

УДК 691:699.812.2 + 614.841.332

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Трефилов В.А., Наумов И.С.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, e-mail: bg@pstu.ru*

Рассмотрены условия и процесс возникновения и распространения пламени по поверхности многослойных материалов и особенности распределения по зонам горения. Описаны негативные факторы, возникающие в процессе горения многослойных материалов (в том числе строительных и отделочных материалов), а также нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов. Проанализированы работы учёных, касающиеся физики и химии возникновения и распространения пламени по поверхности различных материалов в зависимости от внешних условий среды, в которых они находятся. Описано то, что положено в основу каждой математической модели, какие из них могут быть использованы и в какой мере. Рассмотрены недостатки существующих моделей, предложены соответствующие альтернативные варианты решения поставленных в них задач. Описаны существующие модели распространения пламени по поверхности многослойных материалов. Изображены различные схемы: схема модели распространения диффузионного пламени, схема распространения пламени по поверхности, схема распространения пламени по горизонтальной поверхности, схема распространения тепловых потоков в элементарном объёме многослойного материала, описаны все происходящие при этом процессы. На основании учета всех существующих математических моделей, касающихся распространения пламени по поверхности многослойных материалов, предложена новая модель, которая должна учитывать все возможные параметры как самого материала, включая его пространственную ориентацию и набор слоёв по их физико-химическим свойствам, так и внешних условий воздействующих на многослойные материалы в процессы возгорания и распространения пламени по поверхности. Говорится о необходимости включения специальных дополнительных слоёв в многослойные материалы, которые будут препятствовать дальнейшему распространению пламени вглубь материала.

Ключевые слова: многослойные материалы, горючесть, дымообразование, скорость распространения пламени, токсичность, конденсированная фаза, волна горения, радиационные потери, набегающий поток, окисляющая среда, удельная теплота сгорания, теплоотдача, энергия активации, граница теплового слоя, теплосодержание, фронт пламени, тепловой баланс, затухание

MODELING OF COMBUSTION PROCESSES MULTILAYER POLYMER MATERIAL

Trefilov V.A., Naumov I.S.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: bg@pstu.ru

The conditions and the process of emergence and spread of flame along the surface of the multi-layer materials and features of the distribution of the zones of combustion. Described the negative factors arising during combustion of multilayer materials (including building materials), as well as petroleum products and lubricants. Analyzed the work of scientists concerning the physics and chemistry of the emergence and spread of flame on the surface of various materials depending on the environmental conditions of the environment in which they are located. Described that underlies each of the mathematical model, which of them can be used and to what extent. The shortcomings of the existing models, suggest appropriate alternatives for solving the problems in them. Describes the existing model of flame propagation on the surface of the laminates. Shows various schemes: Scheme diffusion flame propagation model, the circuit on the surface spread of flame, the flame propagation scheme horizontal surface heat flux distribution scheme in an elementary volume of the laminate, described all the processes occurring during this. Based on consideration of all of the existing mathematical models for the spread of flame over the surface of the laminates, a new model that takes into account all the possible options as the material itself, including its spatial orientation, and a set of layers according to their physico-chemical properties and environmental conditions affecting in laminates to the processes of ignition and flame spread on the surface. It speaks of the need to include specific additional layers in multi-layer materials that will prevent the further spread of flame deep into the material.

Keywords: laminates, flammability, smoke generation, flame spread, toxicity, condensed phase, the combustion wave, radiation losses, the incoming flow, oxidizing environment, the specific heat of combustion, heat transfer, the activation energy of the thermal boundary layer, the heat, the flame front, heat balance, the attenuation

В нашей стране за один год происходит в среднем почти четверть миллиона пожаров, уничтожается ценностей на десятки миллиардов рублей, погибает больше полутора десятков тысяч человек и еще большее количество людей получают травмы.

По статистике [4], большинство (около 70%) пожаров возникает в производственной сфере, в том числе в жилых домах, а также общественных зданиях и помещениях. К наиболее трагическим последствиям приводят пожары в общественных

помещениях, если там собирается большое количество людей. В целом в жилых и общественных зданиях и помещениях гибнет около 90% от общего количества погибших на пожарах. При этом главные причины гибели людей на пожарах – действие продуктов горения (до 76% от общего числа погибших) и высокая температура (до 19% от общего числа погибших), что является следствием использования пожароопасных полимерных многослойных материалов, хорошо поддерживающих процесс горения

и распространения пламени. Эти материалы легко воспламеняются и оплавляются, выделяют ядовитые вещества в процессе горения.

