

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-11



Численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности полиметилметакрилата на основе открытого пакета FDS

*Г. Морар, ORCID: 0000-0002-1261-0370 <morar@udman.ru>
А.И. Карпов, ORCID: 0000-0001-8380-1599 <karpov@udman.ru>
А.А. Шаклеин, ORCID: 0000-0002-3603-4443 <shaklein@udman.ru>*

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УроРАН,
426067, Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34.*

Аннотация. Проведено численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности полиметилметакрилата (ПММА). Для проведения расчетов использовалась программа с открытым кодом Fire Dynamics Simulator (FDS), в которой использовался метод LES для моделирования турбулентного пламени. Для визуализации результатов использовалась программа SmokeView, которая является модулем пакета FDS. По результатам исследования определены размеры области вблизи поверхности горения, в которой наблюдается ламинарный режим течения. Предлагается алгоритм для решения сопряженной задачи распространения турбулентного пламени по поверхности горючего материала. Алгоритм сопряженной задачи состоит в совместном расчете ламинарного пламени вблизи поверхности горения и турбулентного режима в остальной области.

Ключевые слова: диффузионное пламя; турбулентное горение; численное моделирование; пакет Fire Dynamics Simulator.

Для цитирования: Морар Г., Карпов А.И., Шаклеин А.А. Численное исследование турбулентного диффузионного пламени на поверхности ПММА на основе открытого пакета FDS. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 2, 2025 г., стр. 153–162. DOI: 10.15514/ISPRAS–2025–37(2)–11.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00148).

Numerical Study of the Turbulent Diffusion Flame on the PMMA Surface using FDS

G. Morar, ORCID: 0000-0002-1261-0370 <morar@udman.ru>

A.I. Karpov, ORCID: 0000-0001-8380-1599 <karpov@udman.ru>

A.A. Shaklein, ORCID: 0000-0002-3603-4443 <shaklein@udman.ru>

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34, Tatyana Baramzina st., Izhevsk, 426067, Russia.*

Abstract. This study investigates the complex processes involved in the propagation of turbulent flames over solid combustible materials. Employing the Large Eddy Simulation (LES) technique within the Fire Dynamics Simulator (FDS), a detailed numerical investigation of flame structure and propagation were conducted. Obtained results reveal significant influences of turbulence on the flame's behavior, including fluctuations in temperature, velocity, and species concentrations. A notable finding of this study is the presence of a distinct laminar-like sublayer adjacent to the burning surface. This region exhibits significantly reduced turbulence intensity and is characterized by more stable temperature and species profiles compared to the fully turbulent regions of the flame. The coexistence of laminar and turbulent regimes within the flame has important implications for understanding flame spread rates and heat transfer mechanisms. Furthermore, our simulations highlight the role of buoyancy-driven flow in shaping the overall flame structure and propagation. The interaction between buoyancy forces and turbulent fluctuations leads to complex flow patterns and enhances mixing within the flame. Comparing our numerical results with experimental data, was demonstrated the ability of the LES model to accurately capture the essential features of turbulent flame spread. The findings of this study provide valuable insights into the underlying physics of turbulent flame spread. The detailed understanding of flame structure and propagation mechanisms gained from this work can be leveraged to develop more accurate and predictive models for fire safety engineering. Future research can focus on exploring the effects of different material properties, ambient conditions, and flame geometries on turbulent flame spread.

Keywords: diffusion flame; turbulent combustion; numerical simulation; Fire Dynamics Simulator.

For citation: Morar G., Karpov A.I., Shaklein A.A. Numerical Study of the Turbulent Diffusion Flame on the PMMA Surface using FDS. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 2, 2025. pp. 153-162 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-11.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation (Project № 25-29-00148).

