

**КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ**

УДК 532.529.2, 536.253, 536.244

**О формировании застойной зоны в потоке между  
пламенем в форме конуса и плоской преградой\***

**З.Д. Кравцов<sup>1,2</sup>, Р.В. Толстогузов<sup>1,2</sup>, Л.М. Чикишев<sup>1,2</sup>, В.М. Дулин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: vmd@itp.nsc.ru

Экспериментально исследована структура струи, образованной продуктами горения пламени пропано-воздушной смеси в форме конуса и натекающей на ориентированную перпендикулярно плоскую охлаждаемую преграду. Измерения поля скорости выполнены методом анемометрии по изображениям частиц. На основе бесконтактных измерений впервые установлен факт образования возвратного течения в потоке между конусом пламени и преградой, предложено объяснение механизма его возникновения. Формирование слабоинтенсивного рециркуляционного пузыря на оси струи, являющегося застойной зоной, может служить объяснением эффекта снижения интенсивности теплообмена в окрестности лобовой точки, который наблюдался в предыдущих работах.

**Ключевые слова:** импактная струя, конвективный теплообмен.

Струи, натекающие на преграды (импактные струи), реализуются во множестве технических устройств различных масштабов: от самолетов с вертикальными взлетом и посадкой до микроскопических струй, охлаждающих лопатки турбин или микроэлектронные элементы. Импактные струи с горением используются для быстрого нагрева твердых материалов, в частности, для их плавления. В некоторых приложениях эффективность теплообмена обусловлена достижением максимальных тепловых потоков, а в других — равномерностью теплоотвода/нагрева. К эффективному пассивному управлению потоком импактной струи и условиями теплообмена относятся изменение формы сопла, организация закрутки потока или одновременное использование нескольких струй (см., например, работы [1–6]).

Особенностью струй с закруткой является наличие области пониженного давления на ее оси. При этом для струй с интенсивной закруткой, которая как правило характеризуется отношением интегрального момента импульса струи к произведению импульса струи и радиуса выходного отверстия сопла, характерно явление распада вихревого ядра, сопровождающегося образованием центральной зоны рециркуляции. При этом наличие преграды способствует распаду вихревого ядра [7] за счет того, что в импактных струях с умеренной закруткой образуется протяженная зона рециркуляции на оси струи со слабоинтенсивным возвратным течением, что оказывает негативный эффект на интенсивность теплообмена в окрестности лобовой точки [8–10].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 16-19-10566).

Для закрученных струй с горением также характерно наличие центральной зоны рециркуляции и неравномерный нагрев поверхности в окрестности оси струи [11, 12]. В настоящей работе впервые обнаружен схожий эффект образования слабоинтенсивной зоны рециркуляции в окрестности лобовой точки при натекании незакрученной струи с горением на охлаждаемую плоскую преграду. Полученные результаты свидетельствуют о возникновении застойной зоны, что может служить объяснением наблюдаемого в работах [12, 13] эффекта локального уменьшения интенсивности теплообмена в окрестности лобовой точки для расстояний между конусом пламени и преградой в несколько калибров. В работе [13] были приведены оценки распределения скорости, полученные на основе численного моделирования, однако экспериментального подтверждения образования застойной зоны в окрестности лобовой точки представлено не было.

Поток струи был образован продуктами горения предварительно перемешанной пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка топлива  $\Phi = 0,9$ , поступающей из профилированного осесимметричного сопла с диаметром выходного отверстия  $d = 15$  мм. Среднерасходная скорость смеси составляла  $U_0 = 1,7$  м/с, число Рейнольдса  $Re = 1700$ . Поток натекал на плоскую преграду, являвшуюся торцом цилиндрического термостатированного резервуара диаметром 80 мм, заполненного водой при температуре  $96$  °С. Оси цилиндра и сопла совпадали. Для изменения расстояния между соплом и импактной поверхностью (с точностью не хуже 100 мкм) было использовано моторизированное позиционирующее устройство.