Токсичные продукты сгорания являются основным фактором, который ведёт к наибольшему количеству человеческих жертв. Состав продуктов сгорания зависит от состава горящего вещества и от условий его горения. При неполном сгорании органических веществ в условиях низких температур и недостатка воздуха образуются окись углерода, спирты, кетоны, альдегиды, кислоты. Эти продукты образуют едкий и ядовитый дым. Кроме того, продукты неполного горения сами способны гореть и образовывать с воздухом взрывчатые смеси [6].

Тепло от пламени внешнего источника зажигания, попадая на поверхность материала перед его кромкой, прогревает его слой до температуры, при которой начинается его газификация. Образовавшиеся газообразные горючие продукты разложения материала диффундируют от поверхности в окислительную среду. В газовой фазе возникает самоускоряющаяся экзотермическая реакция окисления горючих продуктов. Таким образом, обеспечивается непрерывное продвижение пламени по поверхности материала.

Одним из основных направлений повышения пожарной безопасности зданий и сооружений является использование наиболее эффективных огнезащитных материалов (пассивная защита) для строительных конструкций, снижения горючести полимерных многослойных материалов и скорости распространения огня по ним. Для этого необходимо смоделировать поведение материала при пожаре в лабораторных условиях, следовательно, существует необходимость исследования полимерных многослойных

материалов на горючесть, воспламеняемость, способность дымообразования, на скорость распространения пламени, а также на токсичность и другие опасные и вредные факторы пожара.

Анализ существующих моделей горения

В работах Маги и Маклеви, Хирано, Уильямса, Де-Риса, Рыбанини С.С. [5] были рассмотрены модели распространения пламени по поверхности многослойных материалов в зависимости от их ориентации в пространстве. Маги и Маклеви экспериментально показали, что наиболее быстро пламя по поверхности многослойных материалов распространяется вертикально вверх.

В общем виде скорость распространения пламени V на основе закона сохранения энергии может быть выражена через тепловой поток q_1 , переносимый от пламени на воспламеняемую поверхность в следующем виде:

$$\rho V \Delta h = q, \quad (1)$$

где ρ – плотность горючего материала ($\rho V = m$ – массовая скорость горения); Δh – изменение энтальпии при изменении температуры единичной массы от начальной температуры T_0 до температуры T_1 , соответствующей температуре воспламенения [2].

Согласно модели Де-Риса, перенос тепла в отсутствие вынужденной конвекции (скорость воздуха равна 0) к поверхности несгоревшего многослойного материала для термически тонких слоёв осуществляется путём теплопроводности через газовую и конденсированную фазу, а также излучением (двухмерная задача).

С учётом краевых условий уравнение скорости V распространения пламени по поверхности многослойных материалов записывается в следующем виде:

$$V = \frac{\rho c_p \lambda V_a}{(\rho c \lambda)_F} \left[\frac{T_f - T_V}{T_V - T_\infty} + \frac{2R_1 F (2\lambda / \rho c V_a l_l)}{\rho c_p V_a (T_V - T_\infty)} + \frac{2R_2}{\pi \rho c V_a (T_V - T_\infty)} \right]. \quad (2)$$

Все рассматриваемые модели имеют ряд недостатков, основными из которых являются следующие: отсутствие в явной форме зависимости скорости распространения пламени от давления; отсутствие концентрации окислителя; плохая корреляция с экспериментальными данными.

Так, в работе [7] не учитывается область воспламенения вблизи кромки пламени, характеризующаяся отношением времени массопереноса к времени химической реакции мало и влияние химической кинетики значительно.

В основу модели Фернандеза–Пелло и Уильямса было положено воздействие диффузионного пламени, примыкающего к активно газифицирующему многослойному материалу и устанавливающее на его поверхности повышенную температуру. Модель включает основные уравнения в газовой фазе, то есть уравнения сохранения массы, энергии и вещества [5].

В результате авторами получены выражения для профиля температуры, массовой скорости выгорания и скорости распространения пламени. Все эти выражения громоздки и включают ряд неизвестных пара-

метров, которые могут быть определены на основе экспериментальных данных.

В работе Уихмана развита теоретическая модель оценки скорости распространения пламени в условиях теплопередачи при линейном скоростном профиле набегающего потока.

В работе Уихмана и Уильямса представлена модель стационарного распространения пламени [7]. Рассмотрены различные скорости набегающего потока и распространения пламени, профиль набегающего потока был принят в приближении $Oscen'$ а.

Во всех проанализированных выше моделях процессы, протекающие во фронте пламени, не рассматривались. На основе анализа теплового баланса на границе области воспламенения, её структуры и фундаментального уравнения распространения была проведена оценка скорости распространения пламени [7]. Автором рассмотрены отдельно три основные области, примыкающие к фронту пламени: зоны химической реакции, области газа и области многослойного материала, нагретые теплом, поступающим из зоны химической реакции.