1. Введение

Турбулентность, скорость протекания химических реакций, тепломассоперенос и другие процессы, протекающие при горении, требуют детального анализа. Численное моделирование турбулентного диффузионного пламени представляет собой актуальную задачу в области пожарной безопасности, так как предсказание поведения пламени позволяет разрабатывать эффективные системы пожаротушения, а также дополнительные меры для предотвращения распространения огня.

На данный момент существует множество работ (как экспериментальных, так и теоретических), посвященных численному исследованию диффузионного пламени, распространяющегося по поверхности твердых горючих материалов. Отдельно можно отметить работу [1], в которой произведен достаточно обширный анализ режимов пламени, методов и подходов, применяющихся для решения задач, связанных с распространением пламени, а также произведен большой обзор литературных источников по данной теме.

Численное моделирование турбулентного горения – это сложная задача, требующая детального описания физических процессов в газофазном пламени. Наличие турбулентных пульсаций при распространении пламени вверх по вертикальной поверхности очевидно (рис. 1а), а при распространении пламени по горизонтальной поверхности (рис. 1б) и вниз по вертикальной поверхности (рис. 1с) можно заметить, что общий режим течения –

турбулентный, однако вблизи поверхности горения есть основания полагать, что течение является ламинарным.

Существование области с ламинарным режимом течения вблизи поверхности горения может служить основанием для разработки нового (или модификации уже существующего) численного метода для оценки скорости распространения турбулентного пламени. В работе [2] показано, что применение допущения ламинарного режима в двухмерной постановке дает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных по скорости распространения пламени, однако, такое допущение справедливо для определения стационарной скорости распространения пламени по поверхности. Если же ставится задача определения параметров по всей области, в том числе и всего факела пламени, то необходимо также рассматривать турбулентный перенос.

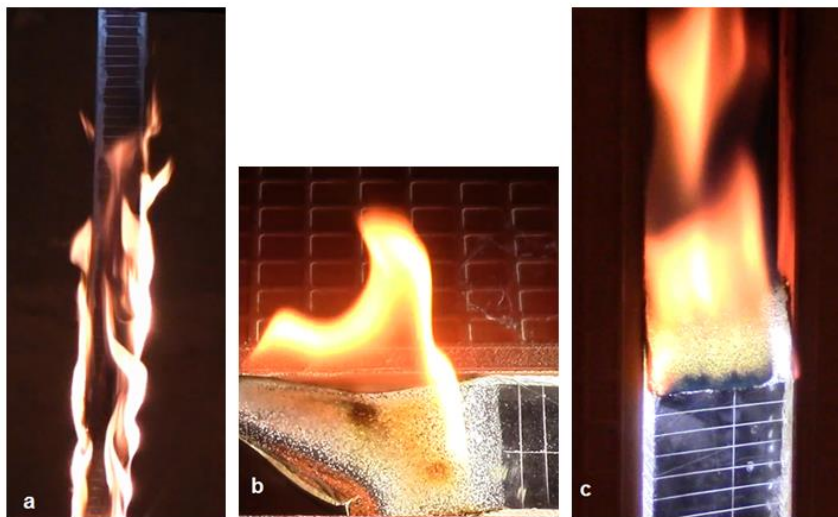


Рис. 1. Конфигурации распространения пламени; а – вверх, b – горизонтальное, с – вниз.

Fig. 1. Flame spread modes; a – upward, b – horizontal, c – downward.

Для моделирования турбулентности используются различные параметрические модели, которые представляют собой осреднение уравнений Навье-Стокса по времени (например, метод RANS), однако реальная картина течения, представленная на рис. 1, отображает существование крупномасштабных пульсаций, что делает невозможным применение RANS моделей, поскольку они предполагают мелкомасштабную изотропную турбулентность. Также существует метод прямого численного моделирования (DNS), который обеспечивает точное описание турбулентности, однако этот метод требует больших вычислительных ресурсов, поэтому в данной работе он не используется. Помимо вышеперечисленных методов для описания турбулентности также используются различные вихреразрешающие модели, как например LES, которая была выбрана для численного исследования турбулентного диффузионного пламени как наиболее оптимальный вариант для решения поставленной задачи. Для использования таких подходов необходимо решать трехмерные уравнения и в работе [3] показано, что использование трехмерных уравнений для решения задач о распространении пламени по поверхности горючего материала достаточно ограничено.