Для измерения полей скорости использовался метод анемометрии по изображениям частиц PIV (particle image velocimetry), реализованный в системе «ПОЛИС». Возможность применения этого метода обеспечивалась (аналогично работе [14]) наличием в потоке смеси взвеси частиц диоксида титана, размер которых составлял  $\approx 0,5$  мкм. Для импульсного освещения частиц в продольной плоскости потока использовались два Nd:YAG-лазера, пучки которых были сведены к одной оси (Quantel Ever Green с энергией импульса до 70 мДж). Для освещения плоскости использовалась система цилиндрических и сферических линз. Пары кадров двукратно освещенных частиц были зарегистрированы четырехмегапиксельной ПЗС-камерой (Bobcat ImperX), ориентированной по нормали к плоскости измерения. Объектив камеры был оснащен узкополосным оптическим фильтром ( $532 \pm 10$  нм). Запуск лазеров и камеры синхронизировался с использованием генератора сигнала TTL. Задержка между двумя вспышками лазера составляла 100 мкс и соответствовала максимальному смещению частиц между кадрами не более 15 пикселей. Поле скорости частиц между парой кадров рассчитывалось с помощью программного обеспечения ActualFlow. Размер окна опроса при расчете каждого вектора (пространственное разрешение PIV системы) составлял 0,33 мм.

На рис. 1 представлены фотографии пламени для расстояния между срезом сопла и преградой  $H$ , равного одному, двум, трем и четырем калибрам. В режиме  $H/d = 2$  конус

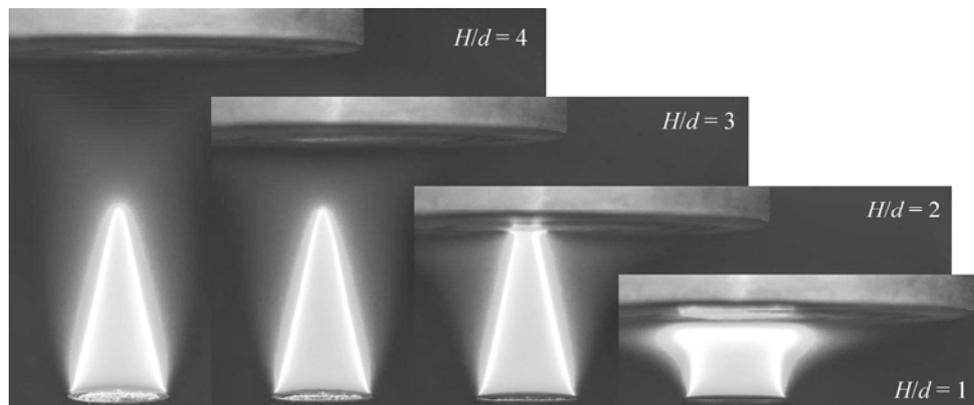


Рис. 1. Пропановоздушное пламя в импактной струе ( $Re = 1700$ ,  $\Phi = 0,9$ ), натекающей на охлаждаемую преграду.