В настоящее время наряду с аналитическими методами используются численные методы, позволяющие изучить более общие постановки решения задачи о распространении пламени по поверхности многослойных материалов, а также дают возможность введения химической кинетики газофазных пламен, что для аналитических методов представляет определённые трудности [7].

Таким образом, в настоящее время накоплен большой опыт в теоретическом и экспериментальном исследовании процесса распространения пламени по поверхности многослойных материалов, а происходящие при этом физико-химические процессы достаточно ясны. При строгой математической постановке задачи процессы, происходящие в газовой фазе, описываются уравнениями, выражающими собой законы сохранения количества движения, массы, компонент и энергии, включающие в себя радиационный перенос и химическую кинетику. Но эти уравнения в полном виде вместе с уравнениями сохранения энергии с трудом поддаются решению с помощью современных математических методов вследствие трехмерности в нестационарном случае и только на суперкомпьютерах.

Очевидно, что скорость развития пожара зависит от того, как быстро может распространиться горение от места воспламенения с охватом все большей площади многослойных материалов. Следовательно, способность многослойных материалов распространять горение необходимо определять как одну из важных характеристик их пожарной опасности.

Из проведенного выше обзора работ, посвященных проблеме разработки математических моделей распространения пламени по поверхности многослойных материалов, очевидно, что важнейшей количественной характеристикой этого процесса является скорость распространения пламени. Основной задачей в теоретическом и экспериментальном исследовании горения многослойных материалов является определение скорости распространения пламени по поверхности в зависимости от теплофизических свойств конденсированной и газовой фаз, кинетических параметров реакции пиролиза и газофазных реакций в пламени, а также физико-химические свойства многослойных материалов и условий окружающей среды.

По своей сути математическая модель процесса распространения пламени по поверхности многослойных материалов должна прогнозировать скорость распространения как функцию большого числа параметров реагирующей системы и пределы устойчивого горения по разным параметрам. Так как учёт и строгий анализ их не всегда возможны, при разработке моделей обычно рассматривают доминирующие факторы, определяющие скорость распространения пламени. Наиболее логичный подход – выделение в многостадийном процессе горения многослойных материалов ведущих стадий и выявление механизмов тепло- и массообмена, контролирующих скорость распространения пламени при заданных условиях [7].

Математическая постановка задачи:

1. Стадия индукции

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \quad (3)$$

2. Стадия распространения

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r} - \bar{U}(r) \frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \quad (4)$$

3. Уравнение общего теплового баланса

$$\bar{h}\omega\bar{U} + \bar{\alpha} \int_{y=0}^{\infty} (\Theta|_{y=0} - \Theta_0) dx = \bar{h}\bar{U}(t)\Theta_{\max} + \bar{h}\epsilon_1\bar{U}(t)(\Theta_0 - \Theta_{\max}) + \bar{A}k\epsilon_1\bar{U}(t)(\Theta_0 - \Theta_{\max}). \quad (5)$$

Представленная модель отличается от других существующих моделей тем, что в ней рассматривается процесс распространения пламени по наклонной поверхности многослойных материалов с набегающим потоком воздуха; масштабы длины и времени, с помощью которых определяется зависимость, зависит от теплофизических свойств многослойных материалов, начальной температуры материалов, плотности потока теплового излучения факела пламени.

Предлагаемые решения

Для того чтобы остановить процесс горения многослойного материала, нами предложено ввести слой из такого материала, который будет выполнять функцию барьера. Этот слой не будет давать возможности дальнейшего распространения пламени вглубь материала, останавливая процесс горения автоматически при прогорании до него. Будет происходить процесс постепенного затухания, что исключит или сведет к минимуму участие человека в процессе ликвидации и локализации очага возгорания средствами пожаротушения.

Для нахождения экспериментально определяемых характеристик процесса необходима база для исследования. Проанализировав весь спектр предлагаемых установок, приборов и стендов для проведения работ, свя-

занных с исследованием процессов горения полимерных многослойных материалов, можно сказать, что для полноценного комплексного анализа процессов горения нужна установка, сочетающая в себе возможность выявления всех необходимых параметров одновременно, в которой исследование направлено не на отдельный материал и параметр, а имеется возможность определения различных параметров большинства полимерных многослойных материалов [1].