Для проведения численного исследования турбулентного диффузионного пламени, распространяющегося по поверхности твердых материалов, используются различные программные продукты, каждый из которых обладает уникальными характеристиками, определяющими область их применения. Из коммерческих программ можно отметить Ansys, который представляет собой широко используемый инструмент для численного

моделирования задач механики жидкости и газа и теплообмена. Однако его высокая стоимость и ограниченная возможность выбора моделей делают его не очень подходящим для исследовательских задач. Помимо Ansys существует COMSOL, который позволяет моделировать различные физические задачи, в том числе и горение, однако универсальность данного программного пакета может приводить к потере производительности и точности при решении узкоспециализированных задач. Из свободно распространяемых продуктов можно отметить OpenFOAM – это открытая платформа для численного моделирования задач механики жидкости, которая обладает высокой гибкостью и предоставляет возможность изменять исходные решатели, описывающие различные физические модели, для решения различных задач. Также можно отметить пакет Fire Dynamics Simulator (FDS) [4], который является специализированным свободно распространяемым программным комплексом, разработанным для моделирования динамики пожаров. Каждая из программ имеет свои особенности и ограничения, и выбор конкретного продукта зависит от поставленной задачи, требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов. В данной работе используется FDS, поскольку он ориентирован на решения задач, связанных с горением и распространением пламени, а также содержит не только большой набор моделей турбулентности, но и позволяет использовать различные (детальные и сокращенные) механизмы химических реакций, которые позволяют учитывать большой спектр горючих веществ.

2. Постановка задачи

Помимо вышеперечисленного, FDS дает возможность также моделировать теплоперенос, химическую кинетику и разные виды теплообмена. В данной программе можно задавать необходимые начальные и граничные условия, выбирать разные модели для описания горения и турбулентности, а также настраивать дополнительные параметры расчета. Также стоит отметить, что программа предоставляется вместе со всеми исходными файлами, что позволяет при необходимости самостоятельно менять исходный код, добавляя собственные методы расчета или корректируя существующие. FDS поставляется в комплекте с программой для визуализации SmokeView, которая позволяет обрабатывать полученные в результате моделирования данные.

2.1 Модель газовой фазы

Для описания газовой фазы в FDS используются уравнения Навье-Стокса в приближениях для малых числе Маха ($Ma < 0.3$) для многокомпонентной реагирующей среды. В модель входят следующие уравнения:

Уравнение неразрывности:

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

Уравнение компонентов смеси:

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} + r_\alpha''', \quad (2)$$

где Y_α – массовая доля компонента α , μ – динамическая вязкость, Sc_α – число Шмидта, r_α''' – скорость образования компонента α в ходе химической реакции.

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g, \quad (3)$$

где P – полное давление, τ_{ij} – компоненты тензора касательных напряжений, g – ускорение свободного падения.

Уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial q_j''}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где h – энтальпия смеси, q_j'' – тепловые потоки, связанные с теплопроводностью, диффузией и тепловым излучением.

Уравнение состояния:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (5)$$

Для моделирования турбулентного течения в данной работе используется метод LES, ширина фильтра для этого метода в FDS определяется следующим образом:

$$\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3} \quad (6)$$

Для замыкания используется уравнение Дидорфа для турбулентной вязкости:

$$\mu_{LES}/\rho = C_V \Delta \sqrt{k_{sgs}}, \quad (7)$$

где $C_V = 0.1$ – безразмерный коэффициент, k_{sgs} – подсеточное значение кинетической энергии, определяемое как:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (\tilde{u}_i - \hat{u}_i)^2, \quad (8)$$

где $\tilde{u}_i$ – скорость, которая разрешается на сетке, $\hat{u}_i$ – скорость, которая определяется на расширенном сеточном шаблоне.

