

УДК 536.46

Численное моделирование теплообмена между ламинарным конусным пламенем и плоской преградой*

Д.А. Сластная, М.Ю. Хребтов, Р.И. Мулляджанов, В.М. Дулин

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

E-mail: da.slastnaya@gmail.com

Представлены результаты численного моделирования теплообмена между ламинарным осесимметричным пламенем предварительно перемешанной метановоздушной смеси и плоской холодной преградой для расстояний между срезом горелки и преградой в один, два и три калибра. Вычисления выполнены методом прямого численного моделирования с детальным кинетическим механизмом GRI-MECH 3.0. Для расстояния в три калибра показано значительное снижение теплового потока в окрестности лобовой точки вследствие возникновения локальной зоны рециркуляции потока между конусом пламени и преградой. Этот эффект объясняет наблюдаемое ранее в экспериментах снижение теплообмена.

Ключевые слова: прямое численное моделирование, ламинарное пламя, направленное на преграду, детальный кинетический механизм, laminarSMOKE, OpenFoam, GRI-MECH 3.0.

В промышленных приложениях горение чаще всего реализуется в камерах сгорания, где наличие стенок приводит к существенным изменениям в структуре пламени и кинетике химического реагирования. Отвод тепла холодной поверхностью способствует повышенному образованию загрязняющих веществ. Кроме того, неравномерный тепловой поток от пламени вызывает локальные неоднородности температуры на поверхности стенки, что приводит к появлению областей локального перегрева, термических напряжений и повышенному износу материала стенки [1]. Таким образом, детальное исследование процессов взаимодействия пламени и стенки, изучение теплообмена и особенностей химического реагирования в пристенной области представляется важным для повышения эффективности и ресурса камер сгорания и снижения уровня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

За последние десятилетия опубликован ряд работ, посвященных изучению взаимодействия пламени и стенки [2]. Основным интересом представляет исследование теплообмена в различных конфигурациях и начальных условиях [3–5]. В работе [6] проведено

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-19-00803). Вычислительные мощности суперкомпьютера «Каскад» (ИТ СО РАН / НГУ) предоставлены в рамках государственного задания.

комбинированное экспериментальное и численное исследование теплообмена ламинарного метановоздушного пламени с плоской преградой для разных размеров горелки. Экспериментально было показано, что для больших размеров пик теплового потока смещен от оси симметрии. На основе численного моделирования сделан вывод, что расположение пика теплового потока связано с пиком профиля осевой скорости.

Экспериментальное исследование структуры потока конусного пропановоздушного пламени, направленного перпендикулярно на плоскую охлажденную преграду, проведено в работе [7], где методом анемометрии по изображениям частиц было впервые измерено поле скорости. Впервые обнаружено образование рециркуляционной зоны в потоке между конусом пламени и поверхностью, что объясняет снижение теплового потока на оси симметрии вблизи преграды, наблюдаемое в других экспериментах. В работе [8] были зарегистрированы поля температуры для метановоздушного пламени в той же конфигурации методом лазерно-индуцированной флюоресценции. Полученные данные подтверждают присутствие застойной зоны вблизи лобовой точки, в которой имеет место циркуляция охлажденных продуктов сгорания.

Целью настоящей работы является численное исследование структуры потока и теплообмена для ламинарного конусного пламени, направленного перпендикулярно на плоскую холодную преграду. Аналогичные конфигурации рассмотрены в работах [5–12]. Пламя образовано осесимметричным сужающимся соплом с выходным диаметром $D = 15$ мм, из которого поступает метановоздушная смесь (см. [8]). Коэффициент избытка топлива $\varphi = 0,92$. Число Рейнольдса равно $Re = 1000$. Преградой является плоская поверхность с постоянной температурой $T_w = 371$ К, расстояние до которой от кромки сопла варьировалось: $h/D = 1, 2, 3$. Расчетная область представляет собой сектор цилиндра с углом раствора 5° . Вычислительная сетка состоит из $2 \cdot 10^5$ призматических ячеек со сгущением на фронте пламени до 5 мкм. При этом на толщину фронта пламени приходится порядка 15 узлов сетки.

Вычисления проводятся на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM, где для разрешения гидродинамики используется метод конечных объемов в сжимаемой постановке. Моделирование реагирующей струи осуществляется путем решения системы уравнений: неразрывности, баланса импульса, баланса массы отдельных компонентов смеси и баланса энергии. Химическая кинетика определяется с помощью расчетного пакета laminarSMOKE [13, 14], позволяющего учитывать детальные механизмы реакций. Данные об элементарных реакциях задаются отдельным файлом в формате CHEMKIN [15]. Используемый кинетический механизм включает 53 компонента смеси и 324 реакции (GRI-MECH 3.0). Задача решается в осесимметричной нестационарной постановке с учетом сил плавучести.

