

**АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ УСТОЙЧИВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ПЛАМЕНИ В ПРОТОЧНОМ РЕАКТОРЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ****А.В. Ярко**

yarkov.andrey.v@gmail.com

SPIN-код: 3836-8406

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведена обработка экспериментальных данных и выполнено математическое моделирование процесса распространения пламени в стехиометрической метано-воздушной смеси в проточном реакторе с организованным поперечным потоком свежей смеси в целях выявления основных механизмов, ответственных за устойчивое распространения фронта пламени. Обработка экспериментальных данных показала нелинейный характер зависимости средней скорости фронта пламени от объемного расхода смеси. При этом, в отличие от соответствующих данных для случая без поперечного потока, наблюдается увеличение средней скорости фронта при увеличении объемного расхода смеси. Численное моделирование подобной системы показало, в областях подачи газа в поперечном направлении в канале формируются вихревые структуры, взаимодействие пламени с которыми способствует увеличению площади поверхности пламени и интенсификации горения. Проведенные исследования характеристик распространения пламени в проточном реакторе с поперечным потоком расширяют представления о механизмах устойчивого распространения пламени в проточном реакторе и, в частности, о механизмах взаимодействия пламени с вихревыми структурами. С другой стороны, организация более устойчивого режима горения является основой для повышения энергоэффективности и экологической безопасности при использовании газообразных топлив.

Ключевые слова

Проточный реактор, стабилизация горения, поперечный поток, метано-воздушная смесь, скорость распространения фронта пламени, взаимодействие пламени с вихрями

Поступила в редакцию 26.07.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Проблема осуществления устойчивого процесса горения возникает в связи с задачами повышения энергоэффективности процесса сжигания топлива и снижения вредных выбросов, включая окислы азота и окислы углерода [1, с. 8]. Одним из наиболее распространенных способов уменьшения вредных выбросов в случае горения чистых топлив является снижение температуры горения, чего можно добиться, в частности, при использовании бедных смесей

[2, с. 12; 3]. Однако горение обедненных смесей неустойчиво, и в условиях дефицита топлива горение затухает.

В последнее время большое внимание уделяется подходу стабилизации процесса горения бедных смесей, основанному на концепции избыточной энтальпии [4, 5]. Идея этого подхода заключается в рециркуляции теплоты продуктов горения в несгоревшую смесь. Иными словами, энергия, выделяющаяся в результате химической реакции, каким-либо способом передается свежей смеси, в результате чего температура пламени повышается и пламя не затухает даже при низком содержании топлива. Данный механизм может быть реализован различными способами. Наиболее часто встречающимся недостатком реакторов, реализующих такой механизм, является чрезмерная потеря теплоты на стенки.

В настоящей работе проведен анализ основных механизмов, влияющих на процесс распространения пламени в проточном реакторе, в котором свежая смесь подается перпендикулярно направлению распространения пламени в канале.

