

<https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.04.15-28>

УДК 614.841.41

Экспериментальное исследование и численное моделирование распространения пламени по поверхности пластины ПММА

© О. П. Коробейничев^{1✉}, И. Е. Герасимов¹, М. Б. Гончикжапов¹,
А. Г. Терещенко¹, Р. К. Глазнев², С. А. Трубачев², А. Г. Шмаков¹,
А. А. Палецкий¹, А. И. Карпов³, А. А. Шаклеин³, А. Кумар⁴, В. Рагхаван⁴

¹ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3)

² Новосибирский государственный университет (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2)

³ Институт механики УрО РАН (Россия, 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34)

⁴ Индийский институт технологии Мадрас (Индия, 600036, г. Ченнай)

РЕЗЮМЕ

Введение. Полимерные материалы находят широкое применение, поэтому актуальной задачей является разработка модели горения полимеров для предсказания их поведения при пожаре и снижение горючести. Данная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию распространения пламени по поверхности горизонтально и вертикально расположенных пластин полимера в неподвижном воздухе.

Методика. Объектом исследования был литой полиметилметакрилат (ПММА). Экспериментальные исследования были сфокусированы на измерении пространственных распределений концентраций веществ и температуры в газовой фазе. Температура измерялась с помощью микротермопар (размером 50 мкм). Для измерения пространственного распределения концентраций веществ в пламени использовалась зондовая масс-спектрометрия.

Результаты и обсуждение. В пламени были идентифицированы основные компоненты, включая метилметакрилат (ММА), O₂, CO₂, H₂O, N₂, C₂H₄ (этилен), C₃H₆ (пропилен), и измерены их профили концентраций на разных расстояниях от фронта пламени. Установлено, что химическая структура пламени находится в хорошем согласии с тепловой структурой; размер «темной зоны» пламени, в которой температура вблизи поверхности полимера минимальна, хорошо коррелирует с размером свободной от кислорода зоны. Были также измерены такие характеристики горения, как массовая скорость выгорания, линейная скорость распространения пламени, ширина зоны пиролиза и распределение температуры в конденсированной фазе. На основе экспериментальных результатов были определены плотности кондуктивного и радиационного тепловых потоков от пламени к поверхности полимера. Расчет плотности радиационного потока выполнен в предположении оптически тонкой модели. Проведено моделирование распространения пламени по горизонтальной поверхности ПММА с помощью двумерной сопряженной ламинарной модели горения, учитывающей одностадийные реакции в газовой и конденсированной фазах. Моделирование распространения пламени по вертикальной поверхности ПММА проводилось с помощью экономичной модели в программном пакете FDS.

Заключение. Показано, что разработанная модель хорошо описывает такие параметры, как массовая скорость горения, скорость распространения пламени, а также распределение температуры и концентраций веществ вблизи фронта пламени.

Ключевые слова: распространение пламени; горение ПММА; структура пламени; микротермопара; зондовая масс-спектрометрия; тепловой поток; сопряженная модель горения; FDS-моделирование.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-49-02017).

Для цитирования: Коробейничев О. П., Герасимов И. Е., Гончикжапов М. Б., Терещенко А. Г., Глазнев Р. К., Трубачев С. А., Шмаков А. Г., Палецкий А. А., Карпов А. И., Шаклеин А. А., Кумар А., Рагхаван В. Экспериментальное исследование и численное моделирование распространения пламени по поверхности пластины ПММА // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.15-28.

✉ Коробейничев Олег Павлович, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

An experimental study and numerical simulation of flame spread over surface of PMMA slab

© Oleg P. Korobeinichev^{1✉}, Ilya E. Gerasimov¹, Munko B. Gonchikzhapov¹,
Aleksander G. Tereshchenko¹, Roman K. Glaznev², Stanislav A. Trubachev²,
Andrey G. Shmakov¹, Aleksander A. Paletsky¹, Aleksander I. Karpov³,
Artem A. Shaklein³, Amit Kumar⁴, Vasudevan Raghavan⁴

- ¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (Institutskaya St., 3, Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
- ² Novosibirsk State University (Pirogova St., 2, Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
- ³ Institute of Mechanics UB RAS (T. Baramzinoy St., 34, Izhevsk, 426067, Russian Federation)
- ⁴ Indian Institute of Technology Madras (Chennai, 600036, India)

ABSTRACT

Introduction. Polymer materials are widely used, however the actual object is to provide polymers combustion model to predict their behavior under fire, and reducing flammability. The work is devoted to the experimental study and numerical simulation of flame propagation over the surface of horizontally and vertically placed slabs of polymer in still air.

Methods. The object of the investigation was cast polymethylmethacrylate (PMMA). The experiment was focused on measurement of the spatial distributions of the temperature and species concentrations of the PMMA pyrolysis and combustion products in the gas-phase over the surface of PMMA. Temperature was measured by micro-thermocouple with diameter of 50 microns. Probe mass-spectrometry was used for the measurement of the spatial distribution of species concentrations in the flame.

Results and discussion. The main species (methylmethacrylate (MMA), O_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , C_2H_4 (ethylene), C_3H_6 (propylene)) were identified and their concentration profiles were measured on the different distance from the flame front. The chemical structure of the flame was established to be in good agreement with the thermal one. The size of the “dark zone” of the flame, in which the temperature near the surface of the polymer is minimal, correlated well with the size of the oxygen-free zone. The mass burning rate, the velocity of flame propagation, the width of the pyrolysis zone and the temperature distribution in the condensed phase were also measured. Based on the experimental results, densities of conductive and radiation heat fluxes from the flame to the fuel surface were determined. Calculation of the radiation heat flux density was carried out under the assumption of an optically thin model. Modeling of the horizontal flame propagation over the PMMA surface was carried out using a two-dimensional conjugated laminar combustion model that takes into account one-step reactions — the decomposition reaction of PMMA in the condensed phase and the oxidation of decomposition products in the gas phase. Modeling of the vertical flame propagation over the PMMA surface was carried out using economical model of FDS.

Conclusion. The model was shown to describe satisfactorily the experimental data such as the mass burning rate, flame propagation velocity, as well as the temperature distribution and concentration of species near the flame front.

Keywords: flame spread; PMMA combustion; flame structure; microthermocouple; probing mass spectrometry; heat flux; coupled combustion model; modeling by FDS.

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 16-49-02017).

For citation: O. P. Korobeinichev, I. E. Gerasimov, M. B. Gonchikzhapov, A. G. Tereshchenko, R. K. Glaznev, S. A. Trubachev, A. G. Shmakov, A. A. Paletsky, A. I. Karpov, A. A. Shaklein, A. Kumar, V. Raghavan. An experimental study and numerical simulation of flame spread over surface of PMMA slab. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 15–28 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.15-28.

✉ Oleg Pavlovich Korobeinichev, e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

Введение

Полимерные материалы находят широкое применение во всех сферах нашей жизни. В связи с ростом в последнее время числа пожаров актуальным является предсказание поведения этих материалов при пожаре и снижения их горючести [1–7]. Важный вклад в решение этой проблемы вносит разработка модели горения полимерных материалов. Распространение пламени по поверхности полимеров при их горении представляет собой один из ключевых процессов. Его понимание необходимо для оценки рисков возникновения пожаров и моделирования их распространения. Среди различных, используемых на практике полимеров наибольшее внимание исследователей уделяется полиметилметакрилату (ПММА), что обосновано сравнительно простым механизмом его разложения и сгоранием без образования угольного остатка. Все это вместе с его достаточно высокой распространенностью делает ПММА одним из наиболее удобных модельных полимеров для ис-

следования распространения пламени. В настоящей работе рассматриваются два относительно медленных процесса — распространение пламени по горизонтальной поверхности и распространение пламени по вертикальной поверхности сверху вниз. Такая постановка эксперимента сравнительно проста и удобна для теоретического анализа и измерения тепловой и химической структуры пламени.

В литературе имеется несколько упрощенных теоретических моделей распространения пламени, которые включают в себя механизмы передачи тепла по поверхности полимера в пограничном слое. В ряде работ, посвященных численному моделированию распространения пламени по поверхности полимера [8–15], модель включает уравнения сохранения энергии с химическими реакциями как в газовой, так и в конденсированной фазах. Тем не менее сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными встречается лишь в ограниченном числе работ.