В ходе численного моделирования получены поля скорости, температуры и массовых долей отдельных компонентов смеси. Сравнение полей температуры с экспериментальными данными, полученными методом лазерно-индуцированной флюоресценции [8] для аналогичных геометрий, представлено на рис. 1 (слева). Расчет хорошо воспроизводит форму пламени, наблюдаемую в эксперименте, однако максимальные значения температуры пламени в расчете несколько больше, чем в эксперименте. Для определения плотности теплового потока в преграду со стороны газа была рассчитана величина

$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$. Распределение плотности теплового потока для трех рассмотренных конфи-

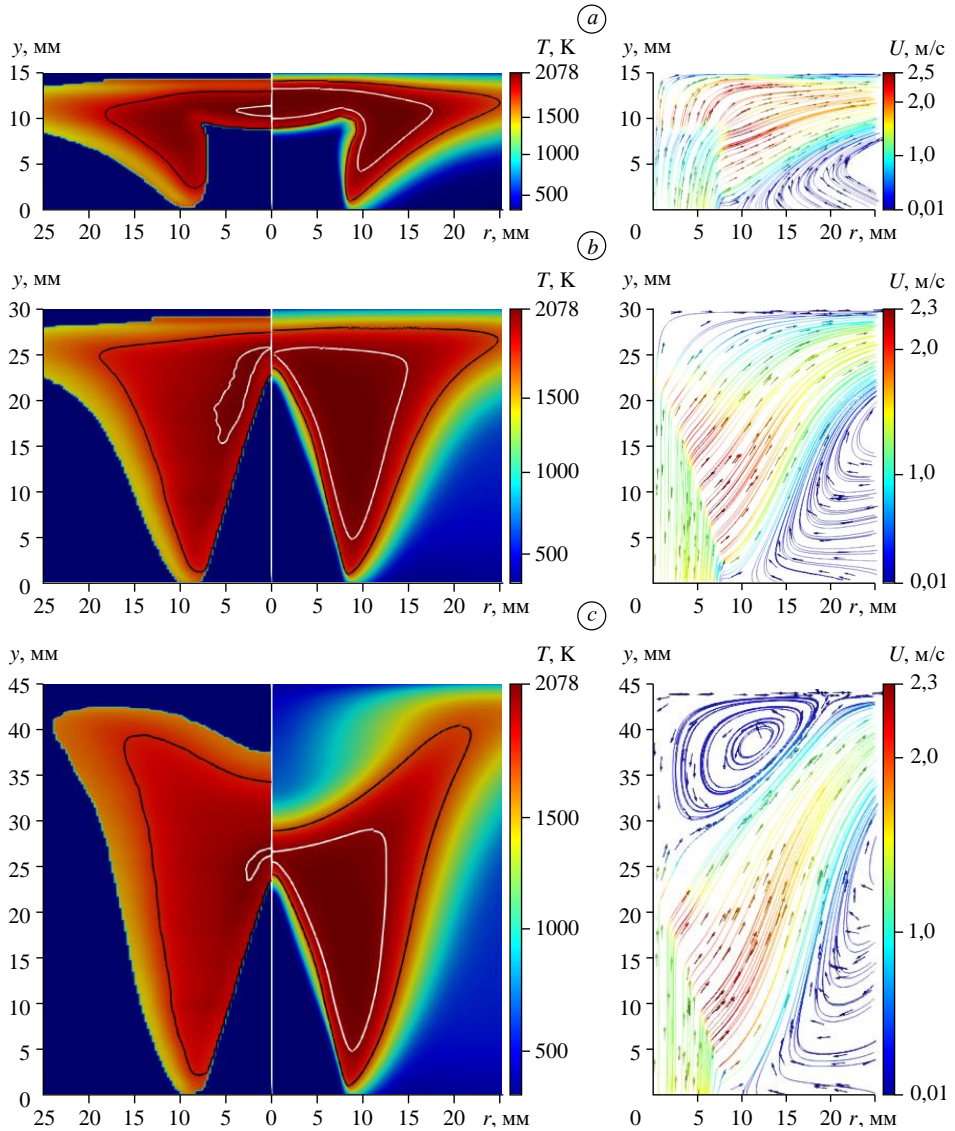


Рис. 1. Сравнение полей температуры, полученных в ходе эксперимента и численного моделирования (слева) и векторные поля скорости (справа).

$h = 1D$ (a), $2D$ (b), $3D$ (c); черная линия — изотерма $T = 1700$ K, белая линия — изотерма $T = 2000$ K.

