

УДК 532.525.2

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-35-45

Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха и нанопорошка

В. В. Козлов^{1,2}, **Г. Р. Грек**¹, **М. В. Литвиненко**^{1,2}
Ю. А. Литвиненко¹, **А. С. Тамбовцев**^{1,2}, **А. Г. Шмаков**^{3,4}

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

³ *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия*

⁴ *Сибирский государственный университет геосистем и технологий
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком SiO₂, истекающей из щелевого (многосоплового) коаксиального сопла на до- и сверхзвуковой скорости. Показано, что сценарии горения микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком аналогичны сценариям диффузионного горения микроструи водорода как при дозвуковой, так и при сверхзвуковой скорости истечения струй. Обнаружены наличие «области перетяжки пламени» при дозвуковой и отрыв пламени от среза сопла при сверхзвуковой скорости истечения струи. Установлено, что с ростом скорости истечения струй можно наблюдать интенсификацию свечения пламени на границе потоков водорода и смеси воздуха с нанопорошком и наличие области перетяжки пламени как в ламинарной спутной струе, так и в пламени микроструи водорода. С другой стороны, можно наблюдать практически исчезновение области перетяжки пламени при приближении к трансзвуковым скоростям истечения струй.

Ключевые слова

круглая микроструя водорода, «область перетяжки пламени», спутная струя смеси воздуха с нанопорошком, коаксиальная щелевая струя

Источник финансирования

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10330

Для цитирования

Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха и нанопорошка // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 35–45. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-35-45

© В. В. Козлов, Г. Р. Грек, М. В. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко,
А. С. Тамбовцев, А. Г. Шмаков, 2019

Features of the Round Hydrogen Microjet Combustion in a Coaxial Jet of the Air and Nanopowder Mixture

V. V. Kozlov^{1,3}, G. R. Grek¹, M. V. Litvinenko^{1,2},
Yu. A. Litvinenko¹, A. S. Tambovtsev^{1,2}, A. G. Shmakov^{3,4}

¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation*

³ *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

⁴ *Siberian State University of Geosystem and Technology
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Results of the experimental studies of a round hydrogen microjet combustion in a coaxial jet of air and SiO₂ nanopowder mixture efflux from a slot-hole (multinozzle) coaxial nozzle at subsonic and supersonic efflux velocity are presented. It is shown that scenarios of a hydrogen microjet combustion in a coaxial jet of air and nanopowder mixture are similar to scenarios of diffusion combustion of a hydrogen microjet at subsonic and supersonic efflux velocity. Existence of “bottleneck flame region” is revealed at subsonic and a flame separation from a nozzle exit at supersonic efflux velocity. It is found that with efflux velocity growth of jets it is possible to observe intensification of the luminescence of the flame at the boundary between the jet of hydrogen and air / nanopowder mixture and existence of «bottleneck flame region» as in a laminar coaxial jet and in a flame of a hydrogen microjet combustion. On the other hand, it is possible to observe actually disappearance of the «bottleneck flame region» at approach to transonic efflux velocity.

Keywords

round hydrogen microjet, “bottleneck flame region”, coaxial jet of air with nanopowder mixture.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project number 16-19-10330

For citation

Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G. Features of the Round Hydrogen Microjet Combustion in a Coaxial Jet of the Air and Nanopowder Mixture. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 35–45. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-35-45

Введение

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей горения круглой микроструи водорода в условиях наличия спутной струи смеси воздуха с нанопорошком SiO₂, истекающей из коаксиального щелевого (многосоплового) сопла и изучение взаимодействия двух микроструй как на дозвуковой, так и на сверхзвуковой скорости их истечения. Особое внимание будет уделено сравнению сценария данного процесса со сценариями горения микроструи водорода, исследованных нами ранее.

Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента. В сопловое устройство через блок управления электромагнитными клапанами типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа подавался водород из баллона (100 атм.) с редуктором через центральное круглое отверстие горелки и сжатый воздух через коаксиальную щель горелки. Установка величины объемного расхода газов осуществлялась блоком управления, а показания расхода газов регистрировались электронным табло расходомеров. Процедура проведения исследований состояла в видеосъемке непосредственно процесса диффузионного горения микроструи чистого водорода в отсутствие и при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком SiO_2 , а также в видеосъемке теневой картины данного процесса (теневой метод Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

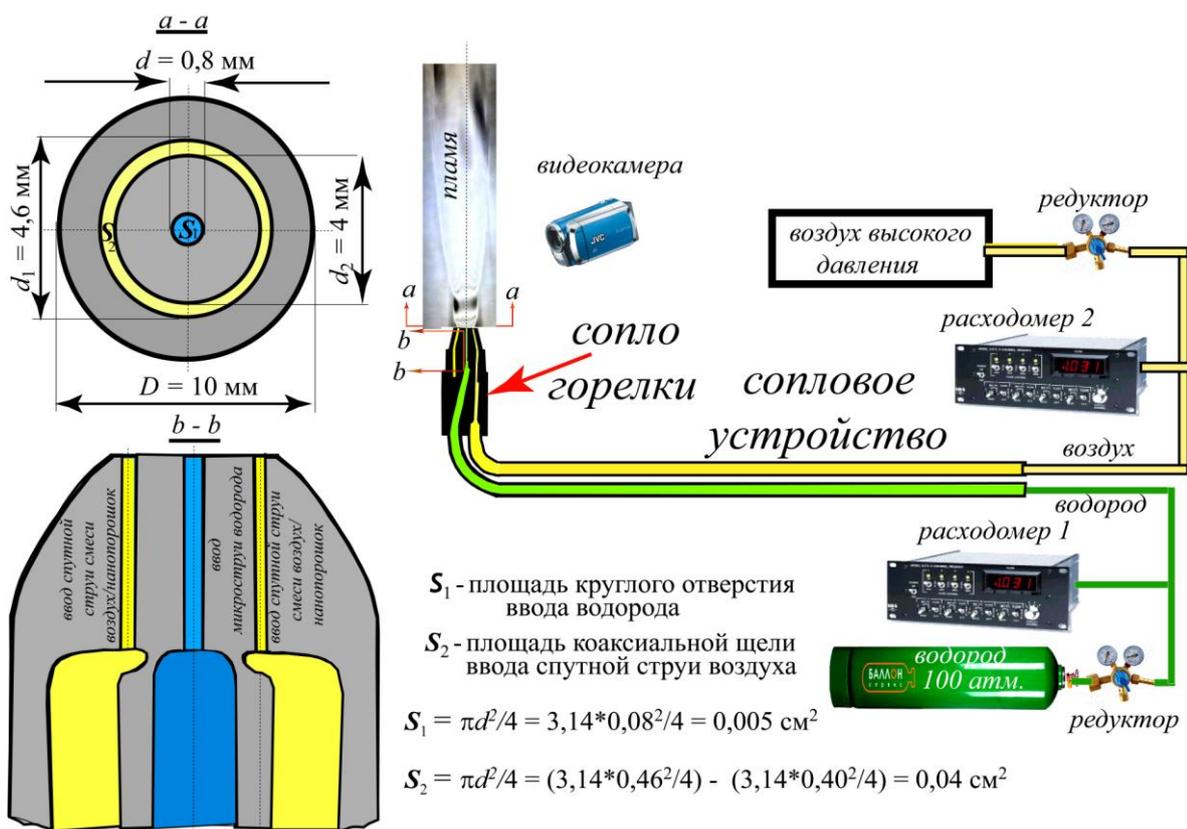


Рис. 1. Схема эксперимента

Fig. 1. Experimental Sketch

Горение круглой микроструи чистого водорода и при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком SiO_2 исследовалось при различных скоростях истечения как микроструи водорода, так и спутной струи. Объемный расход газов Q ($\text{см}^3/\text{с}$) измерялся с помощью прецизионных расходомеров MKS – Instruments (США) с точностью $\pm 0,7\%$. Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U_0, \text{м/с} = Q, \text{см}^3/\text{с} / S, \text{см}^2$, 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/м^2) на входе ($P_{\text{редуктор}}$) и выходе ($P_{\text{атмосфера}}$) водорода из микросопла ($\Delta P = P_{\text{редуктор}} - P_{\text{атмосфера}}$). При этом $U_0, \text{м/с} = \sqrt{2\Delta P / \rho}$, где ρ , кГ/м^3 – плотность водорода.