Экспериментальное исследование распространения пламени по пластинам ПММА проводилось при горизонтальной ориентации образцов [[16–22], а также при вертикальной ориентации [9, 10, 15, 23–26]. В этих исследованиях показана зависимость скорости распространения пламени от толщины образцов, их геометрических размеров, скорости набегающего потока и процентного содержания кислорода в окружающей атмосфере. Большинство исследователей сходятся во мнении, что по мере распространения пламени происходит смена доминирующего механизма теплообмена. На ранних стадиях пожара это происходит главным образом за счет кондуктивного теплового потока из пламени в поверхность полимера, а по мере увеличения размера пламени основную роль начинает играть передача тепла за счет теплового излучения. В то время как на ранних стадиях пожара доминирующим процессом теплопереноса является теплопроводность через твердую поверхность полимера, по мере увеличения размера пламени все большее значение приобретает тепловое излучение.

Тем не менее современные исследования и модели горения полимеров недостаточно учитывают химический аспект процесса горения, поскольку на данный момент химическая структура пламени, распространяющегося по поверхности полимерных материалов, практически не исследована. Таким образом, эта информация будет очень полезна для разработки детальной модели распространения пламени по поверхности полимеров с учетом кинетики

пиролиза топлива, а также реакций окисления продуктов пиролиза в газовой фазе.

Целью настоящей работы является исследование тепловой и химической структуры пламени при его распространении по поверхности пластин ПММА, а также разработка численных моделей этого процесса на основе этих данных.

1. Методика эксперимента

В работе проводилось исследование горения литых пластин ПММА (производитель — Marga Cipta brand, Индия) шириной 100 мм, толщиной 5 мм и длиной 150 мм. Некоторые физико-химические характеристики исследованного образца таковы: средний молекулярный вес $MW = 13,8 \cdot 10^5$ г/моль, плотность $\rho_s = 1,16$ г/см³, эффективная теплота пиролиза $H_p = (1026 \pm 60)$ Дж/г, теплота газификации $Q_g = (2010 \pm 60)$ Дж/г.

Схема установки показана на рис. 1. Пластины помещались в тонкую металлическую раму (толщиной 0,2 мм), чтобы предотвратить распространение пламени по боковым поверхностям. В случае изучения распространения пламени по горизонтальной поверхности ПММА (см. рис. 1,а) образец располагали на негорючей теплоизоляционной пластине толщиной 10 мм, которая устанавливалась на электронных весах для определения массовой скорости выгорания. Зажигание пластин производилось с торца пламенем пропан-бутановой горелки. Скорость распространения пламени по поверхности полимера определяли по видеозаписи, сделанной в ходе эксперимента. Измерение структуры пламени начинали

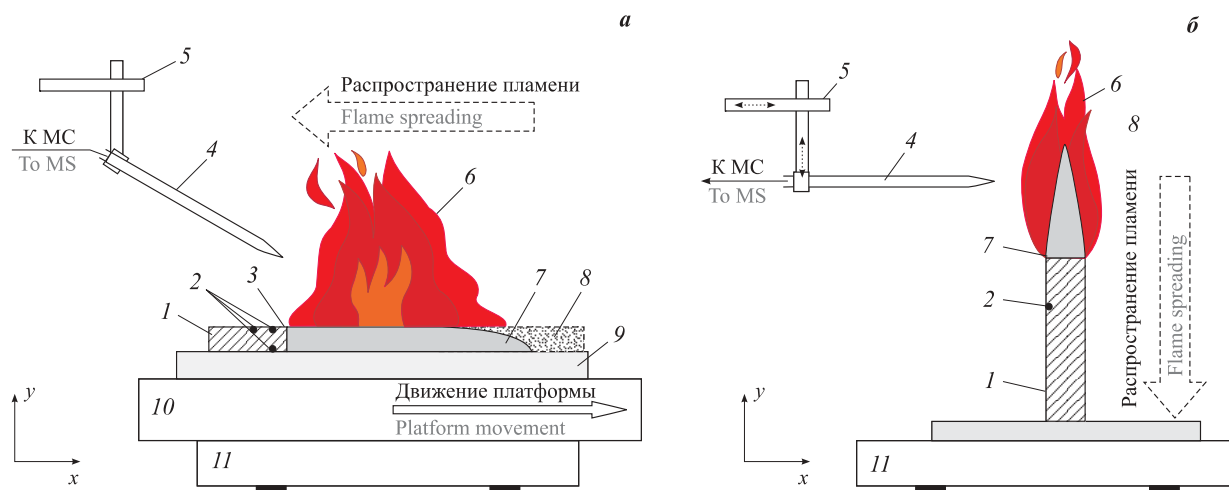


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования горизонтального (а) и вертикального (б) распространения пламени по поверхности полимера и измерения профилей температуры и концентрации веществ: 1 — исходный образец; 2 — термопары в конденсированной фазе; 3 — линия стеклования; 4 — зонд или термопара; 5 — 3D-сканер; 6 — пламя; 7 — зона пиролиза; 8 — зона выгорания; 9 — термоизоляционная подложка; 10 — подвижная платформа; 11 — весы

Fig. 1. Experimental setup for the study of horizontal (a) and vertical (b) flame spread over the polymer surface and for measuring temperature and concentration profiles: 1 — virgin sample; 2 — thermocouples in the condensed phase; 3 — glass transition line; 4 — probe or thermocouple; 5 — 3D-scanner; 6 — flame; 7 — pyrolysis zone; 8 — burnout zone; 9 — thermally insulated plate; 10 — movable platform; 11 — balance

только после того, как скорость распространения пламени стабилизировалась. Гашение образцов производили до того, как пламя достигало конца образца, для определения размера и контура сечения зоны пиролиза. Затухшие образцы разрезали посередине в продольном направлении для определения контура сечения зоны пиролиза. Потушенную поверхность полимера фотографировали и измеряли длину зоны пиролиза L_p (расстояние от фронта пламени до линии полного выгорания образца) и ее площадь. Линию начала зоны пиролиза рассматривали как фронт пламени.

Измерение температуры внутри образца и на поверхности ПММА производилось термопарами, для изготовления которых использовалась проволока диаметром 50 мкм из платины и платины с добавлением 10 % родия (Pt/Pt + 10 % Rh). Термопары устанавливали так, как показано на рис. 1. Каждую из них помещали в канавку глубиной 0,2–0,3 мм, сделанную на поверхности пластины, а затем заливали 50 %-ным раствором ПММА в дихлорэтаноле.

Для измерения температуры в пламени использовалась термопара из Pt/Pt + 10 % Rh, изготовленная из проволоки толщиной 50 мкм и покрытая тонким слоем диоксида кремния SiO_2 толщиной 10 мкм для предотвращения каталитических реакций на поверхности термопары. Плечи термопары имели длину 5,5 мм. Термопару устанавливали на трехкоординатном сканирующем устройстве, с помощью которого осуществлялось ее перемещение в пространстве по заданной программе. Термопара помещалась перед фронтом пламени на высоте 30 мм над поверхностью образца и периодически опускалась со скоростью 2 мм/с до касания поверхности пластины (без риска деформации, что обеспечивалось ее конструкцией). Интервал по оси x между отдельными проходами термопары составлял примерно 1,5 мм. Диапазон движения термопары вниз постепенно увеличивался с шагом 1 мм по мере продвижения фронта пламени. Это требовалось для того, чтобы термопара касалась поверхности горящего полимера, положение которой смещалось в результате выгорания образца. Поправка на радиационные потери тепла термопарой рассчитывалась по формуле Каскана [27]. Величина радиационной поправки для измеренной в эксперименте температуры пламени, равной 1400 °C, составила 160 °C, погрешность измерения температуры — ± 50 °C. Запись показаний всех термопар и электронных весов проводилась с помощью многоканального АЦП (Е14-140-М) и синхронизировалась с видеозаписью, что позволило измерить градиент температуры в газовой фазе вблизи поверхности пластины ПММА. Аналогичная методика использовалась ранее Сингхом и

Голлнером для определения плотности кондуктивного потока тепла для горящих образцов ПММА [22].

