоскости образца симметрично в течение  $T = 100$  с. Температура в области горения в начальный момент равна  $T_s = 1200^\circ\text{C}$ , а остальной поверхности образца  $20^\circ\text{C}$ . Понижение температуры в точке горения во времени

происходит по закону, который можно аппроксимировать известной функцией:

$$T(0, t) = \frac{T_s}{\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{bT_s}{\sqrt{t}}\right). \quad (6)$$

Константа  $b$  зависит от свойств материала и определяет скорость снижения температуры. Функция  $q(r, t, T)$  задана выражением  $q(r, t, T) = Q \cdot Y(T(r, t) - T_f)$ , где  $Q$  – выделение тепла при горении единицы площади материала в единицу времени;  $Y(z - z_a)$  – единичная ступенчатая функция Хевисайда со "ступенькой" в  $z_a$ ;  $T_f$  – тем-

пература возгорания материала. Такой вид функции  $q(r, t, T)$  позволяет смоделировать ситуацию, когда при температуре материала ниже  $T_f$  возгорания новых участков не происходит, а при превышении пороговой температуры  $T_f$  участок материала загорается и становится новым источником тепловой энергии. Значения параметров функции выбраны равными  $T_f = 730^\circ\text{C}$  и  $Q = 30^\circ\text{C s}^{-1}$ . Полученное при этих значениях температурное поле  $T(r, t)$  представлено на рис. 1 (распространение остаточного горения при высокой температуре воспламенения материала образца).

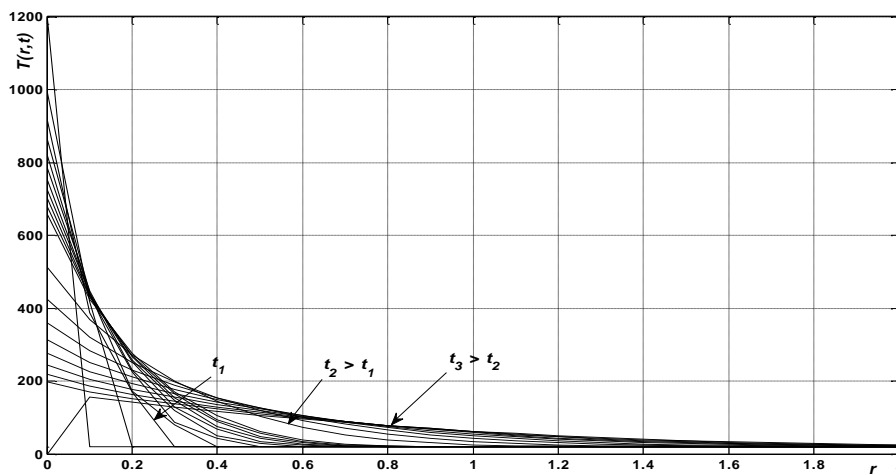


Рис. 1

Из графика на рис. 1 видно, как с течением времени повышение температуры передается все более удаленным участкам материала, в то время как температура в точке начального горения ( $r = 0$ ) понижа-

ется. Некоторый излом кривых в окрестности температуры  $T_f = 730^\circ\text{C}$  говорит о возгорании некоторых участков материала с последующим быстрым затуханием.

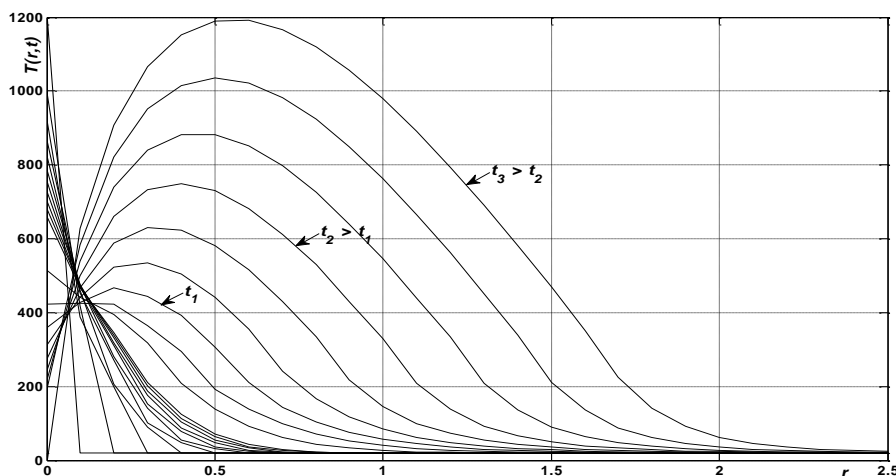


Рис. 2

Если рассматривать остаточное горение (или тление) образца, у которого более низкая температура воспламенения (в рассматриваемом примере при  $T_f < 370^\circ\text{C}$ ), то происходит воспламенение прилегающих к первоначальному участку областей образца, и зона горения распространяется по его поверхности. Модель показывает проявление этого эффекта, что наглядно видно на графиках (рис. 2 – распространение остаточного горения при низкой температуре воспламенения материала образца) изменения распределения температуры по радиусам от начальной области горения ( $r = 0$ ) во времени.

