

УДК 532.525.2

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ ВОЗДУХА С КООКСИАЛЬНОЙ (СПУТНОЙ) СТРУЕЙ ВОДОРОДА

© 2021 г. В. В. Козлов^{1,2,*}, М. В. Литвиненко^{1,2}, Ю. А. Литвиненко¹,
А. С. Тамбовцев¹, А. Г. Шмаков^{2,3}

Представлено академиком РАН С.В. Алексеенко 27.11.2020 г.

Поступило 04.12.2020 г.

После доработки 04.12.2020 г.

Принято к публикации 18.12.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей диффузионного горения при взаимодействии круглой сверхзвуковой микроструи воздуха в центре и коаксиальной (спутной) струи водорода. Такое горение сопровождается целым рядом новых явлений: образованием конусообразной формы пламени близи среза сопла, запиранием области горения в этом конусе, наличием мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек в результирующем потоке, образованием ламинарных участков и их турбулизации.

Ключевые слова: круглая микроструя воздуха, спутная коаксиальная струя водорода, область «перетяжки» пламени, сверхзвуковые ячейки

DOI: 10.31857/S2686740021010089

По результатам работ [1–5] для водорода, истекающего из круглых сопел с диаметрами $d = 250 \div 500$ мкм, в зависимости от скорости истечения U_0 характерны следующие сценарии горения: 1) большая протяженность ламинарной струи ($U_0 \leq 150$ м/с); 2) разделение пламени на две зоны “перетяжкой” пламени, образование сферической зоны с ламинарным характером горения и турбулизацией пламени далее вверх по потоку ($U_0 \sim 150$ м/с); 3) реализация приподнятого турбулентного пламени при сохранении горения в ламинарной зоне; 4) сохранение горения в ламинарной области пламени и турбулентное течение водорода далее по потоку без горения ($U_0 \sim 331$ м/с); 5) прекращение горения микроструи ($U_0 > 331$ м/с).

Сферическая область пламени с ламинарным характером течения и горения в ней, охватываю-

щая верхнюю часть сопла, способствует стабилизации процесса горения в микроструе водорода, однако также способствует возникновению эффекта “запираания” сопла, и скорость истечения не превышает дозвуковых величин.

Одной из характеристик сверхзвукового струйного течения является наличие сверхзвуковых ячеек, которые также сохраняются в результирующем потоке при горении, но в ситуации пламени поднятого от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [6–8]. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11].

В работах [12, 13] было уделено внимание вопросам горения предварительно подготовленных смесей водорода с кислородом, метаном, азотом и гелием. Диапазон скоростей, в которых существовало горение без срыва пламени, был меньше, чем в случае чистого водорода. Тем не менее, за счет добавок водорода возможно расширить диапазон устойчивого горения метана и других углеводородов. При этом исследования горения микроструи смеси водорода с различными газами проведены в условиях их смешения до введения смеси в сопловой аппарат. Исследованию коаксиальных струй и особенно их взаимодействию посвящено значительно меньше работ, особенно экспериментальных. В теоретической работе [14]

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

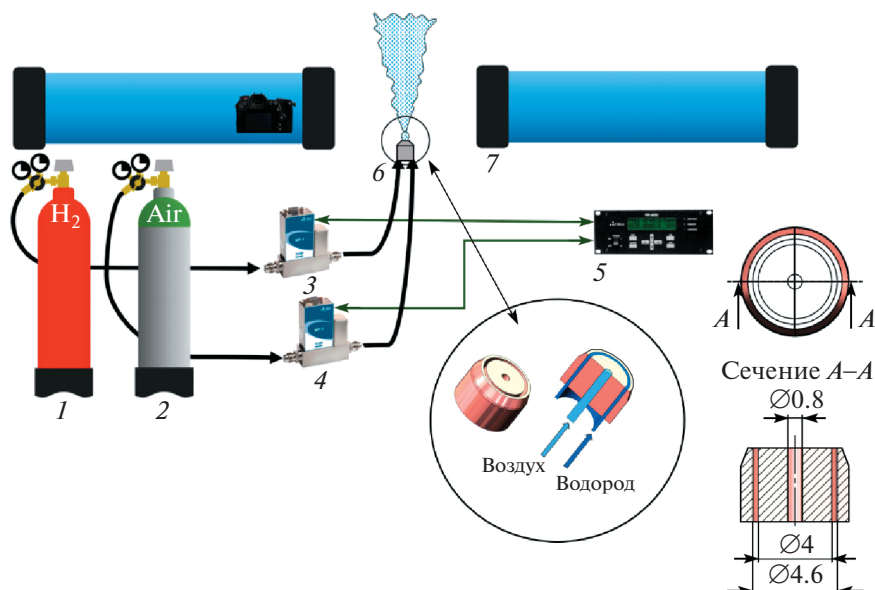


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – водород, 2 – воздух, 3, 4 – регуляторы расхода газа, 5 – блок управления расходомеров, 6 – сопловой аппарат, 7 – теневого аппарата Теплера.