Отбор пробы из пламени для измерения его химической структуры осуществлялся с помощью кварцевого конического микрозонда с диаметром отверстия 60 мкм и внутренним углом раствора 20°. Микрозонд устанавливали на аналогичном трехкоординатном устройстве для сканирования в разных областях пламени. Отобранная микрозондом проба поступала в режиме молекулярного натекания в ионный источник масс-спектрометрического комплекса Hiden HPR-60 для последующего анализа. В случае горизонтального расположения пламени проводилась его пространственная стабилизация с целью повысить точность измерения профилей концентраций. Для этого образец ПММА устанавливали на платформу, которая перемещалась в горизонтальном направлении, противоположном направлению распространения пламени, со скоростью, равной скорости его распространения по поверхности горючего. Для всех идентифицированных в пламени веществ (O_2 , N_2 , этилен C_2H_4 , CO_2 , H_2O , пропилен C_3H_6 , CO , метилметакрилат $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) были проведены калибровочные эксперименты и определены калибровочные коэффициенты относительно азота (N_2). Процедура определения мольных долей была описана ранее в работе [28]. Погрешность измерения мольных долей составила 10–15 % для всех соединений, кроме паров воды, для которых она равна 20 %.

2. Математическая модель

2.1. Горизонтальное распространение пламени

Течение многокомпонентного реагирующего газа описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + (\rho_a - \rho) g_i; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_j C \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho W Q - \frac{\partial q_j^r}{\partial x_j}; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + v_i \rho W; \quad (4)$$

$$p = \rho R T, \quad (5)$$

где ρ , ρ_a — плотность соответственно газа и окружающей среды, кг/м³;

u_j , u_i — скорость, м/с;

x_j , x_i — координата вдоль поверхности полимера, м;

μ — динамическая вязкость, кг·с/м²;
 g_i — ускорение свободного падения, м/с²;
 C — теплоемкость, Дж/(кг·К);
 T — температура, К;
 λ — теплопроводность, Вт/(м·К);
 W — скорость реакции, 1/с;
 Q — удельное тепловыделение, Дж/кг;
 q_j^r — плотность радиационного теплового потока, Вт/м²;
 Y_i — массовая концентрация i -го компонента смеси;
 D — коэффициент диффузии, м²/с;
 ν_i — стехиометрический коэффициент;
 p — давление, Па;
 R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

В рассматриваемую здесь двухмерную модель входят составляющие вектора скорости $i = \{x, y\}$, массовые концентрации компонентов смеси $i = \{O, F, P\}$, где O — окислитель, F — горючее, P — продукты реакции горения. Молекулярная вязкость полагается одинаковой для всех компонентов и равной ее температурной зависимости для воздуха. Вклады диффузионного теплопереноса и термодиффузии полагаются малыми и не учитываются [9, 10]. Коэффициент диффузии компонентов газовой смеси определяется через их теплопроводность $(\rho D)_i = \lambda_i / (C_i Le_i)$ (где Le_i — число Льюиса). Эффективные коэффициенты диффузии, теплопроводности и теплоемкости для газовой смеси рассчитываются как $\rho D = \sum X_i (\rho D)_i$, $\lambda = \sum X_i \lambda_i$, $C = \sum Y_i C_i$ (где X_i и Y_i — объемные и массовые концентрации i -го компонента смеси соответственно). Теплопроводность и теплоемкость компонентов газовой смеси определяются по данным [29]. Радиационная составляющая $\partial q_j^r / \partial x_j$ (последнее слагаемое уравнения (3)) рассчитывается по модели сферических аппроксимаций P1 [30], для которой средний коэффициент поглощения смеси определяется как $K_p = \sum_i K_{p,i}(T) X_i$ [31, 32].

Для полимерного горючего рассматривается уравнение сохранения энергии

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_j} + \rho_s W_s Q_s. \quad (6)$$

Процессы окисления газифицированного горючего и пиролиза горючего материала описываются одностадийными макрореакциями:

$$W = k_g Y_F Y_O \exp(-E_g / (R_0 T)); \quad (7)$$

$$W_s = k_s \exp(-E_s / (R_0 T)), \quad (8)$$

где k — предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;
 E — энергия активации константы скорости реакции, Дж/моль;
 R_0 — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Вид граничных условий для схемы расчетной области является общепринятым [9, 10] для сопря-

Таблица 1. Теплофизические и кинетические параметры ПММА

Table 1. Thermophysical and kinetic parameters of PMMA

Параметр Parameter	Значение Value	Источник Reference
ρ_s , кг/м ³ / ρ_s , kg/m ³	1200	[9, 29]
C_s , Дж/(кг·К) / C_s , J/(kg·K)	1466,5	
λ_s , Вт/(м·К) / λ_s , W/(m·K)	0,19	
Q_s , Дж/кг / Q_s , J/kg	$-1 \cdot 10^6$	
Q_g , Дж/кг / Q_g , J/kg	$2,5 \cdot 10^7$	
k_s , с ⁻¹ / k_s , sec ⁻¹	$2,82 \cdot 10^9$	
E_s , Дж/моль / E_s , J/mole	129890	
k_g , с ⁻¹ / k_g , sec ⁻¹	$1 \cdot 10^{10}$	Подбирался
E_g , Дж/моль / E_g , J/mole	90000	[9, 29]
ν_F	1,0	
ν_O	1,9	

женной модели тепломассопереноса в реагирующей гетерогенной системе.

Интегрирование уравнений осуществляется методом конечных объемов с использованием алгоритма SIMPLE [33] для расчета поля течения в естественных переменных.

Исследуется распространение пламени по поверхности ПММА. Свойства исследуемого материала сведены в табл. 1.

2.2. Распространение пламени сверху вниз

Программный пакет Fire Dynamics Simulator (FDS) использовался для моделирования распространения пламени сверху вниз по вертикально ориентированному образцу. В данной реализации акцент делается на перенос дыма и тепла при распространении пламени. Моделирование течения газа проводилось с помощью метода крупных вихрей (LES). Для газовой фазы решались уравнения сохранения массы, импульсов, веществ и сохранения энергии [34], для твердой — уравнения сохранения энергии. Натяжение, вызванное потоком (гравитационные эффекты), было включено в уравнения сохранения импульса. Однако конвективный перенос газа не рассматривался. Модель пиролиза представлена как одностадийный процесс (эквивалентный сублимации). В данную методологию FDS включен процесс газификации/сублимации с использованием подхода, применяемого для испарения жидкого топлива, в котором заложены скрытая теплота испарения и точка кипения. В данном случае была задана температура пиролиза (250 °С) и его энтальпия (1620 кДж/кг [35]). Удельная теплоемкость равна 2,1 кДж/(кг·К), коэффициент теплопроводности — 0,26 Вт/(м·К) [35]. Коэффициент излучения составил 0,85, коэффициент абсорбции — 2700 м⁻¹ [34]. Исходя из этого,

рассчитывалась мольная доля паров топлива на поверхности горючего. Для оценки массовой скорости газификации использовалось уравнение диффузии Стефана, в которое входит коэффициент массопереноса, являющийся функцией чисел Шервуда и Рейнольдса [34].

Вычислительная область (домен), будучи симметричной относительно толщины, включает только половину образца. Левая часть границы симметричная. Производная первого порядка всех переменных (кроме компоненты скорости по оси x) устанавливается равной нулю, а скорость составляющей по оси x равна нулю. Верхняя и правая границы являются открытыми границами, через которые продукты сгорания могут покидать домен или в него может попадать атмосферный воздух. Нижняя часть домена представляет собой инертную стенку, которая определяется как адиабатическая для температуры, нулевой диффузионный поток для соединений и отсутствие скачка скоростей. Моделирование проводилось для двух толщин — 1,6 и 5,0 мм. Длина образца составляла 150 мм, ширина — 100 мм.

Для данного расчетного домена использовалась многоблочная структурированная сетка. Для распространения пламени вниз по пластине ПММА ее верхняя часть на высоте 60 мм была снабжена тонкой сеткой, а нижняя — грубой сеткой. Для исследования устойчивого распространения пламени в этой задаче данный подход представляется экономичным. Для зажигания использовались нагревательные поверхности, настроенные на диапазон температур от 1000 до 1200 °C, чтобы обеспечить зажигание образца. Как только образец загорался, что регистрировалось по температурным контурам, горячие пластины удалялись из домена.

3. Результаты

3.1. Эксперимент

В табл. 2 представлены результаты измерения скорости распространения пламени u_f , скорости потери массы $U_{\text{мас}}$, длины зоны пиролиза L и средней скорости пиролиза массы $\dot{m}$, определенных для исследуемых пластин ПММА. Средняя скорость пиролиза массы рассчитывалась как скорость потери массы, деленная на площадь зоны пиролиза. Разброс значений скорости распространения пламени u_f составил 10 %.