Все перечисленные уравнения переписываются с учетом фильтра, например, отфильтрованное уравнение переноса импульса принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^{sgs}) + (\bar{\rho} - \rho_0) g_i, \quad (9)$$

где $\tilde{u}_i, \tilde{u}_j$ – компоненты скорости, которые разрешаются на сетке, $\tilde{\tau}_{i,j}$ и $\tau_{i,j}^{sgs}$ – компоненты тензоров разрешенных и подсеточных касательных напряжений.

Компоненты тензора подсеточных напряжений находятся из утверждения о том, что между анизотропной частью тензора напряжений и разрешенным тензором скорости существует линейная связь:

$$\tilde{\tau}_{i,j} + \tau_{i,j}^{sgs} - \frac{1}{3} \tau_{k,k}^{sgs} \delta_{i,j} = -2(\mu + \mu_{sgs}) \left(\tilde{S}_{i,j} - \frac{1}{3} \delta_{i,j} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right), \quad (10)$$

где $\tilde{S}_{i,j}$ – разрешенные компоненты тензора скоростей сдвиговых деформаций на сетке:

$$\tilde{S}_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

2.2 Модель горения

Реакция окисления горючего описывается одностадийной необратимой моделью, в которой стехиометрическое уравнение реакции описывается следующим образом:



Для каждого обобщенного компонента решается отфильтрованное уравнение переноса:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc_\alpha} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{Z}_\alpha}{\partial x_j} + \tilde{m}_\alpha''' \quad (13)$$

Массовые доли отдельных компонентов $\tilde{Y}_\alpha$ определяются из массовых долей обобщенных компонентов с помощью матрицы массовых долей:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Y}_{fuel} \\ \tilde{Y}_{O_2} \\ \tilde{Y}_{N_2} \\ \tilde{Y}_{CO_2} \\ \tilde{Y}_{H_2O} \\ \tilde{Y}_C \\ \tilde{Y}_{CO} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \tilde{Z}_{Fuel} \\ \tilde{Z}_{Air} \\ \tilde{Z}_{Products} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Чтобы определить $\tilde{m}_\alpha'''$ – скорость образования химических компонентов, в FDS используется модель турбулентного горения:

$$\tilde{m}_\alpha''' = -\rho \frac{\min(\tilde{Z}_{Fuel}, \tilde{Z}_{Air} / \sigma_{air})}{\tau_{mix}}, \quad (15)$$

где $\tilde{Z}_{Fuel}$, $\tilde{Z}_{Air}$ – массовые доли обобщенных компонентов топлива и воздуха, σ_{air} – массовый стехиометрический коэффициент воздуха.

Время перемешивания компонентов τ_{mix} определяется по следующей формуле: **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**

$$\tau_{mix} = \min(\tau_d, \tau_u, \tau_g), \quad (16)$$

где τ_d – временной масштаб диффузии, τ_u – временной масштаб турбулентного перемешиваний, τ_g – временной масштаб естественной конвекции.

3. Реализация методики расчета

Процессы, протекающие в твердом материале, в данной работе не рассматриваются, а моделируется «горелка», которая представляет собой горящую поверхность полиметилметакрилата (ПММА). Для расчета газовой фазы используются следующие настройки программы: моделирование турбулентности осуществляется по методу LES (Large Eddy Simulation) с замыканием Deardoff для подсеточной вязкости; расчет концентрации реагентов проводится с использованием обобщенной координаты реакции; турбулентное диффузионное горение описывается бесконечно быстрой реакции по модели перемешивания (Eddy Dissipation Concept, EDC); радиационный теплоперенос рассчитывается по приближению серого газа; разностная аппроксимация проводится по явной схеме второго порядка на структурированной равномерной сетке в декартовой системе координат [5].