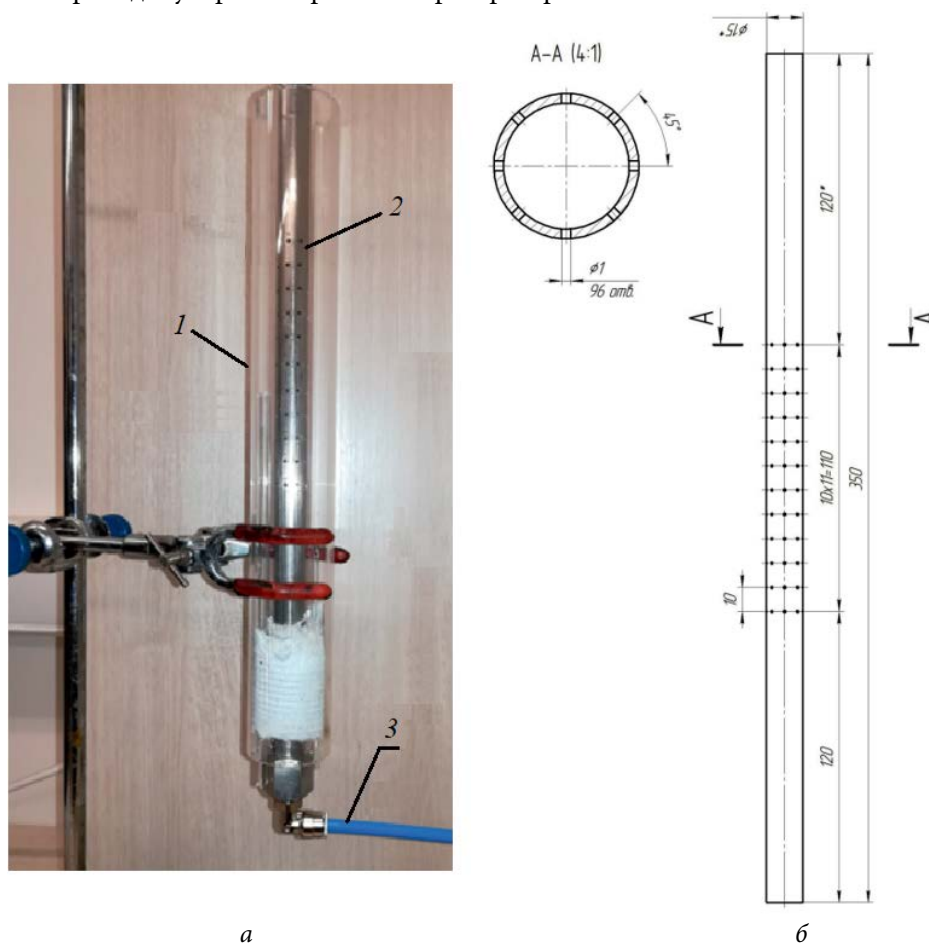


Рис. 1. Экспериментальная установка:

a — фотография проточного реактора с поперечным потоком (*1* — внешний канал, *2* — внутренний канал, *3* — система накачки свежей смеси); *б* — схема внутреннего канала

Методика экспериментального исследования. Схема экспериментальной установки для изучения влияния поперечного газового потока, подаваемого через перфорированную стенку реактора, на процесс горения предварительно перемешанной смеси представлена на рис. 1, а. Проточный реактор представляет собой систему, состоящую из двух соосных каналов, отделенных друг от друга стальной стенкой. Для организации поперечного потока в стальной стенке выполнены отверстия (всего их 96) диаметром 1 мм. Внешний канал отделен от окружающей среды стеклянной стенкой. Внутренний канал открыт с одной стороны для подачи свежей смеси. Внешний канал открыт с противоположной стороны для свободного истечения смеси из реактора. Схема внутреннего канала изображена на рис. 1, б. Общая длина каналов составляет 350 мм, а диаметр внешнего канала — 36 мм.

Свежая смесь представляет собой стехиометрическую смесь метана и воздуха. Метан произведен компанией «НИИ КМ» (г. Москва) и имеет чистоту не менее 99,9 %. Расход подаваемой свежей смеси контролируется расходомером ELLFLOW Prestige, произведенным компанией Bronkhorst. Объемный расход изменялся в диапазоне 1...5 л/мин.

Воспламенение смеси осуществляется на верхнем открытом конце внешнего канала через некоторое время после начала подачи смеси. Распространение пламени регистрируется высокоскоростной камерой Evercam 2000-8-C с частотой 400 кадров/с.

После обработки записанных видеофрагментов были получены зависимости координаты фронта пламени от времени его распространения для различных объемных расходов смеси. Затем по формуле центральных разностей оценивали значение скорости фронта пламени в каждый момент времени:

$$U_{f,m} = \frac{z_{f,m+1} - z_{f,m-1}}{2\delta t}, \quad (1)$$

где $U_{f,m}$ — скорость фронта пламени; $z_{f,m+1}$, $z_{f,m-1}$ — координаты фронта пламени; δt — интервал времени между кадрами; m — номер кадра.

Граничные значения скоростей заданы следующим образом: $U_{f,1} = 0$, $U_{f,M} = U_{f,M-1}$. Первое условие означает отсутствие движения на первом кадре, а второе — отсутствие ускорения на последнем.

