

УДК 532.525.2

DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-21-34

## Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха

**В. В. Козлов**<sup>1,2</sup>, **Г. Р. Грек**<sup>1</sup>, **М. М. Катасонов**<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 горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха. Показано, что сценарий горения связан с наличием «области перетяжки пламени», 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. Установлено, что горение круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости сопровождается наличием сверхзвуковых ячеек как в микроструе водорода, так и в спутной струе воздуха. Сверхзвуковое горение круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха связано с отрывом пламени от среза сопла.

### *Ключевые слова*

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

### *Источник финансирования*

Работа поддержана грантом РФФИ № 16-19-10330

### *Для цитирования*

Козлов В. В., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 2. С. 21–34. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-21-34

## Features of the Round Hydrogen Microjet Combustion in a Coaxial Air Jet

V. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, G. R. Grek<sup>1</sup>, M. M. Katasonov<sup>1</sup>, M. V. Litvinenko<sup>1,2</sup>  
Yu. A. Litvinenko<sup>1</sup>, A. S. Tambovtsev<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 features of the round hydrogen microjet combustion in a coaxial air jet are presented in this work. It is shown that the combustion scenario is connected with existence of the «bottleneck flame region». This fact correlates with the similar scenarios of the diffusion hydrogen microjet combustion at subsonic efflux velocity investigated by us earlier. It is revealed that the spherical shape of the “bottleneck flame region” is transformed to a cylindrical shape. It is found that the round hydrogen microjet combustion in a coaxial air jet at supersonic efflux velocity is accompanied by existence of supersonic cells both in a hydrogen microjet and in a wake of coaxial air jet. Round hydrogen microjet supersonic combustion in a coaxial air jet is connected with a flame separation from a nozzle exit.

### Keywords

round hydrogen microjet combustion, coaxial air jet, “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., Katasonov M. M., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G. Features of the Round Hydrogen Microjet Combustion in a Coaxial Air Jet. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 21–34. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-2-21-34

## 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 микроструей 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 пламени сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, но 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 дос-

тижении 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 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 и в струе, 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 смеси 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 водорода с метаном 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 водорода с метаном 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 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 турбулентного горения метана и других углеводородов. Показано, 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 [13] рассмотрены особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) и горючим (углеводородный газ метан), как в описанной выше ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом). Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей 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. Следует заметить, что ранее выполненные исследования горения микроструи смеси водорода с различными газами проведены в условиях их смешения до введения смеси в сопловой аппарат.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей горения круглой микроструи водорода в условиях наличия спутной струи воздуха, истекающей из коаксиальной щели, 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 микроструй 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 подавались 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 воздуха, а также в видеосъемке теневой картины данного процесса (теневой метод Тейлера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