Результаты экспериментов

Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком на дозвуковой скорости

На рис. 2, *a* показана теневая картина процесса горения круглой микроструи водорода в отсутствие спутной струи воздуха при объемном расходе газа $Q = 150 \text{ см}^3/\text{с}$ или скорости истечения $U_0 = 300 \text{ м/с}$ водорода. При наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (рис. 2, *b*) с объемным расходом смеси $Q = 110 \text{ см}^3/\text{с}$ или скорости $U_0 = 27,5 \text{ м/с}$ можно четко наблюдать процесс внедрения спутной струи смеси воздуха с нанопорошком в горящую микрострую водорода и интенсивное горение (плавление) смеси воздуха с нанопорошком, отмеченное на теневой картине оранжевым цветом.

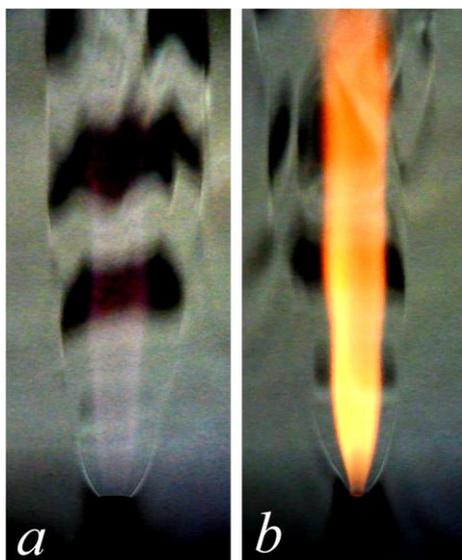


Рис. 2. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла в отсутствие спутного потока (*a*) ($Q, U_0 = 150 \text{ см}^3/\text{с}, 300 \text{ м/с}$) и из круглого микросопла ($Q, U_0 = 150 \text{ см}^3/\text{с}, 300 \text{ м/с}$) при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (*b*) ($Q, U_0 = 110 \text{ см}^3/\text{с}, 27,5 \text{ м/с}$)

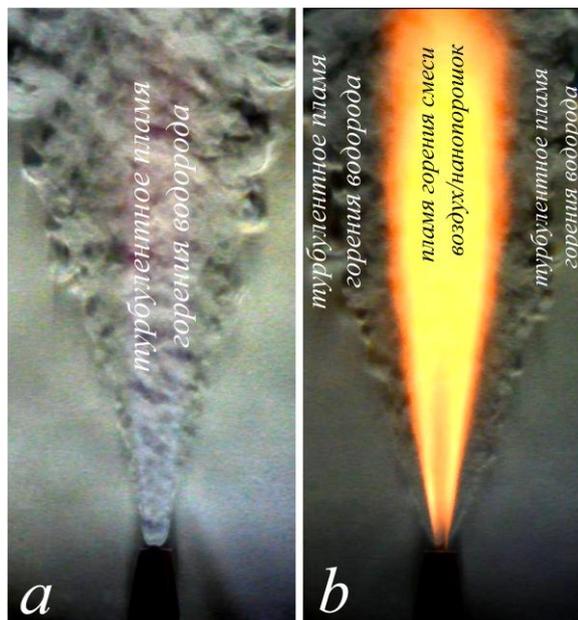
Fig. 2. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet without coaxial air jet (*a*) ($Q = 150 \text{ см}^3/\text{с}; U = 300 \text{ м/с}$), with a cocurrent coaxial air jet with nano powder at different flow rate: (*b*) – $Q = 110 \text{ см}^3/\text{с}, U = 27.5 \text{ м/с}$

На рис. 3, *a* показана теневая картина процесса горения круглой микроструи водорода в отсутствие спутного потока воздуха при объемном расходе газа $Q = 102 \text{ см}^3/\text{с}$ или скорости истечения $U_0 = 204 \text{ м/с}$ водорода, а на рис. 3, *b* показана теневая картина процесса горения круглой микроструи водорода при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком при объемном расходе смеси $Q = 18 \text{ см}^3/\text{с}$ или скорости истечения $U_0 = 4,5 \text{ м/с}$. Пламя водорода в отсутствие химических добавок практически бесцветно (см. рис. 3, *a*), а процесс горе-

ния нанопорошка, поступающего из спутного потока воздуха, в пламени водорода четко выделяется оранжевым цветом.