Методика численного моделирования. Динамика рассматриваемой системы подчиняется следующей системе уравнений газовой динамики [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) &= 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho(\mathbf{v})) = 0; \\ \frac{\partial(\rho Y_k)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho Y_k \mathbf{v}) + \operatorname{div} \mathbf{j}_k &= M_k \dot{\omega}_k, \quad k = \overline{1, K}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \operatorname{grad} p = \operatorname{div} \bar{\bar{\sigma}};$$

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\mathbf{v}h_s) = \frac{dp}{dt} - \sum_{k=1}^K \Delta h_{f,k}^0(T) \dot{\omega}_k - \operatorname{div} \mathbf{j}_q + \bar{\bar{\sigma}} : \operatorname{grad} \mathbf{v};$$

$$\mathbf{j}_k = -\rho D_k^* \operatorname{grad} Y_k; \quad (2)$$

$$\bar{\bar{\sigma}} = \mu \left[(\operatorname{grad} \mathbf{v}) + (\operatorname{grad} \mathbf{v})^T - \frac{2}{3} (\operatorname{div} \mathbf{v}) \bar{\bar{E}} \right]; \quad (3)$$

$$\mathbf{j}_q = -\lambda \operatorname{grad} T + \sum_{k=1}^K h_{s,k} \mathbf{j}_k; \quad (4)$$

$$p = \rho RT \sum_{k=1}^K \frac{Y_k}{M_k};$$

$$dh_s = c_p(\{Y_k\}_{k=1}^K, T) dT, \quad (5)$$

где ρ — плотность смеси; \mathbf{v} — вектор скорости движения смеси; Y_k — мольная доля компонента k ; \mathbf{j}_k — диффузионный поток, рассчитываемый по закону Фика (2), в котором коэффициент диффузии k -го компонента D_k^* вычисляется с использованием приближения Гиршфельдера — Кертисса [6]; M_k — молярная масса k -го компонента; $\dot{\omega}_k$ — скорость образования k -го компонента в результате химических реакций; K — число компонентов в системе; \otimes — тензорное произведение; p — полное давление системы; $\bar{\bar{\sigma}}$ — тензор вязких напряжений, определяемый по закону Ньютона (3); h_s — термическая часть энтальпии, определяемая выражением (5); $\Delta h_{f,k}^0$ — стандартная энтальпия образования единицы массы компонента k в результате химической реакции; \mathbf{j}_q — тепловой поток, определяемый по закону Фурье (4); $:$ — операция свертки двух тензоров; μ — средняя динамическая вязкость системы; $\bar{\bar{E}}$ — единичный тензор; R — универсальная газовая постоянная; T — температура системы; $c_p(\{Y_k\}_{k=1}^K, T)$ — удельная теплоемкость системы при постоянном давлении.

Ввиду того что нормальная скорость горения (скорость фронта пламени относительно несгоревшей смеси) стехиометрической метановоздушной смеси приближенно равна 36 см/с [7], скорость подачи смеси, соответствующая объемному расходу 5 л/мин через канал диаметром 15 мм составляет примерно 47 см/с, а скорость звука в метановоздушной смеси при давлении 0,1 МПа и температуре 300 К приближенно равна 350 м/с, числа Маха в рассматриваемой постановке составляют примерно 0,001...0,002. Благодаря этому возможно существенное упрощение процесса численного решения задачи по алгоритму типа предиктор-корректор, описанному в работе [8].

Используемый проточный реактор, схема которого представлена на рис. 1, обладает осевой симметрией, ввиду чего моделирование целесообразно проводить в цилиндрической системе координат, ограничившись при этом двумерным случаем (координаты (r, z) — радиальная и осевая координата соответственно). Ввиду того что малый размер отверстий существенно усложняет задачу тем, что требуется достаточно большое число расчетных ячеек, а исследуемые механизмы стабилизации пламени не должны зависеть от числа рядов отверстий и длины канала, постановка для моделирования задачи была несколько изменена геометрически: длина канала сокращена с 300 до 100 мм, а число рядов отверстий уменьшено с 12 до 5. Разрешение области составляет 5 расчетных ячеек вдоль диаметра отверстия, линейный размер расчетной ячейки $\delta = 0,2$ мм. Тогда число расчетных ячеек $N = 45\,000$.