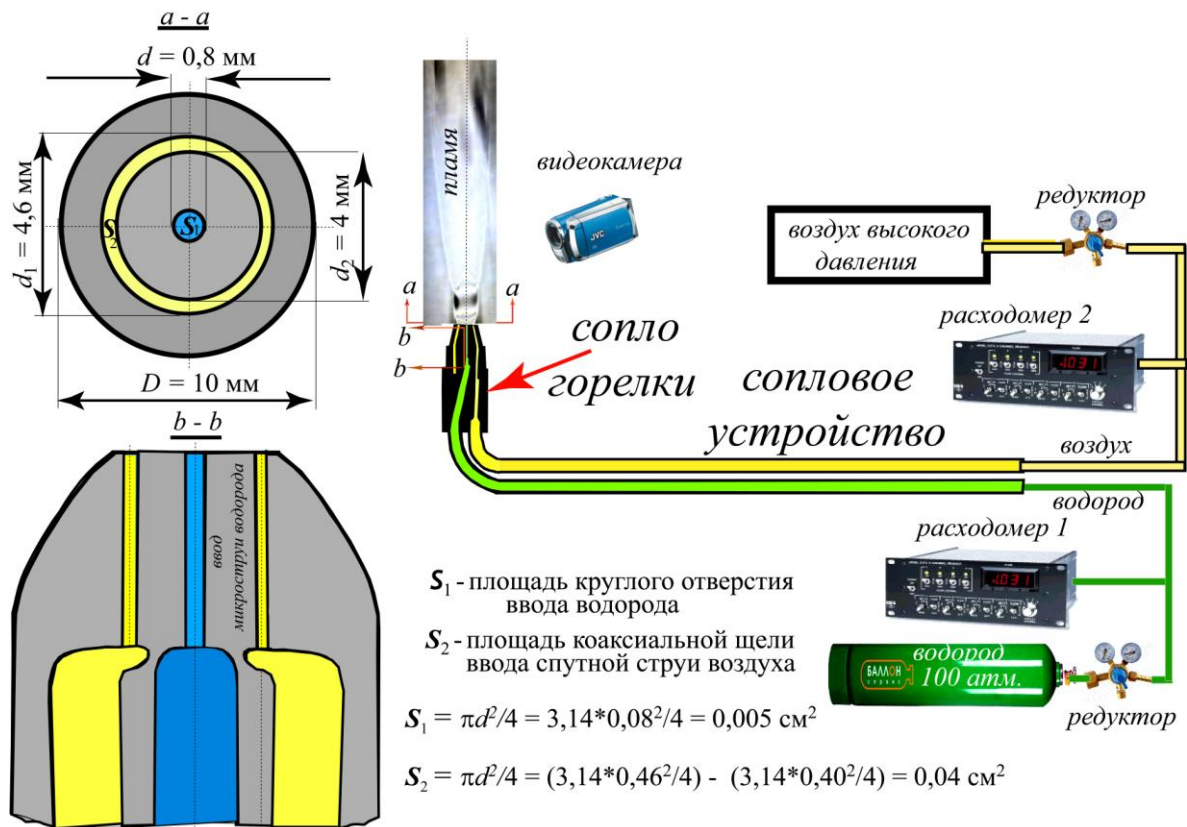


Рис. 1. Схема эксперимента  
Fig. 1. Experimental Sketch

Горение круглой микроструи чистого водорода и при наличии спутной струи воздуха исследовалось при различных скоростях истечения как микроструи водорода, так и спутной струи воздуха. 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 ( $\Delta P, \text{кГс/м}^2$ ) 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  $\rho, \text{кГ/м}^3$  – плотность водорода.

### Результаты экспериментов

#### *Сценарий истечения в отсутствие горения круглой микроструи воздуха и одновременно спутной и круглой струи воздуха на сверхзвуковой скорости*

Рисунок 2 демонстрирует сверхзвуковое истечение из одного и того же микросопла микроструи воздуха и водорода. Можно четко наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек в обоих случаях. Однако видно и несколько отличий. Масштаб и периодичность следования сверхзвуковых ячеек несколько отличаются в этих двух случаях, и ясно видно, что микроструя воздуха практически не расширяется, в то время как микроструя водорода подвержена коническому уширению вниз по потоку.

*Рис. 2.* Теневые картины сверхзвукового истечения круглой микроструи воздуха (а) и водорода (б) при наличии сверхзвуковых ячеек и отсутствии спутного потока ( $Q \approx 170 \text{ см}^3/\text{с}$ ) или скорости истечения ( $U_0 \approx 340 \text{ м/с}$ ) газа

*Fig. 2.* Shadow images of supersonic round microjets of air (a) and hydrogen (b) without cocurrent flow ( $Q = 170 \text{ cm}^3/\text{s}$  or  $U_0 = 340 \text{ m/s}$ )

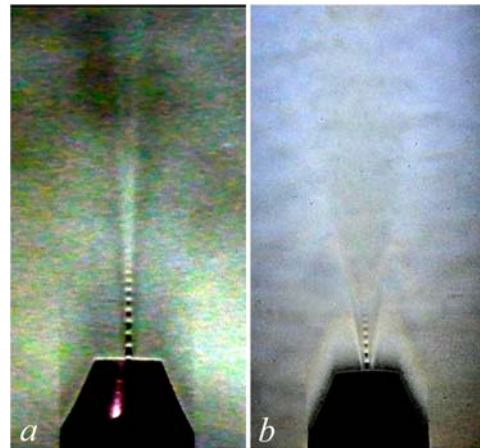


Рисунок 3, а демонстрирует сверхзвуковое истечение микроструи воздуха из микросопла в отсутствие спутной струи, а рис. 3, б – сверхзвуковое истечение микроструи воздуха из центрального отверстия микросопла при наличии спутной струи. Наличие спутной и центральной струи также приводит к выходу коаксиальной микроструи на сверхзвуковую скорость, на что указывает наличие сверхзвуковых ячеек на спутной струе воздуха (см. рис. 3, б).