На рис. 2 приведено пространственное распределение температуры в газовой фазе для обоих случаев, а также контуры поперечного сечения погашенных образцов, демонстрирующие зависимость толщины несгоревшей части образца от расстояния до фронта пламени. Положение передней кромки пламени в газовой фазе примерно совпадает с фронтом пламени в конденсированной фазе, т. е. в полимере. Из пространственных распределений температуры, показанных на рис. 2, видно, что флуктуации

Таблица 2. Скорость распространения пламени, скорость потери массы, длина зоны пиролиза и средняя скорость пиролиза, измеренные для образцов ПММА

Table 2. The flame propagation rate, the mass loss rate, the pyrolysis zone length and the average rate of pyrolysis measured for PMMA samples

Ориентация образца Specimen orientation	u_f , мм/с u_f , mm/sec	$U_{\text{мас}}$, г/с $U_{\text{мас}}$, g/sec	L , см L , cm	$\dot{m}$, г/(с·см ²) $\dot{m}$, g/(sec·cm ²)
Горизонтальная Horizontally	0,090	0,045	5,2	10^{-3}
Вертикальная Vertically	0,066	0,037	0,8	$2,3 \cdot 10^{-3}$

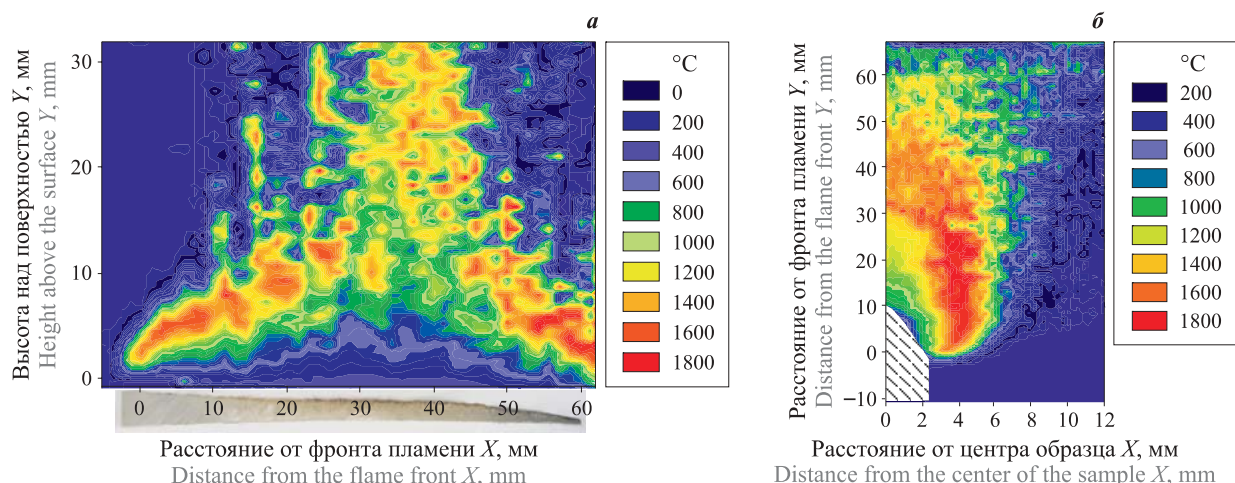


Рис. 2. Пространственное распределение температуры в пламени горящих образцов литого ПММА, ориентированного горизонтально (а) и вертикально (б): в нижней части — контур поперечного сечения погашенного образца

Fig. 2. Spatial distribution of the temperature in the flame of burning cast PMMA samples oriented horizontally (a) and vertically (b): the bottom of the figures shows the cross-section contour of the extinguished sample

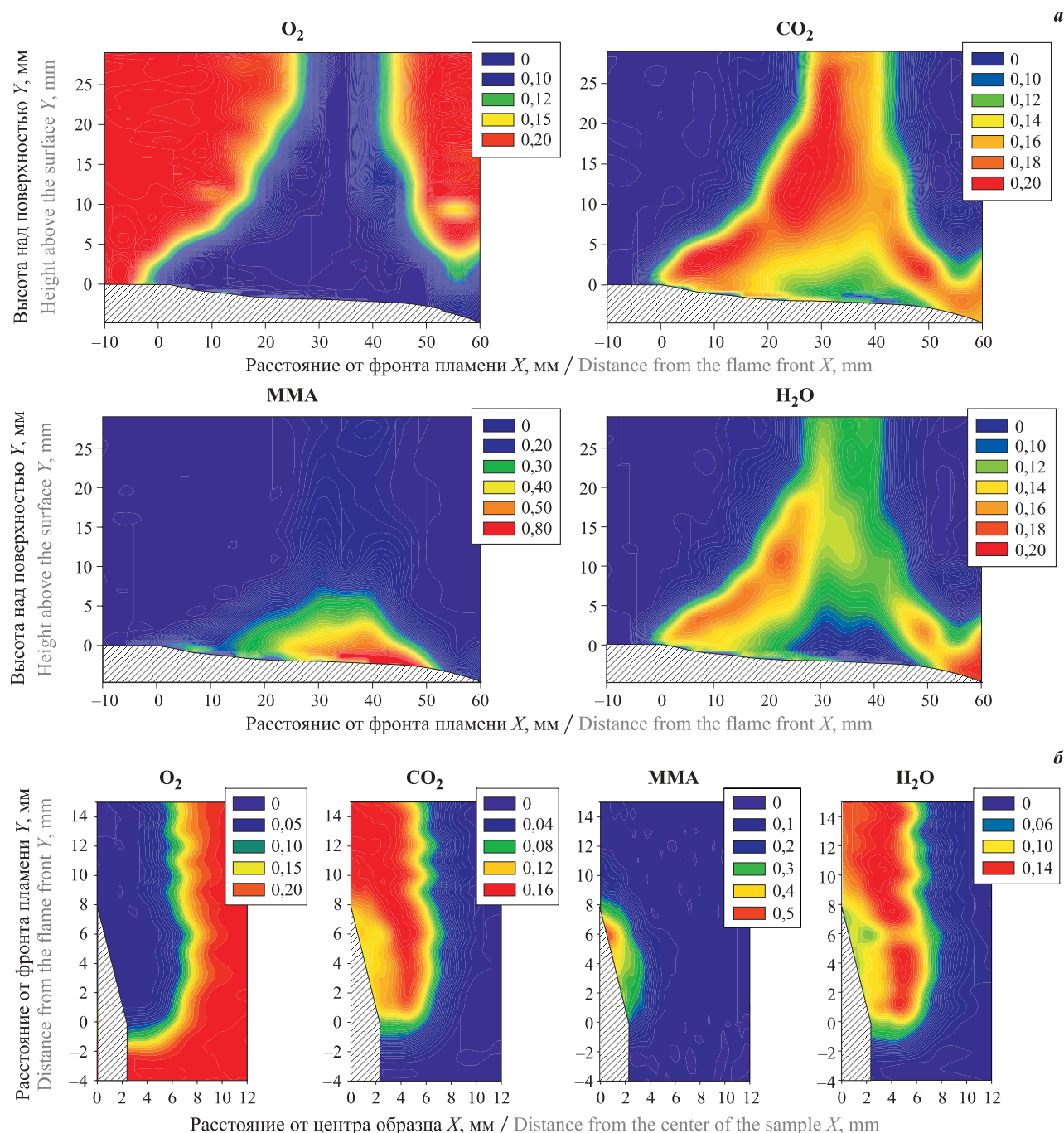


Рис. 3. Двумерное распределение концентраций основных веществ в пламени литого образца ПММА, ориентированного горизонтально (а) и вертикально (б)

Fig. 3. The two-dimensional distribution of the main species concentrations in the flame of cast PMMA sample oriented horizontally (a) and vertically (b)

температуры пламени усиливаются по мере увеличения высоты над поверхностью топлива. Это объясняется усилением турбулентности потока газа вследствие конвекции горячих продуктов горения вверх.

На рис. 3 приведено пространственное распределение концентраций компонентов пламени, измеренных при горении пластины литого ПММА. В пламени было идентифицировано семь соединений: ММА, O₂, CO₂, H₂O, CO, N₂, C₂H₄ (этилен), C₃H₆ (пропилен),

последние четыре из которых на графиках не приведены.