показано развитие коаксиальной струи на до- и сверхзвуковой скорости и численно смоделировано наличие сверхзвуковых ячеек при сверхзвуковом истечении коаксиальной струи.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей развития и взаимодействия круглой микроструи воздуха, истекающей со сверхзвуковой скоростью, и коаксиальной (спутной) струи водорода при ее горении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Сопловой аппарат (6) подсоединен к двум анало-

гичным линиям подачи газов. Из баллонов газы (водород (1) или воздух (2)) поступают в клапаны регуляторов объемного расхода типа 1179В фирмы MKS Instruments (3), (4), которые обеспечивают точность измерения расхода в пределах 0.7%, с помощью 2-канального блока управления расходомеров PR 4000B-F (MKS Instruments) регулируется расход газов, подаваемых в сопловой аппарат. Теневая картина получена с помощью ИАБ-451 (7), изображение теневой картины записывается на цифровую видеокамеру. Параметры отверстий соплового аппарата: $S_1 = 0.5 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения выходного отверстия для воздуха ($\varnothing = 0.8 \text{ мм}$), $S_2 = 4 \text{ мм}^2$ – площадь коаксиальной щели соплового аппарата, из которой подается водород ($\varnothing = 4.0\text{--}4.6 \text{ мм}$).



Рис. 2. Теневые картины развития горящей коаксиальной струи водорода (при отсутствии центральной струи воздуха).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сценарий при диффузионном горении струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в затопленное воздушное пространство

Результаты экспериментов горения спутной (коаксиальной) струи водорода с ростом скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой скорости показаны на рис. 2.

При низкой скорости истечения струи можно наблюдать наличие ламинарного пламени, граница которого расширяется под заметным углом. С ростом скорости струи появляется область “перетяжки пламени” – когда в узкой области происходит турбулизация течения в пламени, так же, как и при горении струи водорода, истекающей

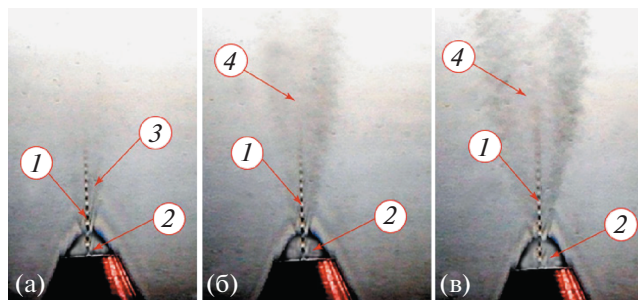


Рис. 3. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при ее сверхзвуковом истечении: 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха, 2 – область “запертого” пламени водорода, 3 – выход водорода из области 2, но в отсутствии его горения, 4 – локальное воспламенение, неустойчивое горение.

из круглого сопла, однако в данной ситуации мы не наблюдаем шарообразной формы, а возникающая область представляет полый цилиндр, присоединенный к соплу, с внешним диаметром, большим диаметра коаксиального сопла. Характер течения газового потока в области этого цилиндра ламинарный. При дальнейшем увеличении скорости истечения исчезает ламинарная часть пламени в цилиндре, наблюдается отрыв турбулентного пламени от среза сопла.

Рассмотрим сценарии диффузионного горения, когда в центре сопла будет истекать сверхзвуковая струя водорода.

Сценарии горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, при наличии в центре микроструи воздуха, истекающей со сверхзвуковой скоростью

Процесс развития области перетяжки пламени, ее специфической формы и трансформация с ростом скорости истечения коаксиальной струи при наличии сверхзвуковой струи воздуха показан на рис. 3, 4. Центральная микроструя воздуха истекает с постоянной сверхзвуковой скоростью, о чем свидетельствуют мелкомасштабные сверхзвуковые ячейки, которые также наблюдаются и в результирующем течении при наличии спутной струи водорода (при горении и без него).

При малой скорости истечения водорода из коаксиального сопла и поджигании вблизи сопла вместо полого ламинарного цилиндра, присоединенного к соплу, возникает конусообразная структура, границы которой хорошо видны на картинах визуализации (черные линии), внутри которой происходит горение, а дальше выходящая за границы вершины конуса смесь газов не воспламеняется, и это происходит в широком диапазоне скорости истечения водорода, т.е. происходит “запирание” пламени в этой конусообразной области (см. рис. 3а).

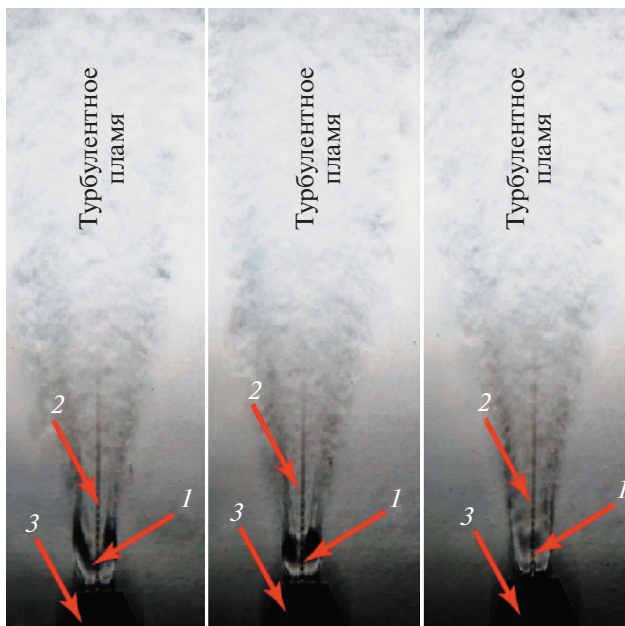


Рис. 4. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их до- и сверхзвуковом истечении из выходного сопла: 1 – ламинарный участок пламени, 2 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе, 3 – сопло горелки.

