

## Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения

В. В. Козлов<sup>1,2</sup>, Г. Р. Грек<sup>1</sup>, М. В. Литвиненко<sup>1,2</sup>  
Ю. А. Литвиненко<sup>1</sup>, А. С. Тамбовцев<sup>1,2</sup>, А. Г. Шмаков<sup>3,4</sup>

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

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
Новосибирск, Россия*

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

<sup>4</sup> *Сибирский государственный университет геосистем и технологий  
Новосибирск, Россия*

### Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей взаимодействия круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения. Обнаружено, что горение коаксиальной (спутной) струи водорода с ростом скорости ее истечения сопровождается всеми сценариями, наблюдаемые при исследовании диффузионного горения круглой и плоской микроструй водорода. Однако область «перетяжки» пламени претерпевает значительные геометрические деформации из-за специфики пламени коаксиальной струи. Показано, что область перетяжки пламени трансформируется от Y-образной к сферической форме в процессе роста скорости истечения коаксиальной струи. Установлено, что взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной струей водорода при ее горении сопровождается целым рядом новых явлений: наличием конусообразной области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; наличием мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующем пламени; отсутствием горения водорода, истекающего из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; прорывом пламени из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла, что приводит к поджиганию водорода вниз по потоку, его интенсивному горению и резкому акустическому шуму; наличием турбулентного пламени, его отрыва от среза сопла и выхода на сверхзвуковое горение результирующей струи.

### Ключевые слова

круглая микроструя воздуха, спутная коаксиальная струя водорода, взаимодействие струй, область перетяжки пламени, до- и сверхзвуковое горение

### 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. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 53–63. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63

## Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux

V. V. Kozlov<sup>1,3</sup>, G. R. Grek<sup>1</sup>, M. V. Litvinenko<sup>1,2</sup>  
Yu. A. Litvinenko<sup>1</sup>, A. S. Tambovzev<sup>1,2</sup>, A. G. Shmakov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS  
Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>4</sup> *Siberian State University of Geosystem and Technology  
Novosibirsk, Russian Federation*

### Abstract

Results of experimental studies of the round air microjet interaction with a coaxial hydrogen jet at its combustion for supersonic speed jets efflux are presented in this work. It is revealed that combustion of the coaxial hydrogen jet with growth of its speed efflux is accompanied by all scenarios, observed at study of the round and plane hydrogen microjets diffusion combustion. However, “bottleneck flame region” undergoes considerable geometrical deformations because of specifics of a flame of a coaxial jet. It is shown that “bottleneck flame region” is transformed from Y-shaped to spherical shape in the activity of growth of a coaxial jet speed efflux. It is found that a round air microjet interaction with a coaxial hydrogen jet at its combustion is accompanied by several new phenomena: existence of cone-shaped area a coaxial jet combustion near a nozzle exit; existence of small-scale supersonic cells on a resultant flame; absence of the hydrogen combustion efflux from combustion region of a coaxial jet near nozzle exit; flame-out from combustion region of a coaxial jet near nozzle exit that leads to hydrogen ignition downstream, its intensive combustion and sharp acoustic noise occurrence; existence of a turbulent flame, to its separation from a nozzle exit and transition to supersonic combustion of a resultant jet.

### Keywords

air round microjet, coaxial hydrogen jet, interaction of jets, “bottleneck flame region”, subsonic and supersonic combustion

### 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., Tambovzev A. S., Shmakov A. G. Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 53–63. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63

## Введение

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–5] показали наличие различных сценариев протекания данного процесса в зависимости от нарастания скорости истечения микроструи в диапазоне диаметров выходного отверстия от 0,25 до 1 мм. Обнаружены следующие сценарии диффузионного горения круглой микроструи водорода.

1. Горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности ( $U_0 \leq 150$  м/с).

2. Возникновение сферической области «перетяжки» пламени с наличием в ней ламинарной микроструи и ламинарного пламени с турбулизацией микроструи и пламени при преодолении ламинарной микроструи узкой области градиента плотности газа ( $U_0 > 150$  м/с).