На рис. 2 показана расчетная схема, которая представляет собой открытую область по всем границам (размеры указаны на рисунке). Сетка однородна по всем осям x, y, z, а размер одной ячейки составляет 2.5 мм. Горящая поверхность представляет собой квадрат 5x5 см (на рис. 2 обозначено синим цветом). В газовой фазе рассчитывается одностадийная макроскопическая реакция горения метилметакрилата (продукта пиролиза ПММА) $C_5H_8O_2$ с молярной массой 100 г/моль и теплотой реакции 25.6 МДж/кг. Температура поверхности равна 450°C, так как для сравнения используются данные из работы [2], где принята такая же температура.

4. Результаты расчетов

Рис. 3 отображает мгновенные распределения температуры диффузионного пламени в различные моменты времени (интервалы соответствуют используемому в расчете шагу по времени). Данные распределения получены с помощью SmokeView. На этих изображениях видны существенные крупномасштабные пульсации в факеле пламени, а также заметно, что в разные моменты времени пламя не является стационарным, в отличие от ламинарного

течения. Картинка качественно соответствует экспериментальным данным представленным на рис. 1.

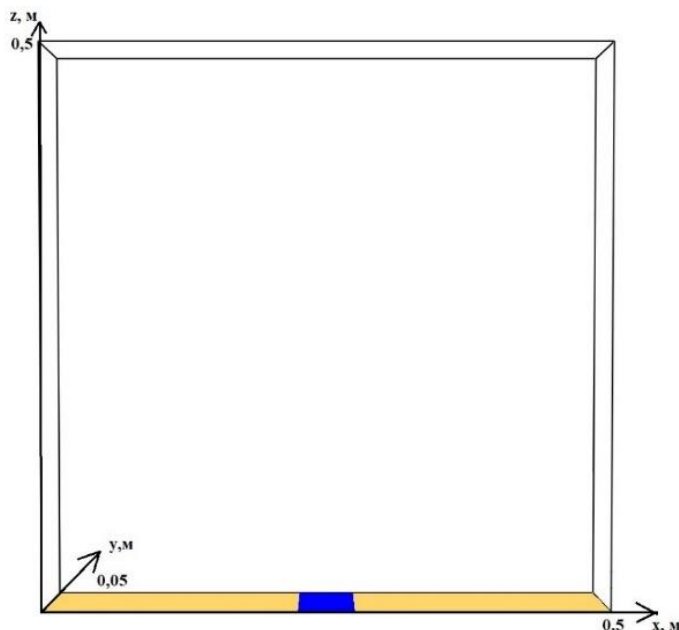


Рис. 2. Схема расчетной области.
Fig. 2. Arrangement of computation domain.

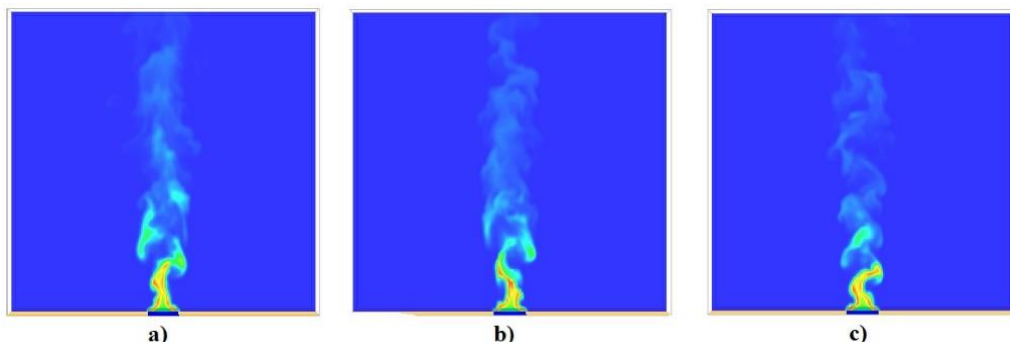


Рис. 3. Структура турбулентного пламени в моменты времени:
a) 32.3 c; b) 32.7 c; c) 33 c

Fig.3. Turbulent flame structure at the time moments: a) 32.3 s, b) 32.7 s, c) 33 s.