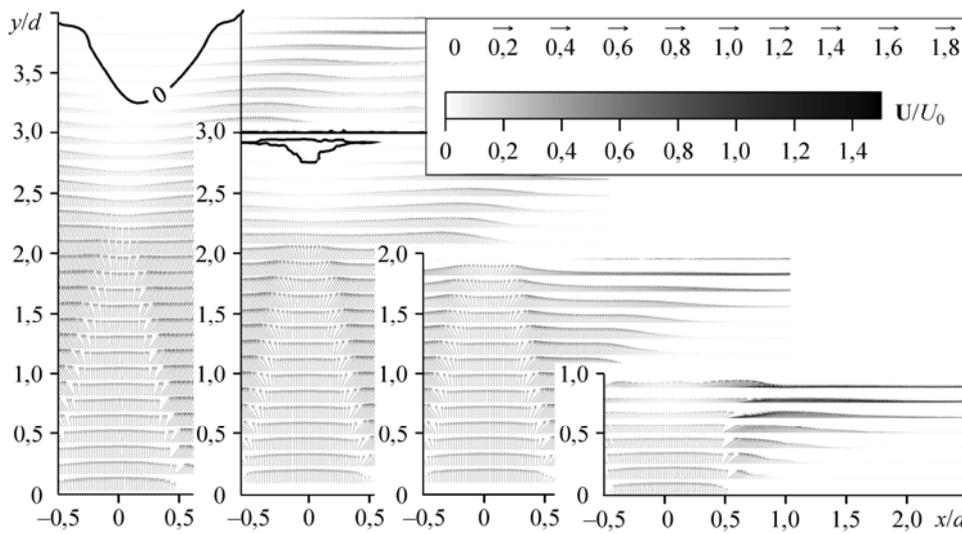


Рис. 2. Поле скорости в импактной струе с горением пропановоздушного пламени ( $Re = 1700$ ,  $\Phi = 0,9$ ), натекающей на охлаждаемую преграду. Сплошная кривая соответствует условию  $U_y = 0$ .

пламени касался импактной поверхности. В случае  $H/d = 1$  конус был деформирован вследствие влияния преграды на поток струи. При  $H/d = 3$  и 4 форма конуса визуально не отличалась от наблюдаемой в отсутствие преграды. На рис. 2 представлены распределения скорости потока (вектора  $\mathbf{U} = (U_x, U_y)$ , где  $Ox$  и  $Oy$  — это соответственно поперечная и продольная оси с началом координат в центре выходного сечения сопла) для расстояний  $H/d = 1, 2, 3$  и 4. В режимах  $H/d = 2, 3$  и 4 поток внутри конуса является практически равномерным и направлен вдоль оси струи. При пересечении фронта пламени нормальная компонента скорости потока возрастает вследствие локального уменьшения плотности газа в процессе горения. Таким образом, за фронтом пламени вектор скорости меняет свою величину и направление. При  $H/d = 1$  конус деформируется вследствие наличия градиента давления в окрестности лобовой точки. Как можно видеть из распределения осевой скорости, представленной на рис. 3а в координатах относительно стенки ( $y^* = H - y$ ), влияние преграды приводит к монотонному уменьшению скорости потока, начиная уже с самой кромки сопла. Локальный максимум осевой скорости потока возле импактной поверхности вызван наличием фронта пламени.

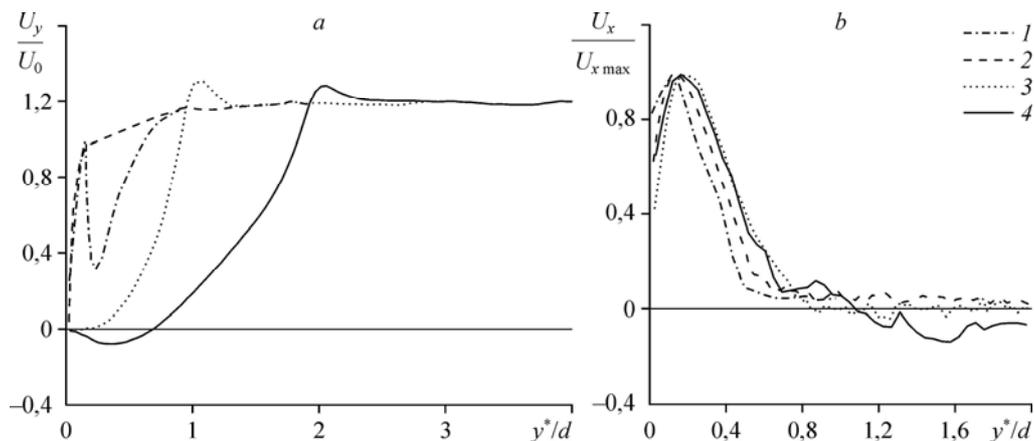


Рис. 3. Распределение средней скорости на оси струи ( $x = 0$ ) (а) и в сечении  $x = 2d$  (б).  $H/d = 1$  (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4).