Рис. 3. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла в отсутствие спутной струи (а) ($Q, U_0 = 102 \text{ см}^3/\text{с}, 204 \text{ м/с}$) и из круглого микросопла ($Q, U_0 = 102 \text{ см}^3/\text{с}, 204 \text{ м/с}$) при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (б) ($Q, U_0 = 18 \text{ см}^3/\text{с}, 4,5 \text{ м/с}$)

Fig. 3. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet without coaxial air jet (a) ($Q = 102 \text{ см}^3/\text{с}; U = 204 \text{ м/с}$), with a coaxial air jet with nano powder at different flow rate: (b) – $Q = 18 \text{ см}^3/\text{с}, U = 4.5 \text{ м/с}$



Таким образом, горение круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла в отсутствие спутного потока (см. рис. 2, а, $Q, U_0 = 150 \text{ см}^3/\text{с}, 300 \text{ м/с}$) и из круглого микросопла при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (см. рис. 2, б, $Q, U_0 = 110 \text{ см}^3/\text{с}, 27,5 \text{ м/с}$) при максимальном расходе ($Q = 150 \text{ см}^3/\text{с}$) или скорости истечения ($U_0 = 300 \text{ м/с}$) газа демонстрирует наличие ламинарного пламени при горении водорода в отсутствие спутного потока и, с другой стороны, наличие ламинарного пламени при горении водорода в слабом спутном потоке смеси воздуха с нанопорошком, что приводит к интенсивному горению (плавлению) нанопорошка SiO_2 с образованием ламинарного пламени оранжевого цвета.

Показано, что горение круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла в отсутствие спутной струи воздуха (см. рис. 3, а ($Q, U_0 = 102 \text{ см}^3/\text{с}, 204 \text{ м/с}$) и из круглого микросопла при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (см. рис. 3, б, $Q, U_0 = 18 \text{ см}^3/\text{с}, 4,5 \text{ м/с}$) отличается от картин горения газа, представленных на рис. 2. Несмотря на меньшую скорость истечения как микроструи водорода, так и спутной струи, можно наблюдать наличие ламинарной области перетяжки пламени на срезе микросопла и турбулентное пламя далее вниз по потоку. Процесс взаимодействия микроструи водорода и спутной струи смеси воздуха с нанопорошком приводит к интенсивному горению нанопорошка в турбулентном пламени водорода, на что указывает появление ламинарного оранжевого пламени (см. рис. 3, б).

Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха с нанопорошком на сверхзвуковой скорости

На рис. 4 показаны теневые картины процесса горения круглой микроструи водорода при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком ($Q, U_0 = 200 \text{ см}^3/\text{с}, 50 \text{ м/с}$) при максимальном объемном расходе газа ($Q = 200 \text{ см}^3/\text{с}$) или скорости истечения ($U_0 = 400 \text{ м/с}$) водорода. Можно наблюдать отрыв турбулентного пламени водорода (см. рис. 4, б) и спутной

струи смеси воздуха с нанопорошком (см. рис. 4, *a*) от среза сопла, указывающий на сверхзвуковое горение как микроструи водорода, так и спутной струи смеси воздуха с нанопорошком.

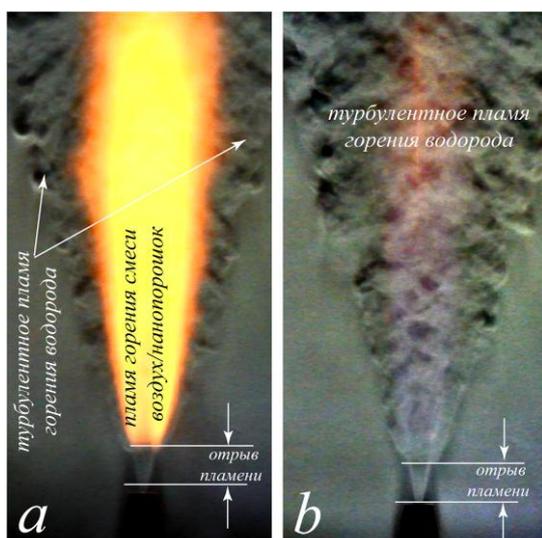


Рис. 4. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла (*a*) (Q , $U_0 = 200 \text{ см}^3/\text{с}$, 400 м/с) при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (*b*) (Q , $U_0 = 200 \text{ см}^3/\text{с}$, 50 м/с), сверхзвуковое горение