Далее рассматривается полученные в результате расчетов поля температур на разных расстояниях от поверхности горения и сравниваются со значениями расчетов, проведенных для ламинарного потока (данные для сравнения взяты из работы [2]). Рис. 5 показывает, что на высоте в 2.5 мм от поверхности профили температур для турбулентного и ламинарного пламени весьма близки, и пульсации температуры при турбулентном режиме практически отсутствуют.

При рассмотрении профилей температур на высоте 5 мм (рис. 5) и выше (рис. 6) видно, что для турбулентного режима горения характерно пульсирующее распределение температуры, а ламинарное пламя остается стационарным в каждый момент времени. Так же очевидно, что несмотря на одинаковую длину поверхности горения (5 см), ширина турбулентного пламени

значительно шире, чем ламинарного, что связано с наличием интенсивного турбулентного перемешивания.

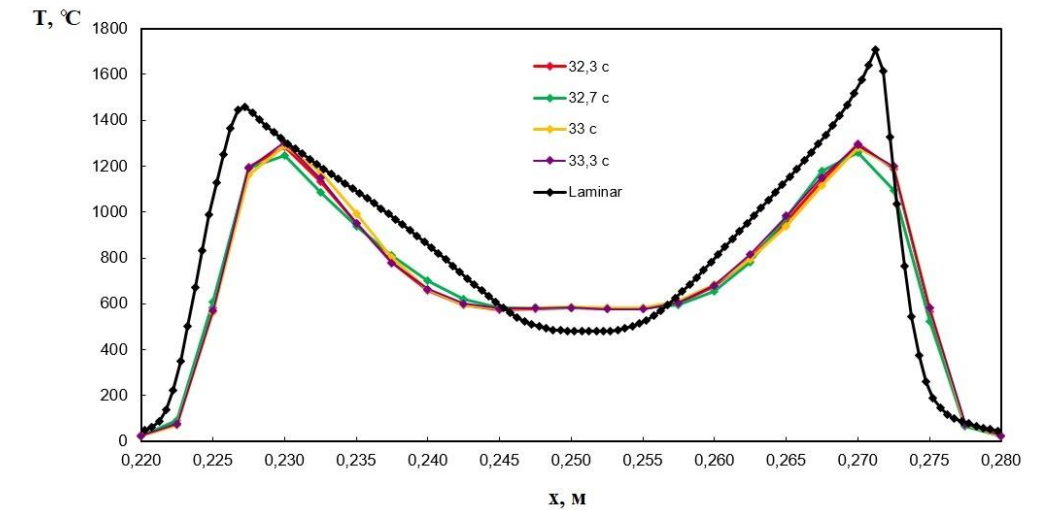


Рис. 4. Распределение температуры пламени на высоте 2.5 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.
Fig. 4. Temperature distribution in flame on the height of 2.5 mm from the surface; curve numbers correspond to the time moment for turbulent flame.