На рис. 4 демонстрируется сверхзвуковое истечение микроструи воздуха из плоской щели, имитирующей коаксиальную щель выходного сопла спутной микроструи и имеющей с ней одни и те же геометрические размеры:  $h = 0,8 \text{ мм}$ ,  $l \approx 13 \text{ мм}$ . Ясно видно наличие сверхзвуковых ячеек в данном случае, как и в ситуации, представленной на рис. 3.



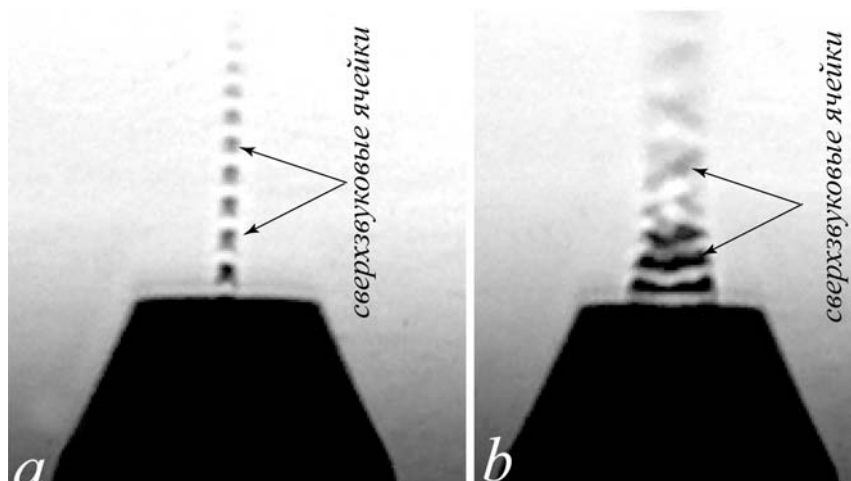


Рис. 3. Теневые картины круглой микроструи воздуха, истекающей из центрального круглого (а) и из круглого и коаксиального (б) отверстий горелки при максимальном расходе газа или скорости истечения ( $U_0 \approx 340$  м/с) газа

Fig. 3. Shadow images of a round air microjet flowing from a central round nozzle (a) and from coaxial round nozzle (b) at maximum gas flowrate or  $U_0 = 340$  m/s

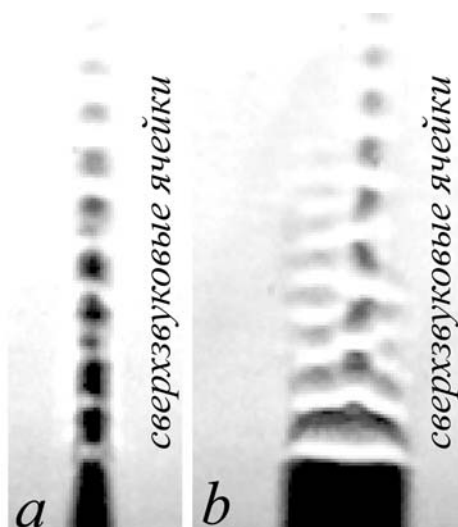


Рис. 4. Теневые картины плоской микроструи воздуха с узкой (а) и широкой (б) стороны плоского микросопла при ее истечении на сверхзвуковой скорости из плоской щели, имитирующей коаксиальную щель выходного сопла спутной микроструи и имеющей с ней одни и те же геометрические размеры:  $h = 0,8$  мм,  $l \approx 13$  мм

Fig. 4. Shadow images of plane air microjet, view of the smaller side (a), view of the bigger side (b) at a supersonic velocity, simulating coaxial nozzle with the same geometric parameters with it:  $h = 0.8$  mm,  $l = 13$  mm

Рисунок 5 демонстрирует сверхзвуковое истечение микроструи воздуха из плоской щели, имитирующей коаксиальную щель выходного сопла спутной микроструи и имеющей с ней одни и те же геометрические размеры:  $h = 0,8$  мм,  $l \approx 13$  мм. Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек в данном случае, как и в ситуации, представленной на рис. 3, тем не менее следует отметить изменение масштаба и частоты следования сверхзвуковых ячеек с ростом скорости истечения струи.

На рис. 6 показаны теневые картины круглой микроструи воздуха (а, б) и спутной микроструи воздуха (с–г) при их истечении на сверхзвуковой скорости по воздуху ( $U \geq 340$  м/с). Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек в двух ситуациях. Однако следует отметить, как и в ситуации, представленной на рис. 5, уменьшение поперечного размера спутной микроструи вниз по потоку с ростом скорости ее истечения.

