

УДК 544.452.42

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА В СПУТНОЙ СТРУЕ ВОЗДУХА

© 2021 г. В. В. Козлов^{1,2,*}, Г. Р. Грек¹, М. В. Литвиненко^{1,2},
Ю. А. Литвиненко¹, А. С. Тамбовцев^{1,2}, А. Г. Шмаков^{2,3}

Представлено академиком РАН С. В. Алексеенко 22.07.2020 г.

Поступило 31.07.2020 г.

После доработки 18.09.2020 г.

Принято к публикации 19.09.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований горения круглой микроструи водорода в спутной дозвуковой коаксиальной струе воздуха. Показано, что сценарий горения при дозвуковом истечении струи водорода связан с наличием “области перетяжки пламени” и нагрева сопла, но начальная сферическая форма область пламени трансформируется в цилиндрическую. Установлено, что горение круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости истечения сопровождается наличием сверхзвуковых ячеек.

Ключевые слова: круглая микроструя водорода, спутная коаксиальная струя воздуха, “область перетяжки пламени”, до- и сверхзвуковое горение

DOI: 10.31857/S2686740020060127

В работе [1] впервые представлены четыре сценария диффузионного горения круглых микроструй водорода, включая “сверхзвуковое горение” (горение при сверхзвуковом истечении струи водорода) при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. В работе [2] показано, что стабилизация пламени при дозвуковой скорости истечения круглой микроструи водорода связана с нагревом сопла и наличием области перетяжки пламени, приводящего к явлению “запирания” сопла, а стабилизация пламени при сверхзвуковой скорости истечения микроструи водорода – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструй водорода в зависимости от места поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и от изменения скорости истечения (роста или уменьшения).

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской

микроструи водорода [3, 4]. Следует заметить, что запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода, близкой к скорости звука в воздухе ($U_0 \approx 330$ м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием “области перетяжки пламени” и существованием в ней горения.

Одной из характеристик “сверхзвукового горения” струйного течения является наличие сверхзвуковых ячеек в струе и пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работе [5] при поджигании круглой микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации можно было наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек и в струе, и в оторвавшемся от среза сопла пламени. Результаты исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [6–8].

С другой стороны, важно изучить влияние различных газообразных добавок в микрострую водорода на режимы ее горения. В работе [9] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном (предварительно перемешанных), а также с гелием или азотом в круглой микроструе. Показано, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смеси водорода с одним из газов – метаном, гелием или азотом, связаны с образованием

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: kozlov@itam.nsc.ru

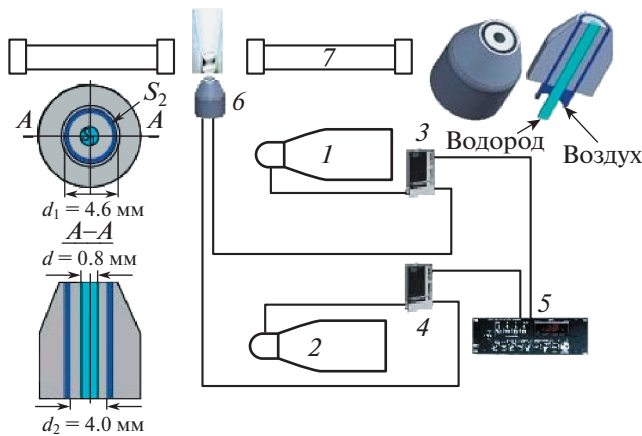


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – водород, 2 – воздух, 3, 4 – регуляторы расхода газа, 5 – измеритель расхода газа, 6 – микросопло, 7 – теневого аппарата Теплера.

“области перетяжки пламени”, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водорода с метаном по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого горения метана и других углеводородов. Установлено, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном или гелием либо азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

В работе [10] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода с кислородом (предварительно перемешанных). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей устойчивого горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Обнаружено, что сферическая форма “области перетяжки пламени” трансформируется в узкую и вытянутую область ламинарного пламени цилиндрической формы, а уменьшение поперечного сечения “области перетяжки пламени” зависит от роста скорости истечения микроструи.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей горения круглой микроструи водорода при наличии дозвуковой спутной струи воздуха, истекающей из коаксиальной щели, и изучение взаимодействия двух микроструй как на дозвуковой, так и на сверхзвуковой скорости истечения водорода.