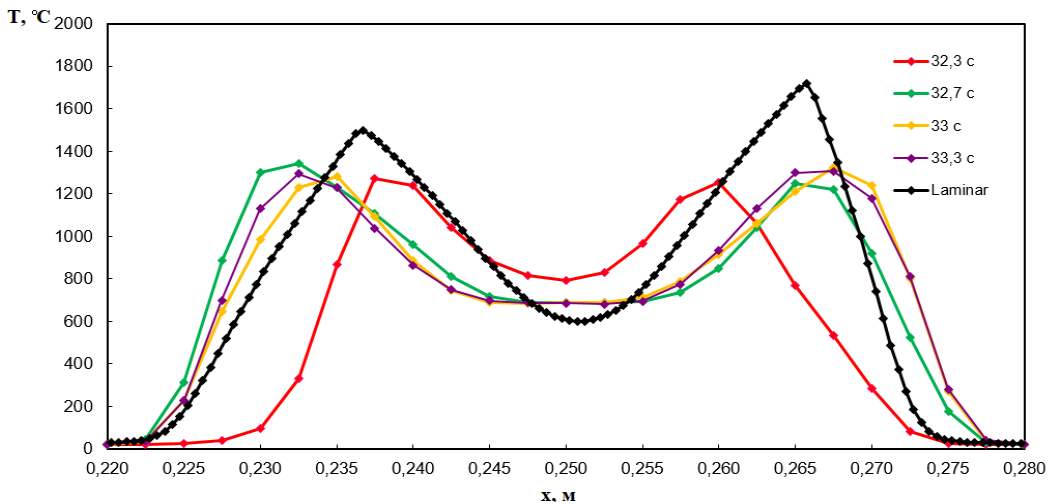


Рис. 5. Распределение температуры пламени на высоте 5 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.
Fig. 5. Temperature distribution in flame on the height of 5 mm from the surface; curve numbers correspond to the time moment for turbulent flame.

5. Заключение

Методы турбулентности на основе LES подхода позволяют составить адекватную численную модель турбулентного диффузионного пламени, и программа Dire Dynamic Simulator хорошо себя показала для решения подобного рода задач. Однако, помимо исследования тепловой структуры пламени, также интересно изучение скорости распространения пламени по

поверхности горючих материалов. Такая задача является сопряженной, т.к. необходимо рассматривать взаимодействие газофазной реакции горения и термического разложения твердого горючего. При этом для точного исследования теплового потока на поверхности (который, несомненно, будет влиять на скорость распространения пламени) необходима мелкая сетка, которая не обеспечивается при решении методом LES. Существуют подходы, описанные в работах [6, 7], которые заключаются в корректировке температуры в пристеночной области, однако несмотря на успешное применение этих подходов, их сложно считать универсальными, поскольку в них используются дополнительные эмпирические параметры.

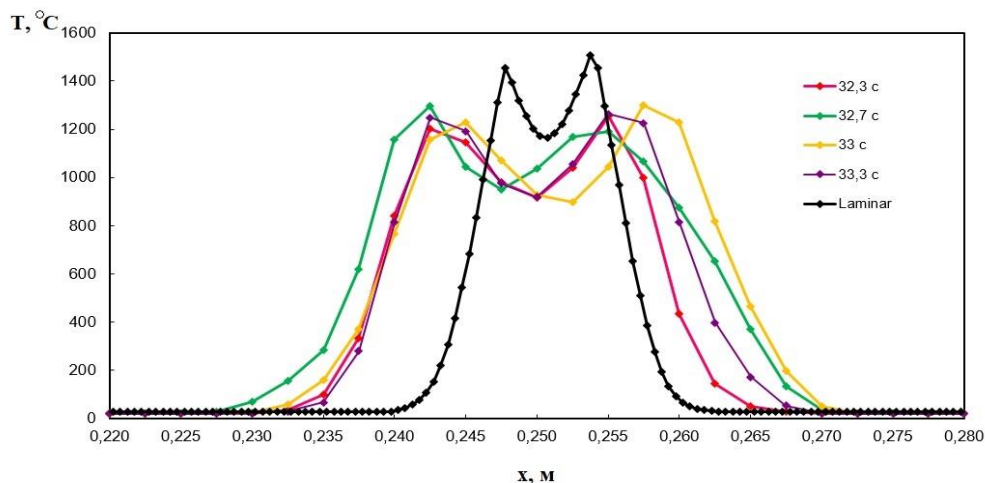


Рис. 6. Распределение температуры пламени на высоте 25 мм от поверхности; номера кривых соответствуют моментам времени для турбулентного пламени.