Fig. 4. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet ($Q = 200 \text{ см}^3/\text{с}$; $U = 400 \text{ м/с}$) with cocurrent coaxial air jet with nano powder ($Q = 200 \text{ см}^3/\text{с}$; $U = 50 \text{ м/с}$) for two different times

На рис. 5–7 показаны теневые картины процесса горения круглой микроструи водорода при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком при различном объемном расходе газа (Q , $\text{см}^3/\text{с}$) или скорости истечения (U_0 , м/с) как водорода, так и спутной струи смеси воздуха с нанопорошком. Можно наблюдать следующие особенности горения при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком: отрыв пламени водорода и спутной струи смеси воздуха с нанопорошком от среза сопла, указывающий на сверхзвуковое горение (см. рис. 5), наличие ламинарного пламени при горении как чистого водорода, так и при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком при низкой скорости истечения струй (см. рис. 6), наличие области перетяжки в пламени спутной струи смеси воздуха с нанопорошком, которая находится внутри области перетяжки пламени микроструи водорода, охватывающей первую область (см. рис. 7).

Таким образом, экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе смеси воздуха с нанопорошком на сверхзвуковой скорости их истечения показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1–7], сохраняются и в данной ситуации. Можно ясно видеть отрыв пламени от среза сопла как при горении микроструи водорода (см. рис. 5, *a*), так и при наличии спутной струи (см. рис. 5, *b, c*), что является одним из признаков сверхзвукового микрогорения. Экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе смеси воздуха с нанопорошком на дозвуковой скорости истечения показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1–5], сохраняются и в данной ситуации. Эти сценарии связаны с наличием области перетяжки в пламени микроструи водорода, сохраняющейся при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком (см. рис. 7). С ростом скорости истечения струй можно наблюдать интенсификацию свечения пламени при наличии спутного потока смеси воздуха с нанопорошком, что демонстрирует рис. 7, *b, c*, и наличие области перетяжки как в спутной струе, так и в пламени микроструи водорода. С другой стороны, можно наблюдать практически исчезновение области перетяжки пламени при приближении к трансзвуковым скоростям истечения струй (см. рис. 6). Еще одно наблюдение за процессом горения коаксиальной струи смеси воздуха с нанопорошком в среде горения микроструи водорода демонстрирует достаточно низкую скорость истечения спутной струи по сравнению со скоростью истечения мик-

роструи водорода, что, тем не менее, способствует интенсификации сгорания (плавления) нанопорошка.

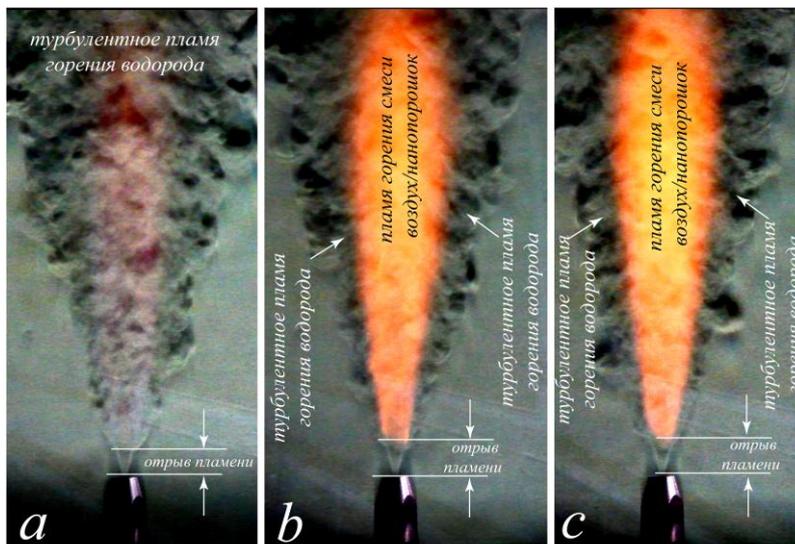


Рис. 5. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла при наличии / отсутствии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком при сверхзвуковой скорости истечения: $U_0 = 400$ м/с (без спутной струи) – *a*; 400 м/с, 4,5 м/с (со спутной струей) – *b*; 204 м/с, 9 м/с (со спутной струей) – *c*
 Fig. 5. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet with/without coaxial supersonic air jet with nano powder. Without – (a) $U = 400$ m/s, round hydrogen microjet $U = 400$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 4.5$ m/s – (b) and round hydrogen microjet $U = 204$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 9$ m/s – (c)