При моделировании предполагается, что первоначально весь канал заполнен стехиометрической метановоздушной смесью при температуре 300 К, а стенки реактора поддерживаются при постоянной температуре (300 К) на протяжении всего процесса (приближение изотермических стенок). Область воспламенения смеси задается как локальное повышение температуры до 1500 К вблизи открытой границы для отвода продуктов горения. Схема расчетной области для моделирования представлена на рис. 2.

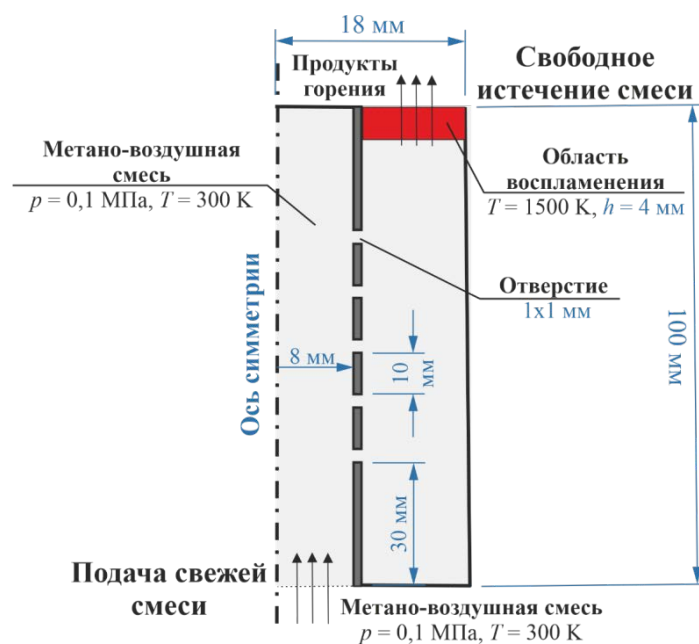
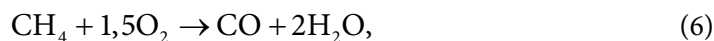


Рис. 2. Схема расчетной области для моделирования процесса горения в проточном реакторе с поперечным потоком

Термодинамические свойства компонентов (молярная теплоемкость, стандартные энтропия и энтальпия образования) были рассчитаны с использованием данных, представленных в [9]. Химическую кинетику горения метановоздушной смеси

рассчитывали по упрощенной двухступенчатой схеме 2S_CH4_BFER [10], которая включает в себя следующие две реакции:



Скорости реакций (6), (7) рассчитывают с использованием параметров, приведенных в работе [10].

Результаты. Результаты моделирования движения потока в канале в отсутствие горения показали, что скорость истечения смеси из реактора через открытую границу с большой точностью имеет линейную зависимость относительно скорости подачи свежей смеси (рис. 3). Наклон полученной прямой показывает, что после прохождения отверстий скорость потока уменьшается примерно в 5,34 раза. Тогда при объемном расходе 1 л/мин, которому при диаметре внутреннего канала 15 мм соответствует скорость подачи смеси 9,43 см/с, скорость истечения составляет всего 1,77 см/с. При расходе 5 л/мин, которому соответствует скорость подачи смеси 47,16 см/с, скорость истечения равна 8,83 см/с. Эти значения существенно ниже нормальной скорости горения стехиометрической метановоздушной смеси (36 см/с), ввиду чего в широком диапазоне скоростей подачи смеси пламя будет распространяться внутрь канала. В таком случае фронт пламени способен дойти до места расположения отверстий, где пламя будет активно взаимодействовать с поперечным потоком.