Fig. 6. Temperature distribution in flame on the height of 25 mm from the surface; number of curves corresponds to the time moment for turbulent flame.

В данном исследовании проведено численное моделирование турбулентного диффузионного пламени для продукта пиролиза полиметилметакрилата и полученные данные показывают наличие ламинарной области вблизи поверхности горения на расстоянии до 2,5 мм. Полученные результаты говорят о том, что в дальнейшем для решения задачи распространения пламени можно использовать следующий алгоритм: исследуемая область делится на две части: вблизи поверхности горения проводится расчет на мелкой сетке (порядка 0,5 мм и меньше) для определения скорости распространения пламени вблизи поверхности горения. Полученные параметры будут граничными условиями для второй области, в которой производится расчет турбулентного горения, и полученные значения осредненных параметров пламени будут являться граничными условиями для решения ламинарного течения в нижней области вблизи поверхности горения.

Подобный алгоритм требует изменения исходного кода FDS, так как на данный момент в программе не предусмотрены функции, которые подходили бы для подобного рода задач. Так же в ходе исследования были обнаружены некоторые неточности в исходном коде (такие как, например, определение скорости протекания химических реакций), которые были исправлены.

Список литературы / References

- [1]. Маркус Е.С. Распространение турбулентного естественно-конвективного пламени по поверхности твёрдых горючих материалов. Дис. ... канд. техн. наук. СПбПУ. – СПб., 2020. – 215 с.

- [2]. Karpov A. I., Korobeinichev O. P., Shaklein A. A., Bolkisev A. A., Kumar A., Shmakov A. G. Numerical study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 144, pp. 937-944. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.106>.
- [3]. Snegirev A., Kuznetsov E., Korobeinichev O., Shmakov A., Paletsky A., Shvartsberg V., Trubachev S. Fully Coupled Three-Dimensional Simulation of Downward Flame Spread over Combustible Material // *Polymers*, 2022, vol.14, 4136. <https://doi.org/10.3390/polym14194136>.
- [4]. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edition, November 2021. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>.
- [5]. Г. Морар, А. И. Карпов, А. А. Шаклеин Численное исследование тепловой структуры турбулентного диффузионного пламени на горизонтальной поверхности ПММА // *Химическая физика и мезоскопия*, т.24, вып.4, 2018, стр. 463-472 <https://doi.org/10.15350/17270529.2022.4.38>.
- [6]. Fukumoto K., Wang C., Wen J. Large eddy simulation of upward flame spread on PMMA walls with a fully coupled fluid–solid approach // *Combustion and Flame*, 2018, vol. 190, pp. 365-387. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.11.012>.
- [7]. Zeinali D., Gupta A., Maragkos G., Agarwal G., Beji T., Chaos M., Wang Y., Degroote J., Merci B. Study of the importance of non-uniform mass density in numerical simulations of fire spread over MDF panels in a corner configuration // *Combustion and Flame*, vol. 200, pp 303-315. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.11.020>.

Информация об авторах / Information about authors

Габриела МОРАР – младший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: численное моделирование процессов горения, горение полимеров, тепло- и массообмен.

Gabriela MORAR – Junior Researcher, Post-Graduate Student, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: numerical simulation of combustion processes, polymer combustion, heat and mass transfer.

Александр Иванович КАРПОВ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: математические модели, вычислительные алгоритмы и программные комплексы для решения сопряженных задач тепломассообмена, газовой динамики и химической кинетики.

Alexander Ivanovich KARPOV– Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: mathematical models, computational algorithms, and software packages for solving coupled problems of heat and mass transfer, gas dynamics, and chemical kinetics.

Артем Андреевич ШАКЛЕИН – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация. Сфера научных интересов: численное моделирование, горение, полимеры, тепло- и массообмен.

Artem Andreevich SHAKLEIN – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation. Research interests: numerical modeling, combustion, polymers, heat and mass transfer.