На рис. 3б, 3в показан момент воспламенения газовой смеси в верхней части струи, который сопровождается генерацией интенсивного акустического шума. На снимках видно появление в этом случае новых ударных волн (градиентов плотности газа) по всему конусу.

Дальнейшее развитие сценария горения спутной струи водорода при увеличении скорости истечения показано на рис. 4. Развивается ламинарный участок пламени, который приобретает некую сферическую форму, охватывающую сверхзвуковую часть воздушной струи, а затем при дальнейшем увеличении скорости истечения водорода его границы размываются, и он исчезает, мы наблюдаем только турбулентный участок пламени.

В целом, условно можно выделить следующие этапы горения спутной струи водорода при наличии в центре сверхзвуковой струи воздуха, в зависимости от скорости истечения водорода.

1. На начальном этапе, при малой скорости истечения водорода и поджигании вблизи сопла, горение пламени «запирается» в конусообразной области, присоединенной к соплу. Мы наблюдаем горение вблизи среза сопла, ограниченное областью конусообразной формы, при этом сверхзвуковая струя воздуха “прорезает” вершину этого конуса и через этот “прорыв” выбрасывается смесь воздуха и водорода, но в которой отсутствует горение.

2. При увеличении скорости истечения водорода происходит распространение пламени вниз по потоку и начинают образовываться локальные участки горения, появляется акустический шум, конусовидная область трансформируется в полусферу.

3. Устанавливается и развивается устойчивое турбулентное горение, сопровождающееся генерацией интенсивного акустического шума, а вблизи среза сопла возникают ламинарные участки, окружающие сверхзвуковую струю воздуха.

4. В дальнейшем турбулентная зона пламени смещается ближе к срезу сопла, ламинарный участок пламени размывается и исчезает.

При уменьшении скорости истечения водорода последовательно происходит обратимый переход от этапа 4 к этапу 1, все сценарии горения сохраняются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что при диффузионном горении одиночной струи водорода, истекающей при дозвуковой скорости из кольцевого микросопла в затопленное пространство, также характерен сценарий горения с наличием области “перетяжки” пламени, как для круглых и плоских микроструй [1–5]. Однако область перетяжки пламени претерпевает значительные геометрические деформации из-за специфики пламени коаксиальной струи.

В присутствии в центре сверхзвуковой микроструи воздуха горение коаксиальной струи водорода значительно меняется. Обнаружены следующие сценарии, последовательно реализующиеся при увеличении скорости истечения водорода:

1) “запирание” горения водорода в области конусовидной формы, выброс смеси водород/воздух вниз по течению в отсутствие горения (что можно применять для предварительного перемешивания газовых смесей);

2) образование полусферической области пламени вблизи среза сопла, локальное нестабильное горение турбулентного потока;

3) ламинарное пламя сферической формы вблизи среза сопла, установившееся турбулентное горение вниз по потоку;

4) развитое турбулентное пламя, начинающееся от среза сопла.

Также в данном случае мы не наблюдали уменьшения сферической зоны пламени при увеличении скорости истечения водорода, как это было в [1–5].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 075-15-2020-806.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейников О.П., Литвиненко Ю.А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 27–41.
2. Литвиненко Ю.А., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейников 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.
3. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестник НГУ. Физика. 2015. Т. 10. № 2. С. 42–51.
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. V. 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.
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 // Intern. J. of Hydrogen Energy. 2019. V. 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) // Intern. J. of Hydrogen Energy. 2016. V. 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.
9. 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.
10. 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.
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., Коробейников О.П. Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и

- азотом // Вестник НГУ. Физика. 2016. Т. 11. № 2. С. 56–76.
13. Шмаков А.Г., Вихорев В.В., Грек Г.П., 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.
14. Guariglia D., Schram C. Numerical Simulations of a Subsonic/Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup // Proc. the 2014 COMSOL. Conference in Cambridge.

DIFFUSION COMBUSTION AT INTERACTION OF SUPERSONIC ROUND MICROJET OF AIR WITH COAXIAL (SATELLITE) A JET OF HYDROGEN

V. V. Kozlov^{a,b}, 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 features of diffusion combustion in the interaction of a round supersonic micro-jet of air in the center and a coaxial (satellite) jet of hydrogen. Combustion such is accompanied by a number of new phenomena: the formation of a cone-shaped flame near the nozzle cut-off, the locking of the combustion region in this cone, the presence of small-scale supersonic cells in the resulting flow, the formation of laminar sections and their turbulization.

Keywords: air round micro jet, coaxial hydrogen jet, “bottleneck flame region”, small-scale shock cells