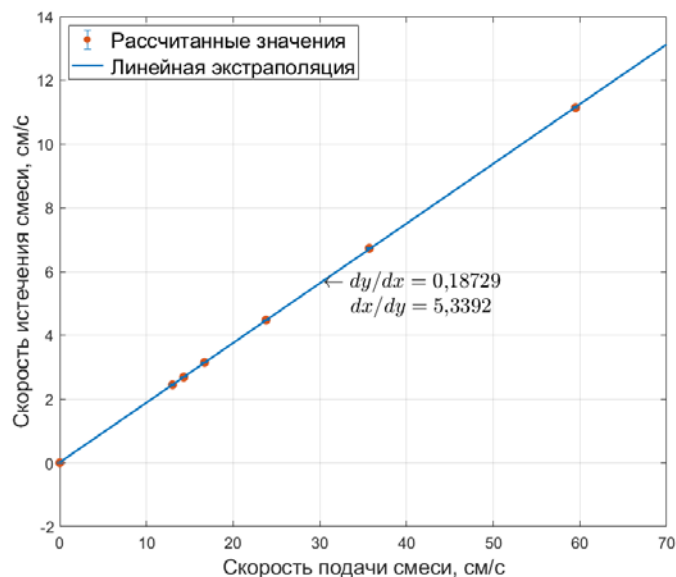


Рис. 3. Зависимость скорости истечения смеси через открытую границу от скорости подачи смеси в проточном реакторе с поперечным потоком

Обработка видеофрагментов распространения пламени во внешнем канале проточного реактора с поперечным потоком, заполненного стехиометрической метановоздушной смесью, показала нелинейную зависимость средней скорости

распространения фронта пламени от объемного расхода подаваемой свежей смеси (рис. 4). Значения средних скоростей получены усреднением значений скорости фронта, рассчитанных по формуле (1), по всем кадрам, фиксирующим распространение пламени. Интерполяция значений средней скорости получена методом наименьших квадратов для зависимости вида

$$U(x) = a \cdot \operatorname{th} \left(\frac{x-b}{1 \text{ л/мин}} \right) + c, \quad (8)$$

где U — скорость фронта пламени, м/с; x — объемный расход смеси, л/мин; a , b , c — определяемые параметры.

Зависимость вида (8) подразумевает выход на асимптотическую зависимость, что наблюдается для экспериментальных данных. Параметры этой зависимости для набора экспериментальных данных имеют следующие значения:

$$a = 1,43 \text{ м/с}; \quad b = 1,5456 \text{ л/мин}; \quad c = 0,5011 \text{ м/с}.$$

Экстраполяция зависимости (8) на область $x \in [0; 1]$ л/мин получена с учетом нормальной скорости горения стехиометрической метановоздушной смеси, с которой фронт пламени распространяется в покоящейся смеси. Зависимость скорости фронта пламени от объемного расхода смеси для одномерного случая построена с учетом полученных при моделировании значений скорости истечения смеси из реактора (см. рис. 3).

На рис. 4 видно, что организация такой геометрии проточного реактора, когда поперечный поток будет активно взаимодействовать с пламенем позволяет

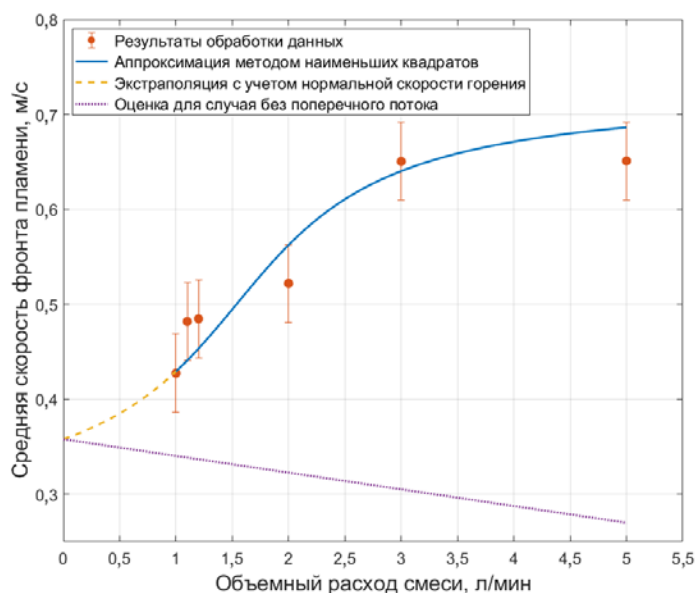


Рис. 4. Результаты обработки экспериментальных данных по распространению фронта пламени в проточном реакторе с поперечным потоком