3. Отрыв турбулентного пламени от области перетяжки пламени ( $U_0 > 200$  м/с).

4. Прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени. Причем в данной ситуации горение в области перетяжки пла-

мени сохраняется, вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как «запирание сопла» [5; 6] ( $U_0 > 331$  м/с).

#### 5. Прекращение горения микроструи ( $U_0 \approx 331$ м/с).

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [2; 7]. Следует заметить, что запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода близкой к скорости звука в воздухе ( $U_0 \approx 331$  м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием области перетяжки пламени и существованием в ней горения.

Тем не менее нам не удалось выйти на сверхзвуковое диффузионное горение микроструи водорода по причине запирания сопла областью перетяжки пламени, которая приводила к нагреву выхода микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик сверхзвукового горения струйного течения, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [6; 8] при поджигании круглой микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации можно было наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в оторвавшемся от среза сопла пламени. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11].

С другой стороны, важно изучить влияние различных газообразных добавок в микрострую водорода на режимы ее горения. В работе [12] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, а также с гелием или азотом в круглой микроструе. Показано, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с одним из газов – метаном, гелием или азотом, связаны с образованием области перетяжки пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Установлено, что область перетяжки пламени имеет сферическую форму, где идет процесс смешения ламинарной струи смеси с окружающим воздухом и их горение. При преодолении узкой области мощного градиента плотности на границе сферической области ламинарная микроструя и пламя мгновенно турбулизуются. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород/метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установлено, что все перечисленные стадии горения смеси водород / метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи (200÷500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода (600÷800 м/с). Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водород / метан по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого турбулентного горения метана и других углеводородов. Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

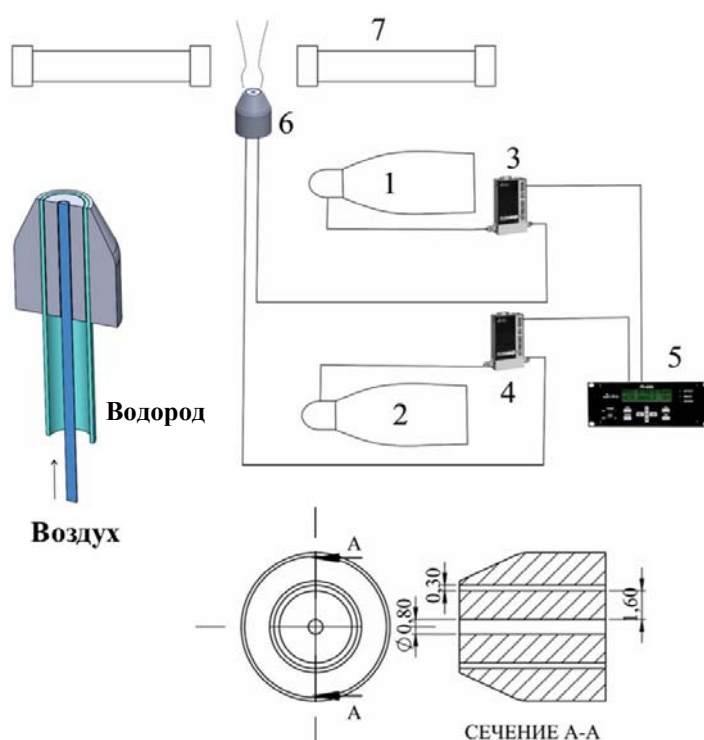
В работе [13] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) и горючим (углеводородный газ метан) газами, как в вышеизложенной ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования 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, процесс утонения (уменьшения поперечного сечения области пере-

тяжки пламени) которой растет с ростом скорости истечения микроструи. Следует заметить, что исследования горения микроструи смеси водорода с различными газами проведено 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] показано развитие коаксиальной струи на до- и сверхзвуковой скорости и численно смоделировано наличие сверхзвуковых ячеек при сверхзвуковом истечении коаксиальной щелевой струи. Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей развития и взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения.

### Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента.