Особое внимание будет уделено сравнению сценария данного процесса со сценариями горения микроструй водорода, исследованных нами ранее.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена схема эксперимента. В сопловое устройство (6) через блок управления электромагнитными клапанами регулятора массового расхода газа (MKS Instruments) (3, 4) подавались водород из баллона (1) (100 атм.) с редуктором через центральное круглое отверстие горелки и сжатый воздух (2) через коаксиальную щель горелки. Установка величины объемного расхода газов осуществлялась блоком управления, а показания расхода газов регистрировались электронным табло расходомеров (5). Процедура проведения исследований состояла в видеосъемке непосредственно процесса диффузионного горения микроструи чистого водорода в отсутствие и при наличии спутной струи воздуха, а также в видеосъемке теневой картины данного процесса (7) (теневой метод Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры Olympus SZ-17 с разрешением 12 МП.

Горение круглой микроструи чистого водорода и при наличии спутной струи воздуха исследовалось при различных скоростях истечения как микроструи водорода, так и спутной струи воздуха. Объемный расход газов Q (см³/с) устанавливался с помощью прецизионных регуляторов массового расхода с точностью $\pm 0.7\%$. Скорость истечения микроструи определялась по формуле U_0 (м/с) = Q (см³/с)/ S (см²), где S – площадь поперечного сечения круглого отверстия для водорода и коаксиальной щели для спутной струи воздуха на выходе из горелки. Следует заметить, что определение скорости истечения газа на сверхзвуковой скорости из микросопла таким способом не совсем корректно, поскольку не учитывается целый ряд параметров, в том числе сжимаемость газа. В данной ситуации был использован метод определения скорости истечения микроструи по разности давления (ΔP , кГс/м²) на входе ($P_{\text{редуктор}}$) и выходе ($P_{\text{атмосфера}}$) водорода из микросопла ($\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$). При этом U_0 (м/с) = $= \sqrt{2\Delta P/\rho}$, где ρ (кГ/м³) – плотность водорода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха на дозвуковой скорости их истечения

На рис. 2 показаны теневые картины процесса горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от объ-

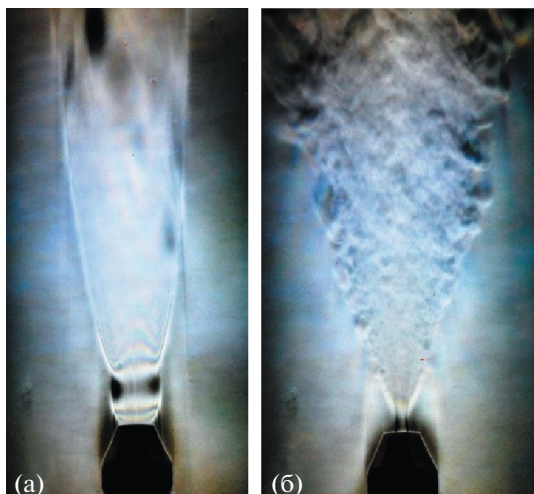


Рис. 2. Теневые картины горения круглой микроструи водорода в отсутствие спутной (коаксиальной) струи воздуха (а) и при ее наличии (б) в зависимости от объемного расхода газов (Q , см³/с) или скорости их истечения (U_0 , м/с) (Q ; U_0 соответственно): (а) водород (102, 204), воздух (0, 0), (б) водород (102, 204), воздух (200, 50).

емного расхода газа (Q , см³/с) или скорости истечения (U_0 , м/с) водорода и спутной струи. В отсутствие спутной струи (рис. 2а, 3а) можно наблюдать наличие “области перетяжки пламени” при диффузионном горении микроструи водорода, что изучено и детально описано в наших предыдущих исследованиях [1–5]. При наличии спутной струи воздуха (рис. 2б, 3б–г) и различном объемном расходе (Q) или скорости (U_0) ее истечения, но сохранении объемного расхода ($Q = 102$ см³/с) или скорости ($U_0 = 204$ м/с) истечения микроструи водорода, “область перетяжки пламени” сохра-

няется, но претерпевает определенные изменения. Сферическая форма “области перетяжки пламени” трансформируется в цилиндрическую форму (рис. 2б, 3б–г), однако сама динамика уменьшения ее пространственного размера с ростом скорости истечения микроструи водорода сохраняется [1, 2], но уже в условиях роста скорости истечения спутной струи, а не самой микроструи водорода. С ростом скорости истечения спутной струи (рис. 3б–г), можно также наблюдать процесс интенсификации турбулентного горения области пламени вниз по потоку от “области перетяжки пламени”. В то же время скорость истечения самой микроструи водорода оставалась неизменной.