Измеренные профили температуры вблизи поверхности горения (рис. 4) были использованы для расчета градиента температуры dT/dy (где y — координата по нормали к поверхности полимера) и для оценки плотности кондуктивного теплового потока $Q_{\text{кон}}$ в полимер из пламени при его распространении по горизонтально ориентированному образцу. Используя измеренные профили температуры в

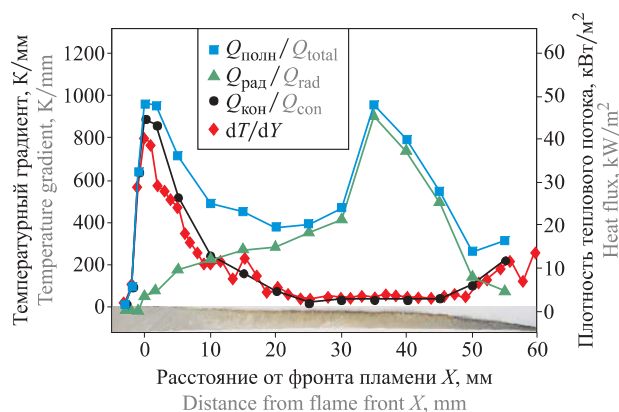


Рис. 4. Зависимость градиента температуры, плотности кондуктивного, радиационного и суммарного тепловых потоков на поверхность горения литого образца ПММА шириной 100 мм от расстояния до фронта пламени

Fig. 4. Dependence of temperature gradient, density of conductive, radiative and total heat fluxes to the burning surface of 100 mm wide cast PMMA sample on the distance to the flame front

газовой фазе и концентраций CO_2 , H_2O и ММА, рассчитывали плотность радиационного теплового потока от пламени к поверхности горючего с помощью оптически тонкой модели [36]. На рис. 4 также представлено распределение расчетной плотности кондуктивного ($Q_{\text{кон}}$), радиационного ($Q_{\text{рад}}$) и полного ($Q_{\text{полн}}$) тепловых потоков от пламени на поверхность литого образца ПММА вдоль горизонтальной поверхности горения. Можно отметить, что в отличие от кондуктивного теплового потока плотность радиационного теплового потока имеет низкое значение у передней кромки пламени и существенно возрастает с выгоранием образца и ростом размера зоны пламени.

3.2. Моделирование

Горизонтальное распространение пламени

На рис. 5 показаны профили температур по координате, нормальной к поверхности горения, при различных расстояниях от фронта пламени. Расчеты показали хорошее совпадение максимальной расчетной температуры с экспериментальной. Как можно видеть на рис. 5, на расстоянии 6,8 мм и менее от фронта пламени согласие градиентов температур и ширин зон удовлетворительное. Начиная с расстояния $X = 8,5$ мм от фронта пламени, экспериментальные данные показывают возникновение сильных флуктуаций на большой высоте (начиная с $Y = 15$ мм) от поверхности. Эти флуктуации хорошо видны и на рис. 2 (распределение температур). Здесь следует отметить, что рассматриваемая математическая модель представлена уравнениями для ламинарного режима распространения пламени, справедливость которых не может быть адекватно распространена

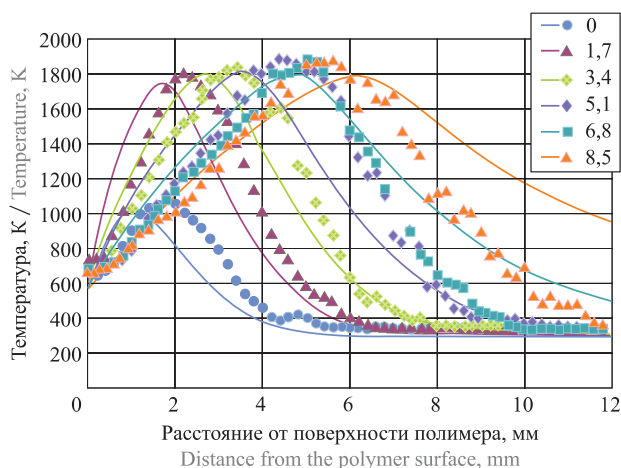


Рис. 5. Распределение температуры по нормали к поверхности в различных сечениях вдоль поверхности: точки — эксперимент, кривые — расчет; значения в легенде — расстояние от фронта пламени, мм; 0 — фронт пламени

Fig. 5. Temperature distribution along the normal to the surface in various cross-sections along the surface: dots is an experiment, curves is calculation; values in the legend are the distance from the flame front, mm; 0 is the flame front

на расчет характеристик в крупномасштабном факеле горизонтально распространяющегося пламени. Расчетное значение массовой скорости пиролиза составило 0,038 г/с, что близко к измеренному — 0,045 г/с.

На рис. 6 представлены теоретическое и экспериментальное распределения концентраций компонентов во фронте пламени ПММА (см. рис. 6,а) и на расстоянии 5 мм от фронта (см. рис. 6,б). Результаты моделирования по сопряженной модели отражают хорошее согласие для окислителя и горючего; расчетная концентрация продуктов горения показывает заниженное значение.

Вертикальное распространение пламени (сверху вниз)

На рис. 7 представлены расчетные и измеренные профили температуры вдоль оси y на разных расстояниях от центра образца толщиной 1,6 мм. Как видно из рис. 7, результаты эксперимента и моделирования хорошо совпадают как по положению максимума, так и по значению градиента. Расчетное значение скорости выгорания составляет 0,03 г/с (экспериментальное — 0,037 г/с), а скорости распространения пламени — 0,08 мм/с (экспериментальное — 0,066 мм/с).

В гетерогенном диффузионном пламени распределение расхода кислорода является очень важным. На рис. 8 представлены экспериментальные и расчетные профили мольных долей O_2 на разной высоте от фронта пламени при его распространении сверху вниз по поверхности ПММА толщиной 5 мм. Следует отметить хорошее согласие между моделью и экспериментом. Положение полного расхода и

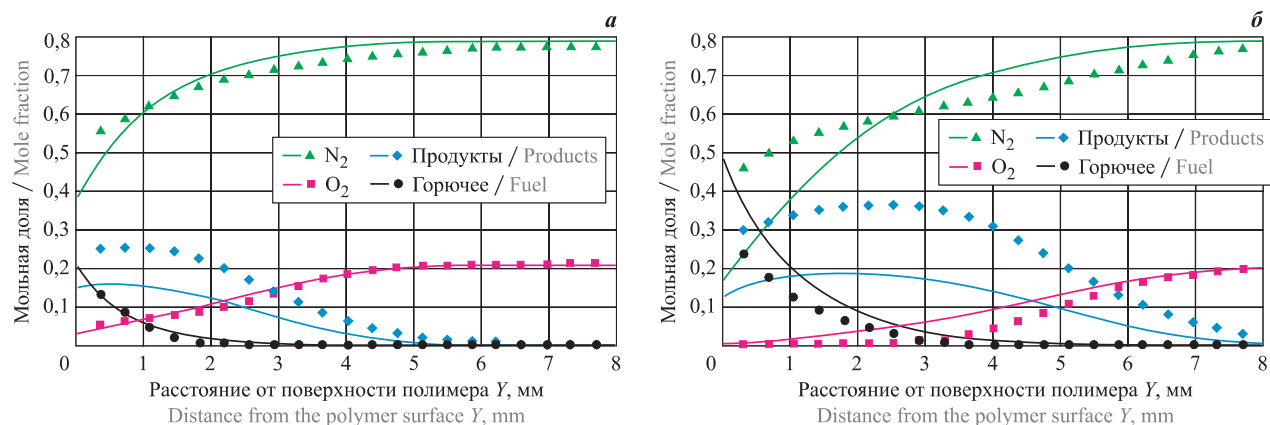


Рис. 6. Распределение концентраций по нормали к поверхности горения во фронте пламени (а) и на расстоянии 5 мм от него (б): точки — эксперимент, кривые — расчет; продукты горения — $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; горючее — $\text{MMA} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_6$

Fig. 6. Concentration distribution along the surface normal in various cross-sections along the surface at the flame front (a) and at a distance of 5 mm from the flame front (b): dots is an experiment, curves is calculation; products are $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; fuel is $\text{MMA} + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_3\text{H}_6$