$S_1$  – площадь круглого отверстия ввода воздуха  
 $S_2$  – площадь коаксиальной щели ввода спутной струи водорода  
 $S_1 = 0,005 \text{ см}^2$   
 $S_2 = 0,04 \text{ см}^2$

*Рис. 1.* Схема эксперимента взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения (1 – сжатый водород; 2 – сжатый воздух; 3, 4 – клапан расходомера; 5 – контроллер расходомера; 6 – сопло горелки; 7 – теневой прибор ИАБ-451). Внизу представлено сопло в разрезе

*Fig. 1.* Experimental sketch: 1 – hydrogen, 2 – air flow, 3, 4 – flow-meter valve, 5 – flow-meter controller, 6 – nozzle section, 7 – schlieren device; cross-section of the nozzle is shown in the bottom

В сопловое устройство через блок управления электромагнитными клапанами типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа подавался водород из баллона 100 атм. через центральное круглое отверстие горелки, а также сжатый воздух через коаксиальную щель горелки. Установка объемного расхода газов осуществлялась блоком управления, а показания расхода газов регистрировались электронным табло расходомеров. Процедура проведения исследований состояла из видеосъемки непосредственно процесса диффузионного горения микроструи чистого водорода в отсутствие и при наличии спутной струи воздуха, а также видеосъемки теневой картины данного процесса (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  $Q$  (см<sup>3</sup>/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 еще один метод определения скорости истечения микроструи по разности давления ( $\Delta P$ , кгс/м<sup>2</sup>) 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  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность водорода.

### Результаты экспериментов

#### Сценарий горения спутной (коаксиальной) струи водорода с ростом скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой скорости

Сценарий горения спутной (коаксиальной) струи водорода с ростом скорости ее истечения вплоть до сверхзвуковой скорости показан на рис. 2.

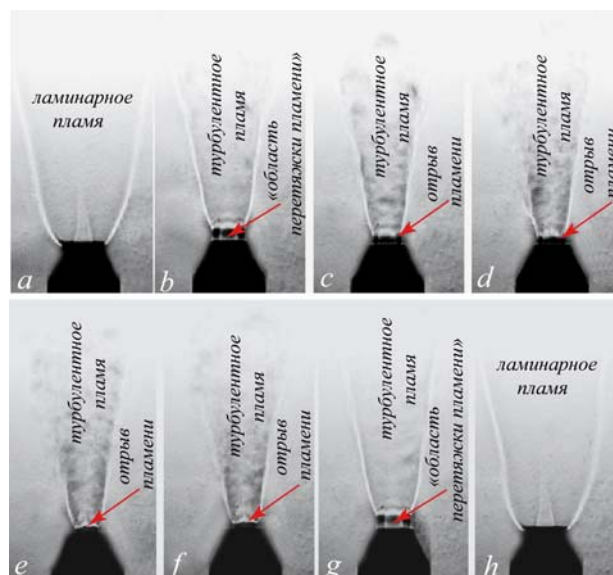


Рис. 2. Теневые картины развития горячей коаксиальной струи водорода при сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0

Fig. 2. Shadow patterns of the flame evolution at the diffusion combustion of coaxial jet of hydrogen at supersonic flowing from the nozzle № 0

Теневые картины горения коаксиальной (спутной) струи водорода в отсутствие ввода круглой микроструи воздуха демонстрируют следующие особенности данного процесса.

1. При низкой скорости истечения струи можно наблюдать наличие ламинарного пламени (см. рис. 2, *a, h*).

2. С ростом скорости струи появляется область перетяжки пламени (см. рис. 2, *b, g*), детальные исследования которой представлены в работах [1–5], но при горении круглых и плоских микроструй. Однако в данной ситуации мы наблюдаем возникновение области перетяжки пламени при горении коаксиальной струи, т. е. струи, представляющей собой полый цилиндр со всеми особенностями трансформации его пламени в данной области в некую специфическую геометрическую форму.