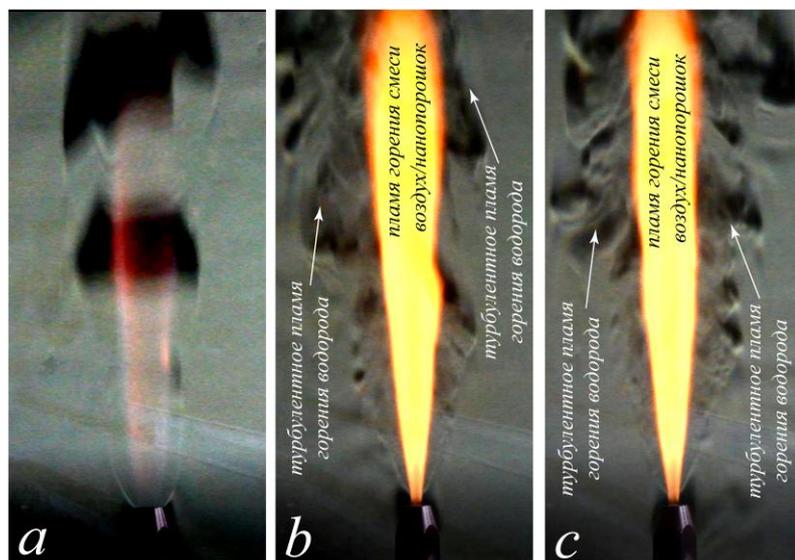


Рис. 6. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком на дозвуковой скорости ее истечения: $U_0 = 250$ м/с (без спутной струи) – *a*; 275 м/с, 4,5 м/с (со спутной струей) – *b*; 300 м/с, 9 м/с (со спутной струей) – *c*
 Fig. 6. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet with/without coaxial supersonic air jet with nano powder. Without – (a) $U = 250$ m/s, round hydrogen microjet $U = 275$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 4.5$ m/s – (b) and round hydrogen microjet $U = 300$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 9$ m/s – (c)

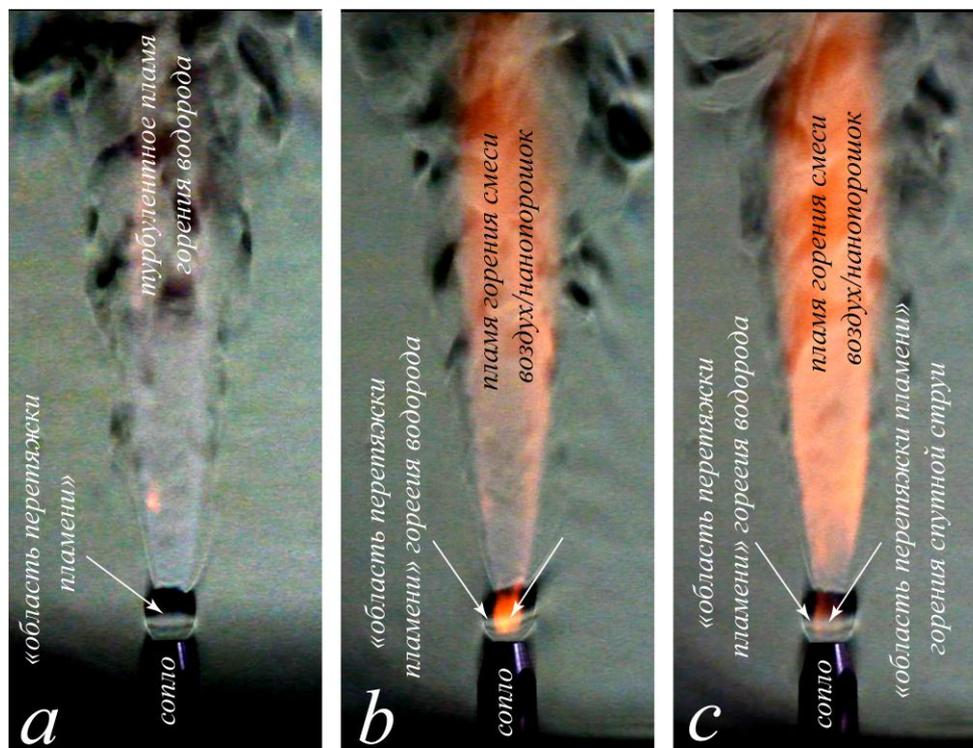


Рис. 7. Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла при наличии спутной струи смеси воздуха с нанопорошком на дозвуковой скорости ее истечения: $U_0 = 50$ м/с (без спутной струи) – а; 60 м/с, 4,5 м/с (со спутной струей) – б; 70 м/с, 9 м/с (со спутной струей) – в