гураций пламени представлено на рис. 2. Видно, что для $h = 1D, 2D$ максимум теплового потока вблизи стенки находится на оси симметрии в лобовой точке. Однако для конфигурации $h = 3D$ пик теплового потока смещен, что связано с возникновением зоны рециркуляции между конусом и преградой (см. рис. 1 (справа)).

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными работ [7, 8] для той же геометрии. Поля температуры имеют схожие распределения с приведенными в работе [8]. Векторные поля скорости хорошо согласуются с результатами [7]. Значения теплового потока по порядку величины совпадают с данными, полученными в работах [5, 6] и др. Кроме того, детальная модель химической кинетики позволяет исследовать распределения концентрации продуктов реакции и промежуточных соединений, что является целью дальнейшего исследования.

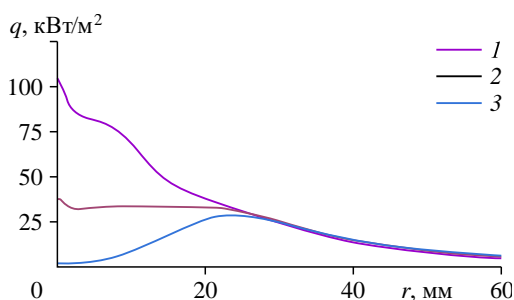


Рис. 2. Радиальное распределение плотности теплового потока q для различных конфигураций. $h = D = 15$ мм (1), $2D$ (2), $3D$ (3).

Таким образом, результаты настоящей работы подтверждают, что организация струйного горения вблизи охлажденной поверхности может приводить к возникновению локальной застойной зоны между фронтом пламени и преградой,

что существенно снижает интенсивность и равномерность локального теплообмена.

Список литературы

1. Chander S., Ray A. Flame impingement heat transfer: a review // *Energy Convers. Management*. 2005. Vol. 46, No. 18, 19. P. 2803–2837.
2. Dreizler A., Böhm B. Advanced laser diagnostics for an improved understanding of premixed flame-wall interactions // *Proc. of the Combust. Inst.* 2015. Vol. 35, No. 1. P. 37–64.
3. Boust B., Sotton J., Labuda S.A., Bellenoue M. A thermal formulation for single-wall quenching of transient laminar flames // *Combust and Flame*. 2007. Vol. 149, No. 3. P. 286–294.
4. Fuyuto T., Kronmayer H., Lewerich B., Brübach J., Fujikawa T., Akihama K., Schulz C. Temperature and species measurement in a quenching boundary layer on a flat-flame burner // *Exp. Fluids*. 2010. Vol. 49. P. 783–795.
5. Remie M.J., Cremers M.F.G., Schreel K.R.A.M., De Goey L.P.H. Analysis of the heat transfer of an impinging laminar flame jet // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, No. 13–14. P. 2816–2827.
6. Chander S., Ray A. Experimental and numerical study on the occurrence of off-stagnation peak in heat flux for laminar methane/air flame impinging on a flat surface // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54, No. 5–6. P. 1179–1186.
7. Кравцов З.Д., Толстогузов Р.В., Чикишев Л.М., Дулин В.М. О формировании застойной зоны в потоке между пламенем в форме конуса и плоской преградой // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 2. С. 329–332.
8. Tolstoguzov R.V., Chikishev L.M. Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // *J. Phys. Conf. Series*. 2022. Vol. 2233, No. 1. P. 012014–1–012014–4.
9. Fernandes E.C., Leandro R.E. Modeling and experimental validation of unsteady impinging flames // *Combust. Flame*. 2006. Vol. 146, No. 4. P. 674–686.
10. Chander S., Ray A. An experimental and numerical study of stagnation point heat transfer for methane/air laminar flame impinging on a flat surface // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, No. 13–14. P. 3595–3607.
11. Schuller T., Durox D., Candel S. Dynamics of and noise radiated by a perturbed impinging premixed jet flame // *Combust and Flame*. 2002. Vol. 128, No. 1–2. P. 88–110.
12. Zhang Y., Bray K.N.C. Characterization of impinging jet flames // *Combust. Flame*. 1999. Vol. 116, No. 4. P. 671–674.
134. Cuoci A., Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method // *Energy and Fuels*. 2013. Vol. 27, No. 12. P. 7730–7753.
14. Cuoci A., Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. A computational tool for the detailed kinetic modeling of laminar flames: Application to C_2H_4/CH_4 coflow flames // *Combust. Flame*. 2013. Vol. 160, No. 5. P. 870–886.
15. Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A. Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics. Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, USA, 1989. No. SAND-89-8009.

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2023 г.,
после доработки — 26 октября 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.