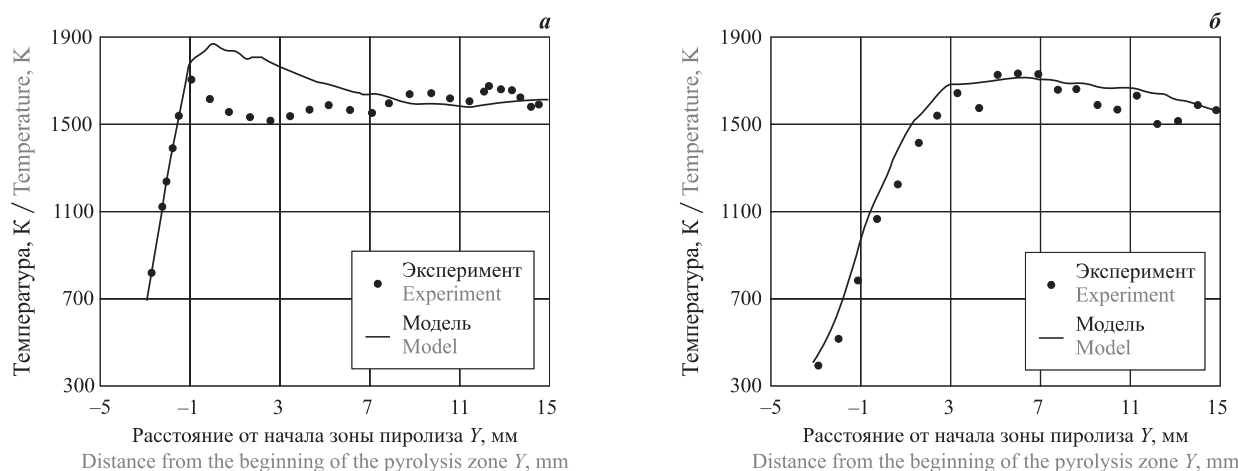


Рис. 7. Расчетные и измеренные профили температуры вдоль оси y на расстоянии X от центра образца 2 мм (а) и 4 мм (б) при распространении пламени сверху вниз; $X = 0$ мм соответствует центру образца толщиной 1,6 мм, $Y = 0$ мм — началу зоны пиролиза

Fig. 7. The calculated and measured temperature profiles along the y axis at distance X from the center of the sample 2 mm (a) and 4 mm (b) during the flame spread from top to bottom, where $X = 0$ mm corresponds to the center of the sample with a thickness of 1.6 mm, $Y = 0$ mm corresponds to the beginning of the pyrolysis zone

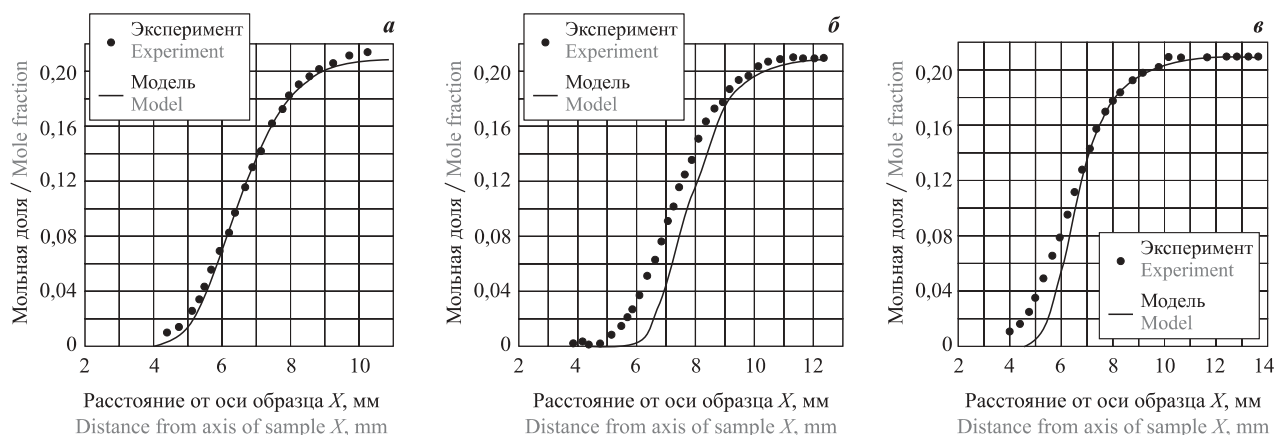


Рис. 8. Горизонтальные профили мольной доли кислорода на высоте от фронта пламени Y 2 мм (а), 6 мм (б) и 10 мм (в) при распространении пламени сверху вниз: $X = 0$ мм соответствует центру образца ПММА толщиной 5 мм

Fig. 8. Horizontal mole fraction profiles of oxygen at height from the flame front Y are 2 mm (a), 6 mm (b), and 10 mm (v) during the downward flame spread, where $X = 0$ mm corresponds to the center of the PMMA sample with a thickness of 5 mm

восстановления кислорода остается примерно одним и тем же.

Заключение

Проведено экспериментальное и численное исследование распространения пламени по поверхности горизонтально и вертикально ориентированных пластин ПММА. Были измерены следующие характеристики горения: массовая скорость выгорания, скорость распространения пламени по поверхности и длина зоны пиролиза. Определено пространственное распределение температуры в пламени. Впервые получено пространственное распределение мольной доли продуктов пиролиза ПММА и их

дальнейшего окисления. Полученные данные были использованы для расчета плотности кондуктивного и радиационного тепловых потоков от пламени к твердому топливу в зависимости от расстояния до фронта пламени. Установлено, что в отличие от кондуктивного теплового потока плотность радиационного теплового потока минимальна во фронте пламени и увеличивается по мере выгорания образца. Оценки полученных тепловых потоков показали, что уравнение теплового баланса с учетом ошибок измерения хорошо выполняется. Проведено численное моделирование распространения пламени по вертикальной и горизонтальной поверхностям ПММА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. — М.: Наука, 1981. — 280 с.
2. Khalturinskii N. A., Popova T. V., Berlin A. A. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents // Russian Chemical Reviews. — 1984. — Vol. 53, Issue 2. — P. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Берлин Ал. Ал. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Сороковский образовательный журнал. — 1996. — Т. 2, № 9. — С. 57–63.
4. Antonov A. V., Reshetnikov I. S., Khalturinskij N. A. Combustion of char-forming polymeric systems // Russian Chemical Reviews. — 1999. — Vol. 68, Issue 7. — P. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.
5. Khalturinskii N. A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism // Russian Journal of Physical Chemistry B. — 2008. — Vol. 2, Issue 3. — P. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. Константинова Н. И., Смирнов Н. В., Шебеко А. Ю. К вопросу об оценке эффективности огнезащиты полимерных материалов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 7-8. — С. 32–42. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
7. Барботько С. Л., Вольный О. С., Вешкин Е. А., Гончаров В. А. Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // Авиационная промышленность. — 2018. — № 2. — С. 63–67.
8. Frey A. E., T'ien J. S. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics // Combustion and Flame. — 1979. — Vol. 36. — P. 263–289. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90064-6.
9. Wu K. K., Fan W. F., Chen C. H., Liou T. M., Pan I. J. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 132, Issue 4. — P. 697–707. DOI: 10.1016/s0010-2180(02)00520-5.
10. Bhattacharjee S., King M. D., Paolini C. Structure of downward spreading flames: a comparison of numerical simulation, experimental results and a simplified parabolic theory // Combustion Theory and Modelling. — 2004. — Vol. 8, Issue 1. — P. 23–39. DOI: 10.1088/1364-7830/8/1/002.
11. Mao C.-P., Kodama H., Fernandez-Pello A. C. Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface // Combustion and Flame. — 1984. — Vol. 57, Issue 2. — P. 209–236. DOI: 10.1016/0010-2180(84)90058-0.
12. Chen C.-H. A numerical study of flame spread and blowoff over a thermally-thin solid fuel in an opposed air flow // Combustion Science and Technology. — 1990. — Vol. 69, Issue 4-6. — P. 63–83. DOI: 10.1080/00102209008951603.
13. Kumar A., Shih H. Y., T'ien J. S. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 132, Issue 4. — P. 667–677. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00516-3.
14. Blasi C. D. Modeling and simulation of combustion processes for charring and non-charring solid fuels // Progress in Energy and Combustion Science. — 1993. — Vol. 19, Issue 1. — P. 71–104. DOI: 10.1016/0360-1285(93)90022-7.
15. Gong J., Zhou X., Li J., Yang L. Effect of finite dimension on downward flame spread over PMMA slabs: Experimental and theoretical study // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 91. — P. 225–234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.091.