существенно увеличить среднюю скорость фронта пламени. Однако скорость распространения фронта пламени не является при этом постоянной. На рис. 5 представлена зависимость скорости фронта пламени от времени для объемных расходов 1 и 5 л/мин. Видно, что распространение фронта пламени имеет осциллирующий характер, при этом чем выше объемный расход, тем выше неравномерность скорости распространения фронта пламени.

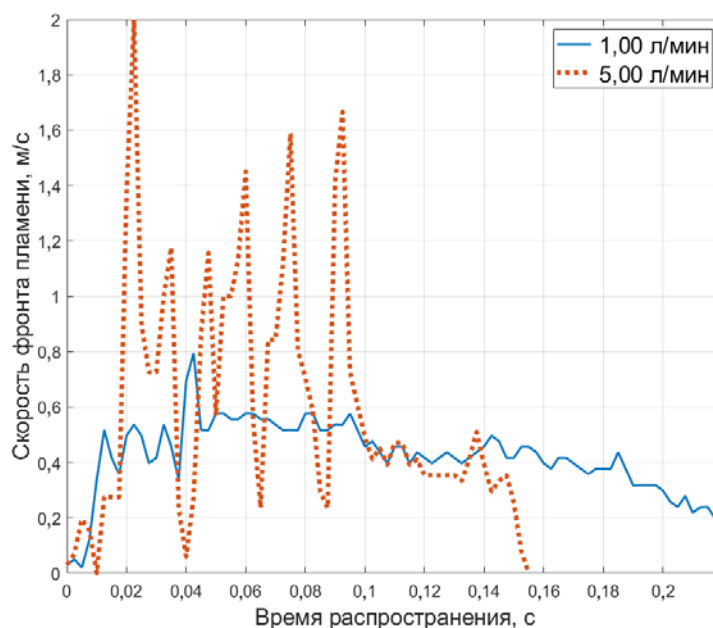


Рис. 5. Зависимость скорости фронта пламени от времени в проточном реакторе с поперечным потоком

Численное моделирование процесса распространения фронта пламени в проточном реакторе с поперечным потоком для объемного расхода смеси 5 л/мин также позволило наблюдать эффект ускорения фронта, обусловленного влиянием поперечного потока. Например, скорость фронта пламени при прохождении отверстий оказалась выше в 2,63 раза скорости фронта при распространении в области, лишенной отверстий.

На рис. 6 показано поле завихренности потока ($\omega = (\text{rot } \mathbf{v})_{\varphi}$). Расположение фронта пламени определялось по положению максимальной концентрации окисла углерода CO. Результаты моделирования показали, что на выходах из отверстий образуются вихревые структуры, взаимодействующие с фронтом горения. Так, вихревые течения изменяют пространственную структуру фронта и способствуют его растяжению, что, в свою очередь, обеспечивает его ускорение.

Анализ распределения температуры при прохождении фронтом пламени отверстий (рис. 7) также позволяет увидеть сложную структуру фронта пламени. На рис. 7 показана эволюция поля температуры с интервалом времени 2 мс. Видно, что область продуктов горения остается отделенной от стенок внутрен-

него канала проточного реактора. Поток вытесняется турбулентным пограничным слоем, в результате чего в этих областях вся энергия, выделяемая в результате горения, идет на нагрев свежей смеси.