Аналогичный эффект наблюдается и в случае, когда количество выделяемого при горении тепла оказывается достаточно большим для воспламенения соседних областей образца (рис. 3 – распространение остаточного горения при высоком тепловыделении горящих участков образца). Кривые на рис. 3 получены при условиях, когда температура воспламенения достаточно высока, чтобы материал не мог воспламениться от первоначального участка горения, но большое количество тепла, выделяемого при возгорании соседних областей, приводит к распространению горения по поверхности.

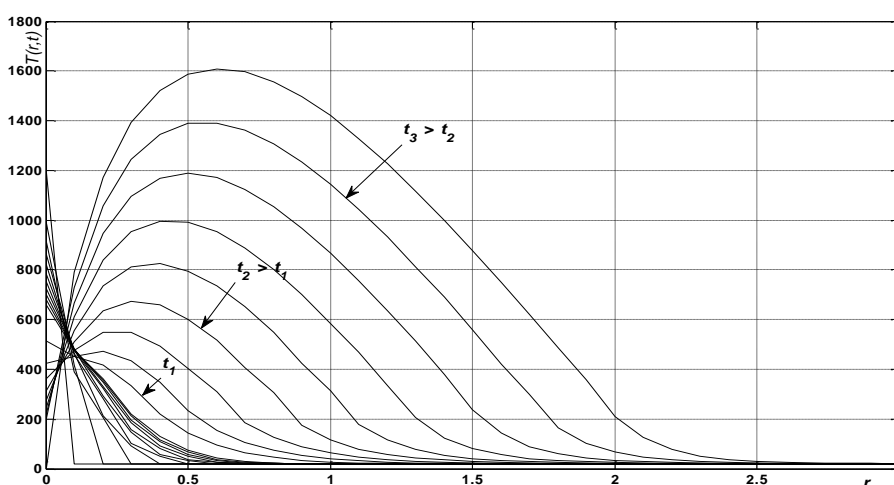


Рис. 3

## ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель процесса распространения остаточного горения по поверхности образца плоского материала. Модель описывается нелинейным нестационарным дифференциальным уравнением в частных производных.

2. Разработан алгоритм численного решения дифференциального уравнения при краевых условиях, соответствующих условиям проведения испытаний образца на устойчивость к горению.

3. Приведены примеры применения модели и оценки влияния температуры воспламенения и количества выделяемого тепла материала образца на динамику остаточного горения.

## ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 15898–70. Ткани льняные и полульняные. Метод определения огнестойкости.
- Семенов Н.Н. Цепные реакции. – Л.: Госхимиздат, 1934.
- Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
- Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987.
- Пашков Л.Т. Основы теории горения. – М.: Изд. МЭИ, 2002.
- Гришин А.М., Пугачева П.В. Аналитическое решение задачи о зажигании стены деревянного дома в результате действия фронта лесного пожара // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010, №3(11). С.88..94.
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1999.

8. Голятина Р.И., Ткачев А.Н., Яковенко С.И. Расчет тепловой волны поглощения лазерного излучения в волоконном световоде на основе двумерного нестационарного уравнения теплопроводности // Журнал технической физики. – 2005, т.75, вып.2. С.94...98.

#### REFERENCES

1. GOST 15898–70. Tkani l'njanye i polul'njanye. Metod opredelenija ognestojkosti.

2. Semenov N.N. Сепные реакции. – L.: Goshim-izdat, 1934.

3. Zel'dovich Ja.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Mahviladze G.M. Matematicheskaja teorija gorenija i vzryva. – M.: Nauka, 1980.

4. Frank-Kameneckij D.A. Diffuzija i teploperedacha v himicheskoj kinetike. – M.: Nauka, 1987.

5. Pashkov L.T. Osnovy teorii gorenija. – M.: Izd. MJeI, 2002.

6. Grishin A.M., Pugacheva P.V. Analiticheskoe reshenie zadachi o zazhiganii steny derevjannogo doma v rezul'tate dejstvija fronta lesnogo požhara // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mehanika. – 2010, №3(11). S.88...94.

7. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoi fiziki. – M.: Nauka, 1999.

8. Goljatina R.I., Tkachev A.N., Jakovenko S.I. Raschet teplovoj volny pogloshhenija lazernogo izluchenija v volokonnom svetovode na osnove dvumernogo nestacionarnogo uravnenija teploprovodnosti // Zhurnal tehniczeskoj fiziki. – 2005, t.75, vyp.2. S.94...98.

Рекомендована Ученым советом ОАО "ИНПЦ ТЛП". Поступила 08.02.16.