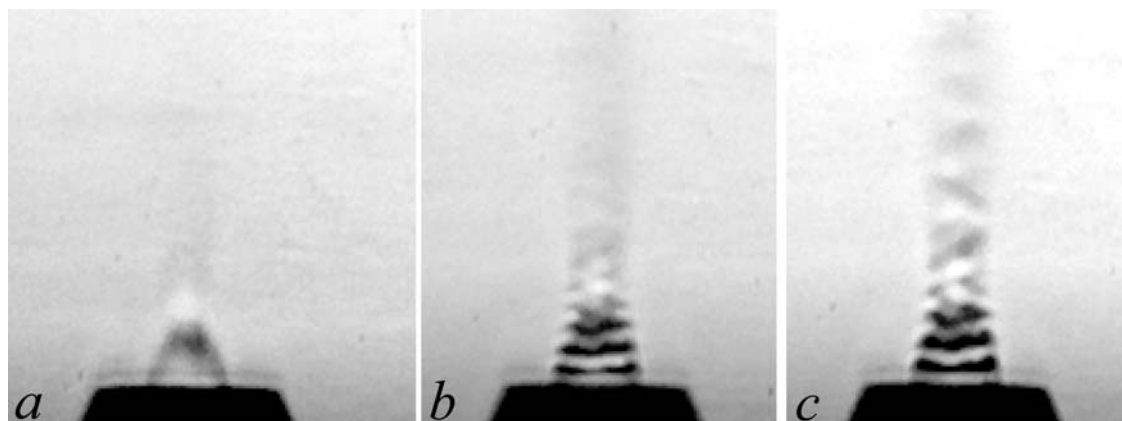


Рис. 5. Теневые картины спутной микроструи воздуха при ее истечении на сверхзвуковой скорости:  
*a* – 4 атм., *b* – 6 атм., *c* – 7 атм.

Fig. 5. Shadow images of a cocurrent air microjet at supersonic velocity:  
*a* – 4 atm., *b* – 6 atm., *c* – 7 atm.

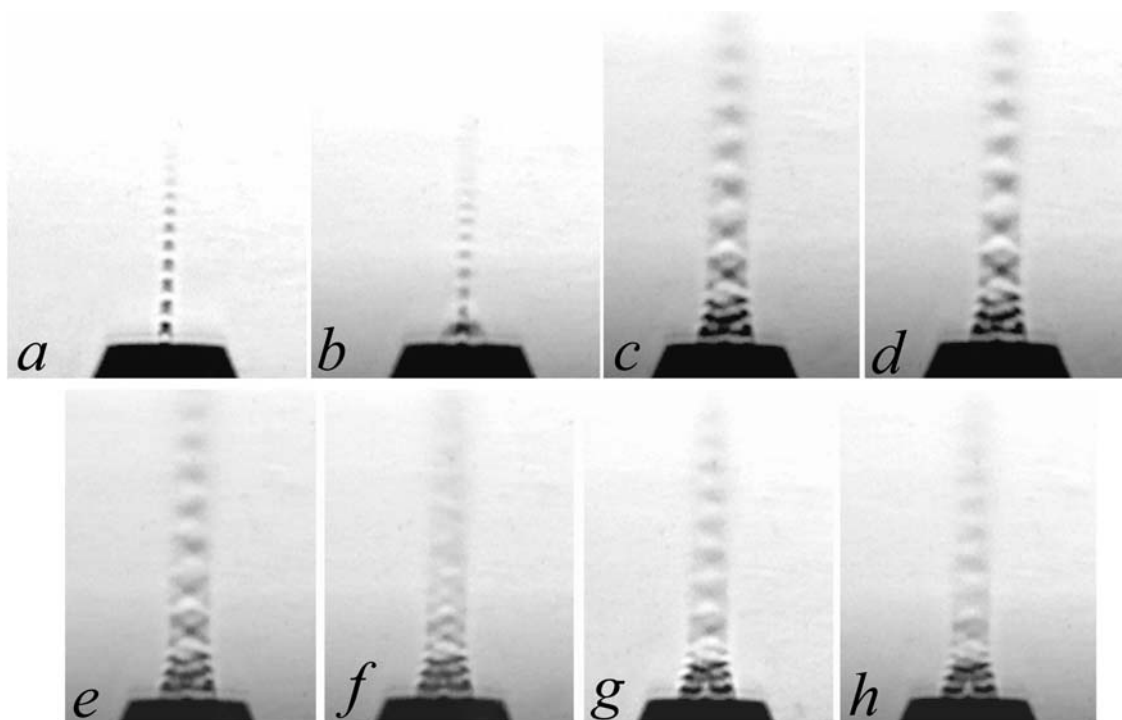
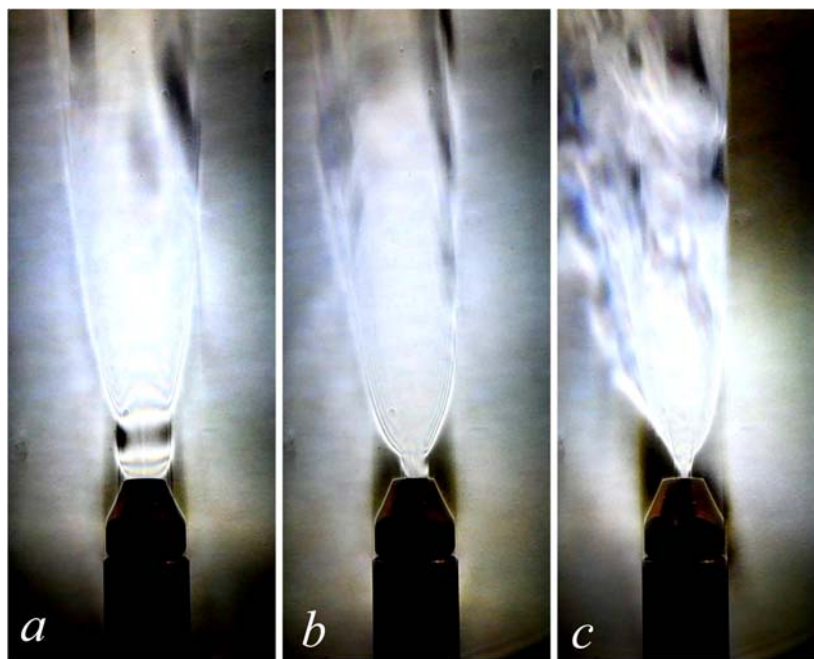