3. Далее можно наблюдать исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла (см. рис. 2, *c–f*), что указывает на сверхзвуковое горение коаксиальной струи, наличие турбулентного пламени, но при отсутствии характерных сверхзвуковых ячеек.

Более детально процесс развития области перетяжки пламени, ее специфической формы и ее трансформации с ростом скорости истечения коаксиальной струи показан на рис. 3 в ситуации взаимодействия круглой микроструи воздуха и коаксиальной (спутной) струи водорода при ее горении. Видно, что форма области перетяжки пламени трансформируется из Y-образной в шарообразную с уменьшением ее геометрического размера и ростом скорости истечения струи. Можно также наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек на круглой микроструе воздуха.

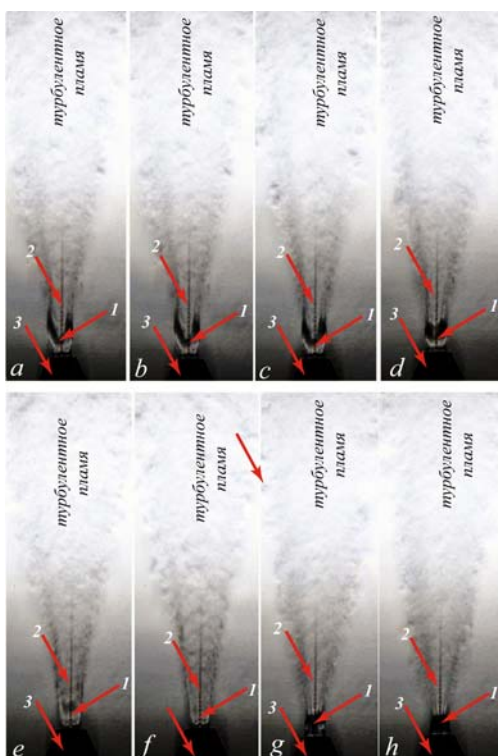


Рис. 3. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их до- и сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0: 1 – область перетяжки пламени; 2 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе; 3 – сопло горелки

Fig. 3. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at subsonic and supersonic their flowing from nozzle № 0: 1 – bottleneck-flame region; 2 – supersonic cells on the round microjet; 3 – nozzle of the burner

### Сценарий взаимодействия круглой микроструи воздуха и спутной (коаксиальной) струи водорода при ее горении на сверхзвуковой скорости истечения струй

Схема эксперимента № 1 представлена на рис. 1. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0 демонстрируют следующие особенности данного процесса (рис. 4, 5).

1. Наличие сверхзвуковых ячеек на круглой микроструе воздуха на всем протяжении нарастания скорости истечения сверхзвуковых струй.
2. Наличие горения смеси водород / воздух вблизи выходной щели коаксиальной струи, но его отсутствие вниз по потоку.
3. Прорыв пламени из области вблизи выходной щели, воспламенение смеси водород / воздух с резким акустическим шумом при ее горении и нарастании скорости истечения.
4. Отрыв пламени от среза сопла, сверхзвуковое горение смеси водород / воздух.

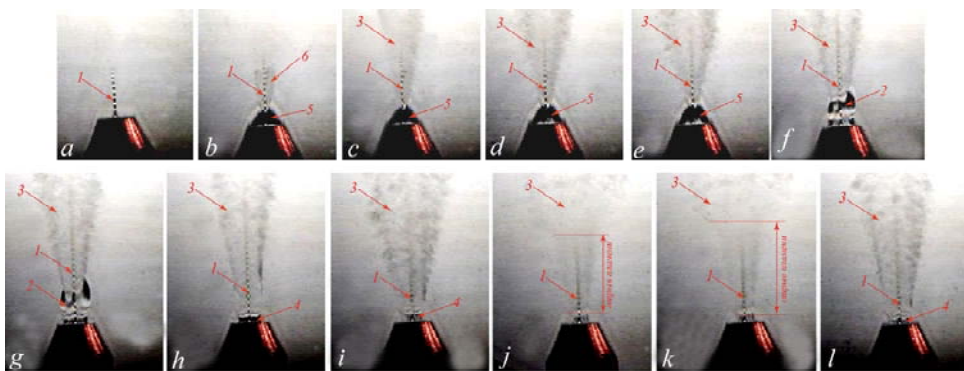


Рис. 4. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении из выходного сопла № 0: 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха; 2 – области перетяжки пламени; 3 – турбулентное пламя; 4 – отрыв пламени от среза сопла; 5 – область горения водорода коаксиальной струи вблизи среза сопла; 6 – выход водорода из области 5, но в отсутствие его горения