16. *Fernandez-Pello A. C., Williams F. A.* Laminar flame spread over PMMA surfaces // Symposium (International) on Combustion. — 1975. — Vol. 15, Issue 1. — P. 217–231. DOI: 10.1016/s0082-0784(75)80299-2.
17. *Ray S. R., Fernandez-Pello A. C., Glassman I.* A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation // Journal of Heat Transfer. — 1980. — Vol. 102, No. 2. — P. 357–363. DOI: 10.1115/1.3244288.
18. *Ito A., Kashiwagi T.* Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects // Combustion and Flame. — 1988. — Vol. 71, Issue 2. — P. 189–204. DOI: 10.1016/0010-2180(88)90007-7.
19. *Fernandez-Pello A. C., Ray S. R., Glassman I.* Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration // Symposium (International) on Combustion. — 1981. — Vol. 18, Issue 1. — P. 579–589. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80063-x.
20. *Jiang L., Miller C. H., Gollner M. J., Sun J.-H.* Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface // Proceedings of the Combustion Institute. — 2017. — Vol. 36, Issue 2. — P. 2987–2994. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.157.
21. *Singh A. V., Gollner M. J.* Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames // Proceedings of the Combustion Institute. — 2015. — Vol. 35, Issue 3. — P. 2527–2534. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.040.
22. *Singh A. V., Gollner M. J.* A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames // Combustion and Flame. — 2015. — Vol. 162, Issue 5. — P. 2214–2230. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.01.019.
23. *Gong J., Zhou X., Deng Z., Yang L.* Influences of low atmospheric pressure on downward flame spread over thick PMMA slabs at different altitudes // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2013. — Vol. 61. — P. 191–200. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.066.
24. *Ayani M. B., Esfahani J. A., Mehrabian R.* Downward flame spread over PMMA sheets in quiescent air: Experimental and theoretical studies // Fire Safety Journal. — 2006. — Vol. 41, Issue 2. — P. 164–169. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.12.003.
25. *Ito A., Kashiwagi T.* Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry // Symposium (International) on Combustion. — 1987. — Vol. 21, Issue 1. — P. 65–74. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80232-7.
26. *Bhattacharjee S., King M. D., Takahashi S., Nagumo T., Wakai K.* Downward flame spread over poly(methyl) methacrylate // Proceedings of the Combustion Institute. — 2000. — Vol. 28, Issue 2. — P. 2891–2897. DOI: 10.1016/s0082-0784(00)80713-4.
27. *Kaskan W. E.* The dependence of flame temperature on mass burning velocity // Symposium (International) on Combustion. — 1957. — Vol. 6, Issue 1. — P. 134–143. DOI: 10.1016/s0082-0784(57)80021-6.
28. *Korobeinichev O. P., Kuibida L. V., Paletsky A. A., Shmakov A. G.* Molecular-beam mass-spectrometry to ammonium dinitramide combustion chemistry studies // Journal of Propulsion and Power. — 1998. — Vol. 14, Issue 6. — P. 991–1000. DOI: 10.2514/2.5364.
29. *McBride B. J., Gordon S., Reno M. A.* Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species // NASA Technical Memorandum 4513. — Washington : National Aeronautics and Space Administration, 1993. — 96 p.
30. *Modest M. F.* Radiative heat transfer. — London, New York : Academic Press, Elsevier Science, 2003. — 842 p.
31. *Zhang H., Modest M. F.* Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. — 2002. — Vol. 73, Issue 6. — P. 649–653. DOI: 10.1016/s0022-4073(01)00178-9.
32. *Park S. H., Stretton A. J., Tien C. L.* Infrared radiation properties of methyl methacrylate vapor // Combustion Science and Technology. — 1988. — Vol. 62, Issue 4-6. — P. 257–271. DOI: 10.1080/00102208808924012.
33. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. — М. : Энергоатомиздат. — 1984. — 152 с.
34. *McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.* Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. — 6th ed. — Gaithersburg, Maryland : National Institute of Standards and Technology; Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. — 149 p.
35. *Ananth R., Ndubizu C. C., Tatem P. A.* Burning rate distributions boundary layer flow combustion of a PMMA plate in forced flow // Combustion and Flame. — 2003. — Vol. 135, Issue 1-2. — P. 35–55. DOI: 10.1016/s0010-2180(03)00143-3.

36. Yoshinaga K., Kobayashi H. Numerical study of radiation effects on polypropylene combustion using high-temperature oxidizer diluted with H_2O and CO_2 // *Journal of Thermal Science and Technology*. — 2008. — Vol. 3, Issue 2. — P. 167–178. DOI: 10.1299/jtst.3.167.

REFERENCES

1. R. M. Aseeva, G. E. Zaikov. *Goreniye polimernykh materialov* [Burning of polymeric materials]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 280 p. (in Russian).
2. N. A. Khalturinskii, T. V. Popova, A. A. Berlin. The combustion of polymers and the mechanism of action of fire-proofing agents. *Russian Chemical Reviews*, 1984, vol. 53, issue 2, pp. 197–209. DOI: 10.1070/rc1984v053n02abeh003041.
3. Al. Al. Berlin. Combustion of polymers and polymer materials of reduced combustibility. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal / Soros Educational Journal*, 1996, vol. 2, no. 9, pp. 57–63 (in Russian).
4. A. V. Antonov, I. S. Reshetnikov, N. A. Khalturinskij. Combustion of char-forming polymeric systems. *Russian Chemical Reviews*, 1999, vol. 68, issue 7, pp. 605–614. DOI: 10.1070/rc1999v068n07abeh000408.
5. N. A. Khalturinskii, T. A. Rudakova. Physical aspects of polymer combustion and the inhibition mechanism. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 2, issue 3, pp. 480–490. DOI: 10.1134/s1990793108030238.
6. N. I. Konstantinova, N. V. Smirnov, A. Yu. Shebeko. Revisiting the assessment of polymeric materials fire protection efficiency. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 7-8, pp. 32–42 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.07-08.32-42.
7. S. L. Barbot'ko, O. S. Vol'niy, E. A. Veshkin, V. A. Goncharov. Evaluation of fire-resistance of materials and structural components for aircraft equipment. *Aviatsionnaya promyshlennost / Aviation Industry*, 2018, no. 2, pp. 63–67 (in Russian).
8. A. E. Frey, J. S. T'ien. A theory of flame spread over a solid fuel including finite-rate chemical kinetics. *Combustion and Flame*, 1979, vol. 36, pp. 263–289. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90064-6.
9. K. K. Wu, W. F. Fan, C. H. Chen, T. M. Liou, I. J. Pan. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 132, issue 4, pp. 697–707. DOI: 10.1016/s0010-2180(02)00520-5.
10. S. Bhattacharjee, M. D. King, C. Paolini. Structure of downward spreading flames: a comparison of numerical simulation, experimental results and a simplified parabolic theory. *Combustion Theory and Modeling*, 2004, vol. 8, issue 1, pp. 23–39. DOI: 10.1088/1364-7830/8/1/002.
11. C.-P. Mao, H. Kodama, A. C. Fernandez-Pello. Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface. *Combustion and Flame*, 1984, vol. 57, issue 2, pp. 209–236. DOI: 10.1016/0010-2180(84)90058-0.
12. C.-H. Chen. A numerical study of flame spread and blowoff over a thermally-thin solid fuel in an opposed air flow. *Combustion Science and Technology*, 1990, vol. 69, issue 4-6, pp. 63–83. DOI: 10.1080/00102209008951603.
13. A. Kumar, H. Y. Shih, J. S. T'ien. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 132, issue 4, pp. 667–677. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00516-3.
14. C. D. Blasi. Modeling and simulation of combustion processes for charring and non-charring solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, vol. 19, issue 1, pp. 71–104. DOI: 10.1016/0360-1285(93)90022-7.
15. J. Gong, X. Zhou, J. Li, L. Yang. Effect of finite dimension on downward flame spread over PMMA slabs: Experimental and theoretical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 91, pp. 225–234. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.091.
16. A. C. Fernandez-Pello, F. A. Williams. Laminar flame spread over PMMA surfaces. *Symposium (International) on Combustion*, 1975, vol. 15, issue 1, pp. 217–231. DOI: 10.1016/s0082-0784(75)80299-2.
17. S. R. Ray, A. C. Fernandez-Pello, I. Glassman. A study of the heat transfer mechanisms in horizontal flame propagation. *Journal of Heat Transfer*, 1980, vol. 102, no. 2, pp. 357–363. DOI: 10.1115/1.3244288.
18. A. Ito, T. Kashiwagi. Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects. *Combustion and Flame*, 1988, vol. 71, issue 2, pp. 189–204. DOI: 10.1016/0010-2180(88)90007-7.
19. A. C. Fernandez-Pello, S. R. Ray, I. Glassman. Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration. *Symposium (International) on Combustion*, 1981, vol. 18, issue 1, pp. 579–589. DOI: 10.1016/s0082-0784(81)80063-x.