Таким образом, экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на дозвуковой скорости их истечения показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1, 2], сохраняются и в данной ситуации. Однако с определенными нюансами не принципиального характера, такими как деформация формы области перетяжки пламени (трансформация формы из сферической в цилиндрическую), интенсификация турбулентного горения с ростом скорости истечения спутной струи и т.д.

Другой важный аспект диффузионного горения смеси микроструи водорода с окружающей ее спутной струей воздуха состоит в том, что в процессе смешения микроструй и горения их смеси спутная струя воздуха является своеобразным экраном, способствующим сохранению горения струи водорода вплоть до сверхзвуковой скорости ее истечения. Данный факт дает основания предполагать возможность горения смеси в агрессивной среде. Например, при наличии паров воды

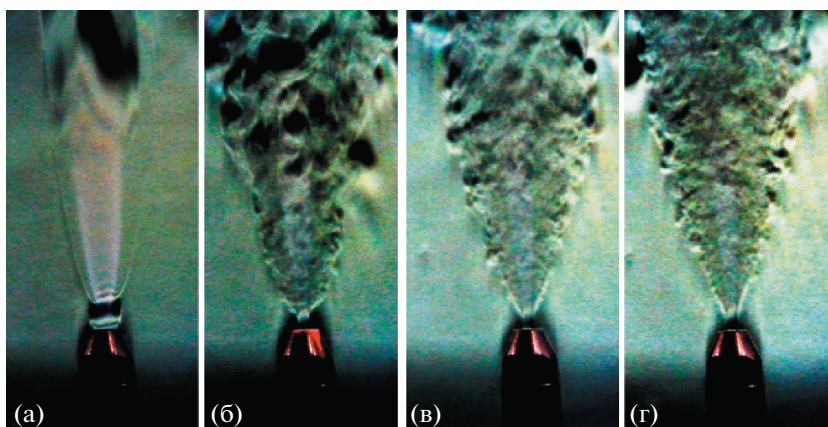


Рис. 3. Теневые картины горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от его объемного расхода (Q , см³/с) или скорости истечения (U_0 , м/с): водород (Q ; $U = 102$; 204), спутная струя (Q ; $U_0 = 0, 70, 140, 200$; 0, 17.5, 35, 50) соответственно.

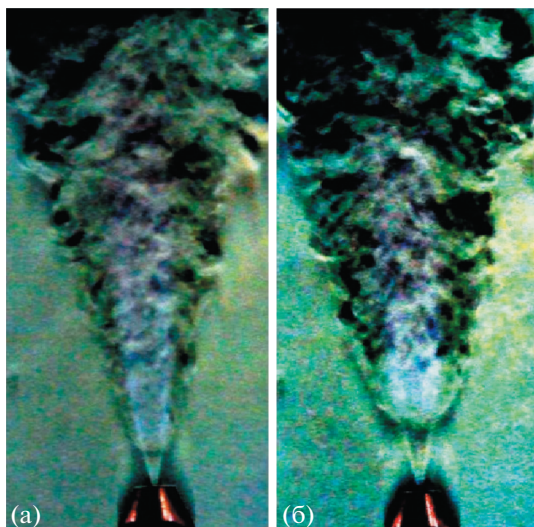


Рис. 4. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого в отсутствие спутной (коаксиальной) струи воздуха (а), а также в случае истечения водорода из центрального круглого, а воздуха ($Q; U = 200 \text{ см}^3/\text{с}; 50 \text{ м/с}$) из coaxиального отверстий горелки одновременно (б) при постоянном расходе и скорости истечения водорода ($Q; U = 170 \text{ см}^3/\text{с}; 340 \text{ м/с}$).