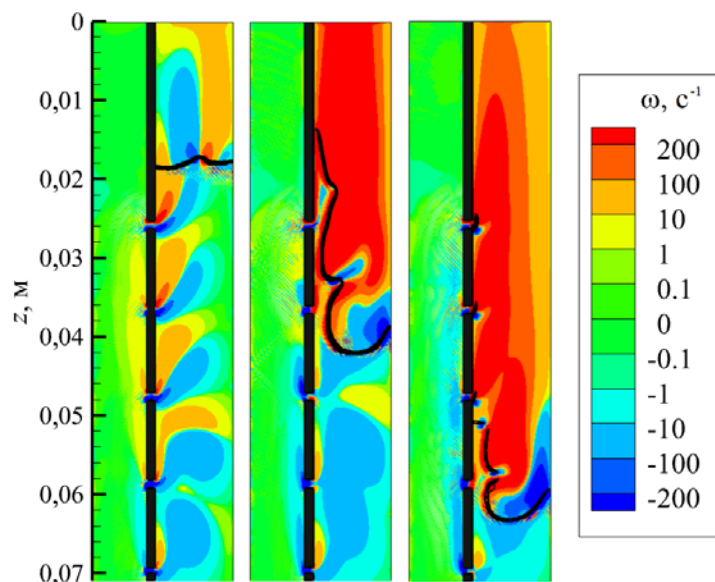


Рис. 6. Поле завихренности в проточном реакторе с поперечным потоком для различных моментов времени после зажигания (слева направо — 140, 218, 282 мс; черной линией показано положение фронта пламени)

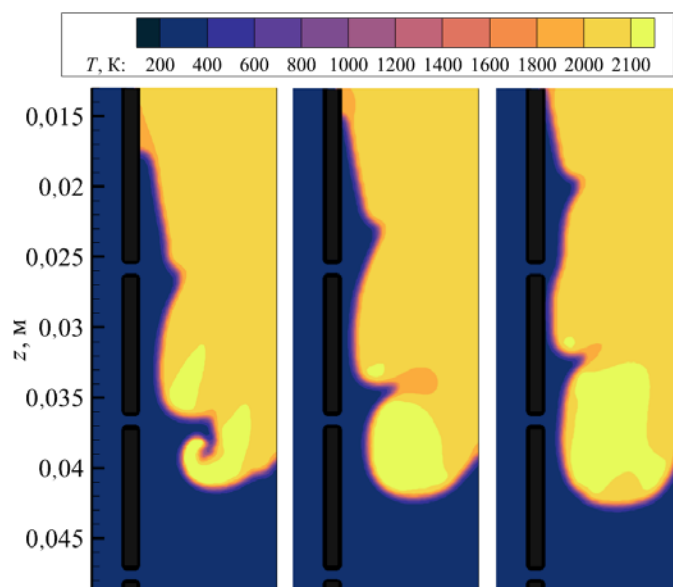


Рис. 7. Эволюция поля температуры в проточном реакторе с поперечным потоком (слева направо — 215, 217, 219 мс после зажигания)

Заключение. Совместный анализ результатов обработки экспериментальных данных и численного моделирования процесса распространения пламени в проточном реакторе с поперечным потоком позволяет заключить, что в областях вблизи расположения отверстий во внутреннем канале происходит активное взаимодействие пламени с вихревыми структурами, благодаря чему за счет механизма рециркуляции тепла и снижения тепловых потерь на стенку реактора в результате вытеснения потока турбулентным пограничным слоем процесс горения стабилизируется и фронт пламени распространяется с повышенной скоростью.

Литература

- [1] Kuo K.K., Acharya R. Fundamentals of turbulent and multiphase combustion. New York, Wiley, 2012.
- [2] Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. М., Физматлит, 2003.
- [3] Shudo T., Omori K., Hiyama O. NO_x reduction and NO₂ emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2008, vol. 33, no 17, pp. 4689–4693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.034>
- [4] Lloyd S.A., Wienberg F.J. A burner for mixtures of very low heat content. *Nature*, 1974, vol. 251, no. 5470, pp. 47–49. DOI: <https://doi.org/10.1038/251047a0>
- [5] Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2011, vol. 37, no 6, pp. 669–715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.03.001>
- [6] Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., Изд-во иностранной литературы, 1961.
- [7] Bradley D., Hundy G.F. Burning velocities of methane-air mixtures using hot-wire anemometers in closed-vessel explosions. *Symp. (Int.) Combust.*, 1971, vol. 13, no 1, pp. 575–583. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80059-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80059-0)
- [8] McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C. et al. Fire dynamics simulator users guide. NIST, 2013.
- [9] Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al. Gri-Mech 3.0. URL: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech (дата обращения: 12.05.2021).
- [10] Franzelli B., Riber E., Gicquel L.Y.M. et al. Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame. *Combust. Flame*, 2012, vol. 159, no 2, pp. 621–637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.08.004>