20. L. Jiang, C. H. Miller, M. J. Gollner, J.-H. Sun. Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, issue 2, pp. 2987–2994. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.157.
21. A. V. Singh, M. J. Gollner. Estimation of local mass burning rates for steady laminar boundary layer diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, vol. 35, issue 3, pp. 2527–2534. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.040.
22. A. V. Singh, M. J. Gollner. A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2015, vol. 162, issue 5, pp. 2214–2230. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.01.019.
23. J. Gong, X. Zhou, Z. Deng, L. Yang. Influences of low atmospheric pressure on downward flame spread over thick PMMA slabs at different altitudes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 61, pp. 191–200. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.066.
24. M. B. Ayani, J. A. Esfahani, R. Mehrabian. Downward flame spread over PMMA sheets in quiescent air: Experimental and theoretical studies. *Fire Safety Journal*, 2006, vol. 41, issue 2, pp. 164–169. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.12.003.
25. A. Ito, T. Kashiwagi. Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry. *Symposium (International) on Combustion*, 1987, vol. 21, issue 1, pp. 65–74. DOI: 10.1016/s0082-0784(88)80232-7.
26. S. Bhattacharjee, M. D. King, S. Takahashi, T. Nagumo, K. Wakai. Downward flame spread over poly-(methyl)methacrylate. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, vol. 28, issue 2, pp. 2891–2897. DOI: 10.1016/s0082-0784(00)80713-4.
27. W. E. Kaskan. The dependence of flame temperature on mass burning velocity. *Symposium (International) on Combustion*, 1957, vol. 6, issue 1, pp. 134–143. DOI: 10.1016/s0082-0784(57)80021-6.
28. O. P. Korobeinichev, L. V. Kuibida, A. A. Paletsky, A. G. Shmakov. Molecular-beam mass-spectrometry to ammonium dinitramide combustion chemistry. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, vol. 14, issue 6, pp. 991–1000. DOI: 10.2514/2.5364.
29. B. J. McBride, S. Gordon, M. A. Reno. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. *NASA Technical Memorandum 4513*. Washington, National Aeronautics and Space Administration, 1993. 96 p.
30. M. F. Modest. *Radiative heat transfer*. London, New York, Academic Press, Elsevier Science, 2003. 842 p.
31. H. Zhang, M. F. Modest. Evaluation of the Planck-mean absorption coefficients from HITRAN and HITEMP databases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2002, vol. 73, issue 6, pp. 649–653. DOI: 10.1016/s0022-4073(01)00178-9.
32. S. H. Park, A. J. Stretton, C. L. Tien. Infrared radiation properties of methyl methacrylate vapor. *Combustion Science and Technology*, 1988, vol. 62, issue 4–6, pp. 257–271. DOI: 10.1080/00102208808924012.
33. S. V. Patankar. *Numerical heat transfer and fluid flow*. McGraw-Hill, Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p. (Russ. ed.: S. Patankar. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 152 p.).
34. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt. *Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model*. 6th ed. Gaithersburg, Maryland, National Institute of Standards and Technology, and Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. 149 p.
35. R. Ananth, C. C. Ndubizu, P. A. Tatem. Burning rate distributions boundary layer flow combustion of a PMMA plate in forced flow. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 135, issue 1–2, pp. 35–55. DOI: 10.1016/s0010-2180(03)00143-3.
36. K. Yoshinaga, H. Kobayashi. Numerical study of radiation effects on polypropylene combustion using high-temperature oxidizer diluted with H₂O and CO₂. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2008, vol. 3, issue 2, pp. 167–178. DOI: 10.1299/jtst.3.167.

Поступила 29.05.2019; после доработки 22.06.2019; принята к публикации 26.06.2019
Received 29 May 2019; received in revised form 22 June 2019; accepted 26 June 2019

Информация об авторах

КОРОБЕЙНИЧЕВ Олег Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9122-4293; Researcher ID (WoS): G-2356-2016; Author ID (Scopus): 7005822429; e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

Information about the authors

Oleg P. KOROBEINICHEV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9122-4293; Researcher ID (WoS): G-2356-2016; Author ID (Scopus): 7005822429; e-mail: korobein@kinetics.nsc.ru

ГЕРАСИМОВ Илья Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7096-9787; Researcher ID (WoS): T-3223-2019; Author ID (Scopus): 36970477900

ГОНЧИКЖАПОВ Мунко Баторович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-7773-047X; Researcher ID (WoS): B-1185-2014; Author ID (Scopus): 55512248600

ТЕРЕЩЕНКО Александр Георгиевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9761-5444; Researcher ID (WoS): T-3237-2019; Author ID (Scopus): 7006510382

ГЛАЗНЕВ Роман Кириллович, студент, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-0549-3222; Researcher ID (WoS): T-3227-2019; Author ID (Scopus): 57204631256

ТРУБАЧЕВ Станислав Альбертович, аспирант, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-7923-8318; Researcher ID (WoS): T-3224-2019; Author ID (Scopus): 57198490232

ШМАКОВ Андрей Геннадьевич, канд. хим. наук, заведующий лабораторией, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6810-7638; Researcher ID (WoS): A-9996-2014; Author ID (Scopus): 7006640724

ПАЛЕЦКИЙ Александр Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-2715-8484; Researcher ID (WoS): B-1171-2014; Author ID (Scopus): 6602774865

КАРПОВ Александр Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8380-1599; Researcher ID (WoS): K-4565-2012; Author ID (Scopus): 57197866252

ШАКЛЕИН Артем Андреевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3603-4443; Researcher ID (WoS): D-4858-2019; Author ID (Scopus): 57204349538

КУМАР Амита, PhD, профессор кафедры аэрокосмических исследований, Индийский институт технологии Мадрас, г. Ченнай, Индия; ORCID: 0000-0003-3654-6008; Researcher ID (WoS): D-4250-2014; Author ID (Scopus): 36111220300

РАГХАВАН Васудеван, PhD, профессор кафедры аэрокосмических исследований, Индийский институт технологии Мадрас, г. Ченнай, Индия; ORCID: 0000-0002-6480-613X; Researcher ID (WoS): C-7443-2009; Author ID (Scopus): 13608408600

Илья Е. GERASIMOV, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7096-978; Researcher ID (WoS): T-3223-2019; Author ID (Scopus): 36970477900

Munko B. GONCHIKZHAPOV, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7773-047X; Researcher ID (WoS): B-1185-2014; Author ID (Scopus): 55512248600

Aleksander G. TERESHCHENKO, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9761-5444; Researcher ID (WoS): T-3237-2019; Author ID (Scopus): 7006510382

Roman K. GLAZNEV, Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0549-3222; Researcher ID (WoS): T-3227-2019; Author ID (Scopus): 57204631256

Stanislav A. TRUBACHEV, Post Graduate Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7923-8318; Researcher ID (WoS): T-3224-2019; Author ID (Scopus): 57198490232

Andrey G. SHMAKOV, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6810-7638; Researcher ID (WoS): A-9996-2014; Author ID (Scopus): 7006640724

Aleksander A. PALETSKY, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2715-8484; Researcher ID (WoS): B-1171-2014; Author ID (Scopus): 6602774865

Aleksander I. KARPOV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8380-1599; Researcher ID (WoS): K-4565-2012; Author ID (Scopus): 57197866252

Artem A. SHAKLEIN, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3603-4443; Researcher ID (WoS): D-4858-2019; Author ID (Scopus): 57204349538

Amit KUMAR, PhD, Professor of Mechanical and Aerospace Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India; ORCID: 0000-0003-3654-6008; Researcher ID (WoS): D-4250-2014; Author ID (Scopus): 36111220300

Vasudevan RAGHAVAN, PhD, Associated Professor of Mechanical and Aerospace Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India; ORCID: 0000-0002-6480-613X; Researcher ID (WoS): C-7443-2009; Author ID (Scopus): 13608408600