Fig. 7. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet with/without coaxial supersonic air jet with nano powder. Without – (a) $U = 50$ m/s, round hydrogen microjet $U = 60$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 4.5$ m/s – (b) and round hydrogen microjet $U = 70$ m/s with a cocurrent coaxial air jet with nano powder $U = 9$ m/s – (c)

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований горения круглой микроструи водорода в коаксиальной спутной струе смеси воздуха с нанопорошком, истекающей из щелевого (многосоплового) коаксиального сопла на до- и сверхзвуковой скорости. Показано, что сценарии горения микроструи водорода в коаксиальной спутной струе смеси воздуха с нанопорошком аналогичны сценариям диффузионного горения микроструи водорода как при дозвуковой, так и при сверхзвуковой скорости истечения струй. Обнаружены наличие области перетяжки пламени при дозвуковой скорости и отрыв пламени от среза сопла при сверхзвуковой скорости истечения струи. Установлено, что с ростом скорости истечения струй можно наблюдать интенсификацию свечения пламени на границе потока водорода и смеси воздуха с нанопорошком и наличие области перетяжки пламени как в ламинарной спутной струе, так и в пламени микроструи водорода. С другой стороны, можно наблюдать практически исчезновение области перетяжки пламени при приближении к трансзвуковым скоростям истечения струй.

Список литературы / References

1. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27–41.
Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A. Different Conditions of the Round Hydrogen Jets Diffusion Combustion in Air. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 27–41. (in Russ.)
2. 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. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 52–66.
Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G. Structure of the Attached Flame during Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Slotted Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 52–66. (in Russ.)
3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 42–51.
Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A. Diffusion Hydrogen Microjet Combustion (Round Bevelled Nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 42–51. (in Russ.)
4. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, p. 457–462.
5. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28–45.
Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A. Experimental Study of the Diffusion Combustion of a High-Speed Round Hydrogen Microjet. Part 1. Attached Flame, Subsonic Flow. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 2, p. 28–45. (in Russ.)
6. 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. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457–468.
7. 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, vol. 41, iss. 44, p. 20240–20249.
8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 62–73.
Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental Study of the Diffusion Combustion of a Round Hydrogen Microjet at Its Ignition Far from the Nozzle Exit. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 3, p. 62–73. (in Russ.)
9. Kalghatgi G. T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air. *Combust. Sci. Technol.*, 1984, vol. 41, iss. 1-2, p. 14–29.
10. Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразных топлив // Химическая физика. Водород, параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008, С. 53–63.

- Annushkin Yu. M., Sverdlov E. D.** Investigation of the stability of diffusion flooding flame at subsonic and supersonic off-design nozzle at flowing of gaseous fuels. Chemical Physics. Hydrogen, combustion and explosion parameters. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, p. 53–63. (in Russ.)
11. **Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V.** Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8th International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.
12. **Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Коробейничев О. П.** Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2016, Т. 11, № 2. С. 56–76.
Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Korobeinichev O. P. Diffusion Combustion of the Round Microjet Mixture of Hydrogen with Metane, Helium and Nitrogen. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2016, vol. 11, no. 2, p. 56–76. (in Russ.)
13. **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 // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.
Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A. Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию
Received
08.04.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); профессор, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Principal Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

kozlov@itam.nsc.ru

Грек Генрих Рувимович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Genrich R. Grek, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

grek@itam.nsc.ru

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litmar@itam.nsc.ru

Литвиненко Юрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
litur@itam.nsc.ru

Тамбовцев Александр Сергеевич, лаборант, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Alexander S. Tambovtsev, Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
alsetams@gmail.com

Шмаков Андрей Геннадиевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия); доцент, Сибирский государственный университет геосистем и технологий (ул. Плахотного, 10, Новосибирск, 630108, Россия)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Senior Scientist, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Assistant Professor, Siberian State University of Geosystem and Technology (10 Plakhotny Str., Novosibirsk, 630108, Russian Federation)
shmakov@kinetics.nsc.ru