Ярков Андрей Владимирович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Яковенко Иван Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Вычислительной физики Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Киверин Алексей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Вычислительной физики Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ярков А.В. Анализ механизмов устойчивого распространения пламени в проточном реакторе с поперечным потоком. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 09(62). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-09-734>

**ANALYSIS OF THE MECHANISMS OF STABLE FLAME PROPAGATION
IN A CROSS-FLOW REACTOR**

A.V. Yarkov

yarkov.andrey.v@gmail.com

SPIN-code: 3836-8406

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Experimental data were processed and mathematical modeling of the flame propagation process in a stoichiometric methane-air mixture in a flow reactor with an organized cross-flow of a fresh mixture was carried out in order to identify the main mechanisms responsible for the stable propagation of the flame front. The processing of the experimental data showed the nonlinear character of the dependence of the flame front average velocity on the volumetric flow rate of the mixture. In this case, in contrast to the corresponding data for the case without a transverse flow, an increase in the average front velocity is observed with an increase in the volumetric flow rate of the mixture. Numerical modeling of such a system has shown that in the regions of gas supply in the transverse direction, vortex structures are formed in the channel, the interaction of the flame with which contributes to an increase in the flame surface area and combustion intensification. The conducted studies of the flame propagation characteristics in a flow-through reactor with a cross-flow expand the understanding of the mechanisms of stable flame propagation in a flow-through reactor and, in particular, mechanisms of flame interaction with vortex structures. On the other hand, the organization of a more sustainable combustion regime is the basis for improving energy efficiency and environmental safety when using gaseous fuels.

Keywords

Flow reactor, combustion stabilization, cross flow, methane-air mixture, flame front propagation velocity, flame interaction with vortices

Received 26.07.2021

© Bauman Moscow State Technical
University, 2021

References

- [1] Kuo K.K., Acharya R. Fundamentals of turbulent and multiphase combustion. New York, Wiley, 2012.
- [2] Warnatz J. Combustion. Berlin, Springer, 2001. (Russ. ed.: Gorenje. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003.)
- [3] Shudo T., Omori K., Hiyama O. NO_x reduction and NO₂ emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2008, vol. 33, no 17, pp. 4689–4693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.034>
- [4] Lloyd S.A., Wienberg F.J. A burner for mixtures of very low heat content. *Nature*, 1974, vol. 251, no. 5470, pp. 47–49. DOI: <https://doi.org/10.1038/251047a0>
- [5] Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2011, vol. 37, no 6, pp. 669–715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.03.001>

- [6] Hirschfelder J.O., Curtiss Ch.F., Bird R.B. The molecular theory of gases and liquids. Chapman and Hall, 1954. (Russ. ed.: Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey. Moscow, Izd-vo inostrannoy literatury Publ., 1961.)
- [7] Bradley D., Hundy G.F. Burning velocities of methane-air mixtures using hot-wire anemometers in closed-vessel explosions. *Symp. (Int.) Combust.*, 1971, vol. 13, no 1, pp. 575–583. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(71\)80059-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(71)80059-0)
- [8] McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C. et al. Fire dynamics simulator users guide. NIST, 2013.
- [9] Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al. Gri-Mech 3.0. URL: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech (accessed: 12.05.2021).
- [10] Franzelli B., Riber E., Gicquel L.Y.M. et al. Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame. *Combust. Flame*, 2012, vol. 159, no 2, pp. 621–637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.08.004>

Yarkov A.V. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Yakovenko I.S., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Computational Physics Laboratory of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Kiverin A.D., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Computational Physics Laboratory of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Yarkov A.V. Analysis of the mechanisms of stable flame propagation in a cross-flow reactor. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 09(62). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-09-734.html> (in Russ.).