Как можно видеть из распределения осевой скорости,  $U_y$  достигает отрицательных значений в случае  $H/d = 4$ , что соответствует наличию возвратного течения на оси струи вблизи преграды. Области с отрицательными значениями осевой скорости показаны сплошными линиями на поле скорости на рис. 2. Можно видеть конусообразную область нисходящего течения при  $H/d = 4$ , а также небольшую область при  $H/d = 3$ . В настоящей работе предложено объяснение механизма возникновения возвратного течения: при натекании струи на преграду давление достигает максимального значения в лобовой точке, что соответствует отрицательному градиенту давления в радиальном направлении. Это приводит к возникновению центростремительной объемной силы, действующей на охлажденный в пристенной области газ, уменьшая его продольную скорость и снижая эффективность теплообмена. В окрестности лобовой точки может также возникать область возвратного течения (что наблюдалось в настоящей работе), где будут концентрироваться охлажденные продукты горения, которые способствуют снижению эффективности локального теплообмена между струей и преградой. Распределения радиальной скорости в сечении поперек преграды на расстоянии двух калибров от лобовой точки, показанные на рис. 3b, демонстрируют общий тренд: радиальная струя становится шире с увеличением  $H/d$ .

### Список литературы

1. Huang L., El-Genk M.S. Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets // Int. J. Heat Mass Transfer. 1998. Vol. 41, No. 3. P. 583–600.
2. Ianiro A., Cardone G. Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets // Appl. Thermal Engineer. 2012. Vol. 49. P. 89–98.
3. Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // Int. J. Heat Fluid Flow. 2012. Vol. 37. P. 22–36.
4. Cafiero G., Discetti S., Astarita T. Heat transfer enhancement of impinging jets with fractal-generated turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 173–183.
5. Sodjavi K., Montagné B., Meslem A., Byrne P., Serres L., Sobolik V. Passive control of wall shear stress and mass transfer generated by submerged lobed impinging jet // Heat Mass Transfer. 2016. Vol. 52, No 5. P. 925–936.
6. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Sharov K.A. An experimental investigation of flow structure and heat transfer in an impinging annular jet // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2016. Vol. 79. P. 89–97.
7. Pasche S., Gallaire F., Dreyer M., Farhat M. Obstacle-induced spiral vortex breakdown // Exp. Fluids. 2014. Vol. 55, No. 8. P. 1784-1–1784-7.
8. Nozaki A., Igarashi Y., Hishida K. Heat transfer mechanism of a swirling impinging jet in a stagnation region // Heat Transfer Asian Res. 2003. Vol. 32, No. 8. P. 663–673.
9. Senda M., Inaoka K., Toyoda D., Sato S. Heat transfer and fluid flow characteristics in a swirling impinging jet // Heat Transfer Asian Res. 2005. Vol. 34, No. 5. P. 324–335.
10. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulín V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. Vol. 28. P. 1340–1359.
11. Singh G., Chander S., Ray A. Heat transfer characteristics of natural gas/air swirling flame impinging on a flat surface // Exp. Therm. Fluid Sci. 2012. Vol. 41. P. 165–176.
12. Hindasageri V., Vedula R.P., Prabhu S.V. Heat transfer distribution of swirling flame jet impinging on a flat plate using twisted tapes // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 91. P. 1128–1139.
13. 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 Mass Transfer. 2011. Vol. 54. P. 1179–1186.
14. Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Маркович Д.М., Дулин В.М., Шараборин Д.К. Пространственное и временное разрешение метода PIV при измерении скорости в пламени // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, № 5. С. 13–21.

Статья поступила в редакцию 23 октября 2017 г.,  
после доработки — 27 ноября 2017 г.