Fig. 4. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at supersonic flowing from the nozzle № 0: 1 – supersonic cells on the round air microjet; 2 – bottleneck-flame region; 3 – turbulent flame; 4 – flame separation from the nozzle exit; 5 – region of coaxial jet hydrogen combustion near the nozzle exit; 6 – output of hydrogen from region 5 but without its combustion

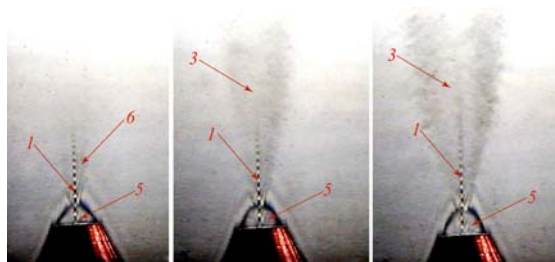


Рис. 5. Теневые картины взаимодействия горячей коаксиальной струи водорода и круглой микроструи воздуха при их сверхзвуковом истечении: 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха; 3 – турбулентное пламя; 5 – область горения водорода коаксиальной струи вблизи среза сопла; 6 – выход водорода из области 5, но в отсутствие его горения

Fig. 5. Shadow images of the burning coaxial hydrogen jet interacting with the cocurrent round air microjet at supersonic flowing: 1 – supersonic cells on the round air microjet; 3 – turbulent flame; 5 – region of coaxial jet hydrogen combustion near the nozzle exit; 6 – output of hydrogen from region 5 but without its combustion

### Заключение

Обнаружено, что горение коаксиальной (спутной) струи водорода с ростом скорости ее истечения сопровождается всеми сценариями, наблюдаемые в работах [1–5] при исследовании диффузионного горения круглой и плоской микроструй водорода. Однако область перетяжки пламени претерпевает значительные геометрические деформации из-за специфики пламени коаксиальной струи. Показано, что область перетяжки пламени трансформируется от Y-образной к сферической форме в процессе роста скорости истечения коаксиальной струи. Установлено, что взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной струей водорода при ее горении сопровождается целым рядом новых явлений: 1) наличием конусообразной области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; 2) наличием мелкомасштабных сверхзвуковых ячеек на результирующем пламени; 3) отсутствием горения водорода, истекающего из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла; 4) прорывом пламени из области горения коаксиальной струи вблизи среза сопла, что приводит к поджиганию водорода вниз по потоку, его интенсивному горению и резкому акустическому шуму; 5) наличием турбулентного пламени, его отрывом от среза сопла и выходом на сверхзвуковое горение результирующей струи.

### Список литературы

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.
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.
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.
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.
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.
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.
11. **Shentsov V., Sakatsume R., Makarov D., Takeno K., Molkov V.** Lift-off and blow-out of under-expanded jets: experiments versus simulations. In: 8<sup>th</sup> 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.
  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.
  14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: Proceedings of the 2014 COMSOL Conference. Cambridge, 2014.

### References

1. **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. **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. **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. **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. **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. **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. In: 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: 8<sup>th</sup> International Seminar on Fire and Explosion. Hefei, China, 2016.

12. **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. **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.)
14. **Guariglia D., Schram C.** Numerical Simulations of a Subsonic / Supersonic Coaxial Jet for an Efficient Design of Experimental Setup. In: *Proceedings of the 2014 COMSOL Conference*. Cambridge, 2014.

*Материал поступил в редколлегию  
Received  
29.07.2019*

### 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, заведующий лабораторией, 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), Head of Laboratory, 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