Параметры материалов, которые необходимо определить: группа горючести; температура воспламенения; температура тления; температура самовозгорания; скорость распространения пламени; коэффициент дымообразования. Необходимо не только определять весь спектр параметров возникающих во время пожара, нужно ещё обеспечить безопасность проведения работ (минимизировав доступ в рабочую зону), а также предусмотреть возможность дополнительных исследований на установке.

Существующие установки не дают возможности комплексной оценки пожароопасности строительных и отделочных материалов, кроме того, они очень громоздки и небезопасны при эксплуатации [3]. При создании установки были учтены её эргономичность и безопасность составляющих элементов (рисунок).

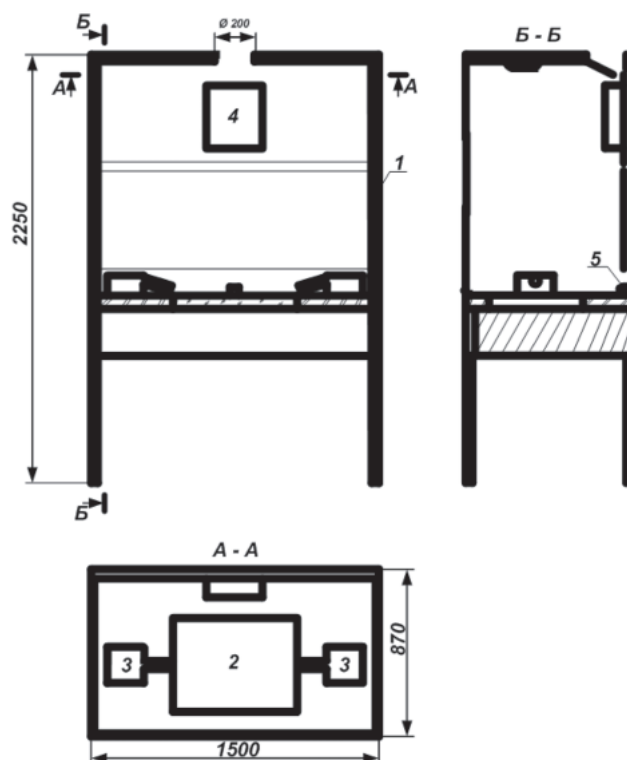


Схема установки комплексного анализа процессов горения:
 1 – вытяжной шкаф; 2 – нагревательная плита; 3 – газовые горелки;
 4 – портативный хроматограф; 5 – теплоvisor

Использование установки предусматривает выполнение на ней научно-исследовательских работ по комплексному исследованию процессов горения полимерных многослойных материалов с непосредственной возможностью определения каждого параметра по отдельности. На установке имеется возможность создания различных композитов с заранее заданными свойствами на основе математической модели, составленной по статистическим данным, полученных в результате испытаний различных материалов на установке.

Список литературы

1. ГОСТ 30244-94. Материалы строительные. Методы испытания на горючесть.
2. Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем / под ред. А.А.Самарского. – М.: Наука, 1989. – 269 с.
3. Наумов И.С. Проблема оценки пожароопасности строительных и отделочных материалов // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. – 2011. – № 6. – С. 26–30.
4. Официальный сайт Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – URL: <http://www.mchs.gov.ru/> (дата обращения: 07.06.13).
5. Смелков Г.И. Снижение пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией и оболочками из ПВХ материалов // Пожарная безопасность. – 2011. – № 2. – С. 66–72.
6. Федеральный закон РФ от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
7. Khalafallah B.H. Coupled heat and mass transfer in concrete exposed to fire. – PhD Thesis. – 2001. – University of Aston. – 27 p.

References

1. GOST 30244-94. Materials of construction. Methods of test for flammability.
2. Mathematic modeling: The description and the study of complex systems / Edited by A.A. Samarskogo. Moscow: Science, 1989. 269 p.
3. Наумов И.С. The problem with assessing fire hazard of building materials // Occupational health and safety in industrial plants. 2011. no. 6. pp. 26–30.
4. Official website The Ministry of the Russian Federation for Affairs for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. URL: <http://www.mchs.gov.ru/> (date of circulation: 07.06.13).
5. Smelkov G.I. Reduced fire hazard cable products with insulation and sheaths of PVC material // Fire safety. 2011. no. 2. pp. 66–72.
6. Federal law RF from 22 July 2008 year. № 123-FL Technical regulations on fire safety requirements.
7. Khalafallah B.H. Coupled heat and mass transfer in concrete exposed to fire. PhD Thesis. 2001. University of Aston. 27 p.

Рецензенты:

Цветков Г.А., д.т.н., профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Земсков А.Н. д.т.н., заместитель генерального директора; директор по науке и технической политике, Западно-Уральский машиностроительный концерн, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 11.07.2013.