или среды различных агрессивных газов. В данном случае под агрессивной средой и агрессивными газами подразумевается их отрицательное влияние на поддержание процесса горения, т.е. ингибирующее воздействие.

Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе на сверхзвуковой скорости

Рисунок 4а демонстрирует горение круглой микроструи водорода в отсутствие спутной (коаксиальной) струи воздуха. В то же время рис. 4б показывает сверхзвуковое горение круглой микроструи водорода ($Q; U = 170 \text{ см}^3/\text{с}; 340 \text{ м/с}$) при наличии спутной струи воздуха ($Q; U = 200 \text{ см}^3/\text{с}; 50 \text{ м/с}$). Можно наблюдать отрыв пламени от среза микросопла и интенсивное турбулентное горение сверхзвуковой микроструи водорода. Следует отметить увеличение расстояния отрыва пламени от среза сопла в ситуации наличия спутной струи воздуха.

Таким образом, экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной coaxиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости истечения водорода показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1, 2], сохраняются и в данной ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом истечении круглой микроструи водорода в спутной дозвуковой coaxиальной струе воздуха, сценарии горения совпадают со сценарием диффузионного горения микроструи чистого водорода. Показано, что сценарий горения при дозвуковом истечении струи водорода связан с наличием “области перетяжки пламени” и нагрева сопла, и данный факт коррелирует с аналогичными сценариями диффузионного горения микроструи водорода на дозвуковой скорости, исследованными нами ранее. Обнаружено, что сферическая форма “области перетяжки пламени” трансформируется в цилиндрическую форму, образующуюся в границах спутной coaxиальной струи воздуха. В этом случае возникает область горения, защищенная от окружающей среды, позволяющая при отдельном подводе водорода и окислителя сжигать водород в агрессивной (с точки зрения поддержания процесса горения) среде. Установлено, что горение круглой микроструи водорода в спутной coaxиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости истечения сопровождается наличием сверхзвуковых ячеек. Горение круглой микроструи водорода при сверхзвуковом истечении в спутной coaxиальной струе воздуха связано с отрывом пламени от среза сопла.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект 16–19–10330) и частично (обеспечение водородом) в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610128-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Шмаков А.Г. Диффузионное горение круглой микроструи водорода при до- и сверхзвуковой скорости истечения // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 25–30.
2. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A. Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet // Intern. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. Issue 24. P. 15913–15924.
3. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Шмаков А.Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестник НГУ. Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 52–66.
4. Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeinichev O.P., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets // (Part II). International Journal of Hydrogen Energy. 2016. V. 41. Iss. 44. P. 20240–20249.

5. *Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G.* Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. Iss. 1. P. 457–468.
6. *Kalghatgi G.T.* Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air // *Combust. Sci. Technol.* 1984. V. 41. Iss. 1/2. P. 14–29.
7. *Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б.* Водород, параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. 290 с.
8. *Аннушкин Ю.М., Свердлов Е.Д.* Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразных топлив // *Физика горения и взрыва*. 1978. № 5. С. 53–63.
9. *Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Коробейников О.П.* Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // *Вестник НГУ. Физика*. 2016. Т. 11. № 2. С. 56–76.
10. *Шмаков А.Г., Вихорев В.В., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А.* Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // *Сиб. физ. журн.* 2018. Т. 13. № 1. С. 54–67.

MICRO JET DIFFUSION COMBUSTION IN THE COAXIAL AIR JET

V. V. Kozlov^{a,b}, G. R. Grek^a, M. V. Litvinenko^{a,b}, Yu. A. Litvinenko^a,
A. S. Tambovzev^{a,b}, and A. G. Shmakov^{b,c}

^a *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b *Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation*

^c *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS S.V. Alekseenko

This paper presents the results of experimental studies of the combustion of a circular microjet of hydrogen in a satellite subsonic coaxial air jet. Gorenje scenario with subsonic hydrogen jet outflow is shown to be associated with the presence of a “bottleneck flame region” and nozzle heating, but the initial spherical shape of the flame region is transformed into a cylindrical one. It is established that the combustion of a circular microjet of hydrogen in a co-axial air jet at supersonic flow velocity is accompanied by the presence of supersonic cells.

Keywords: hydrogen round micro jet, coaxial air jet, “bottleneck flame region”, sub- and supersonic combustion