Рис. 6. Теневые картины круглой микроструи воздуха (*a*, *b*) и спутной микроструи воздуха (*c–h*)  
 при их истечении на сверхзвуковой скорости по воздуху ( $U \geq 340$  м/с)

Fig. 6. Shadow images of a round air microjet (*a*, *b*) and a cocurrent air microjet (*c–h*)  
 at supersonic air velocity ( $U \geq 340$  m/s)

*Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе  
на дозвуковой скорости*

На рис. 7, 8 показаны теневые картины процесса горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от объемного расхода газа ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с) или скорости истечения ( $U_0$ , м/с) водорода и спутной струи. В отсутствие спутной струи (рис. 7, *a*) 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. 7, *b*, *c*; 8, *a–c*) и различном объемном расходе ( $Q$ ) или скорости ( $U_0$ ) ее истечения, но сохранении объемного расхода ( $Q = 102$  см<sup>3</sup>/с) или скорости ( $U_0 = 204$  м/с) истечения микроструи водорода, область перетяжки пламени сохраняется, но претерпевает определенные изменения. Сферическая форма области перетяжки пламени трансформируется в цилиндрическую форму, однако сама динамика уменьшения ее пространственного размера с ростом скорости истечения микроструи водорода сохраняется [1–5], но уже в условиях роста скорости истечения спутной струи, а не самой микроструи водорода. С ростом скорости истечения спутной струи (рис. 9), 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.



*Рис. 7.* Теневые картины горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от объемного расхода газа ( $Q$ , см<sup>3</sup>/с) или скорости истечения ( $U_0$ , м/с) водорода и спутной струи: *a* – водород ( $Q; U = 102; 204$ ), *b* – спутная струя ( $Q; U = 0, 18, 35; 0, 4, 5, 8, 75$ ) соответственно

*Fig. 7.* Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet without coaxial air jet (*a*) ( $Q = 102$  см<sup>3</sup>/с;  $U = 204$  м/с), with a coaxial air jet at different flow rate (*b*) –  $Q = 18$  см<sup>3</sup>/с,  $U = 4.5$  м/с and (*c*) –  $Q = 35$  см<sup>3</sup>/с,  $U = 8.75$  м/с



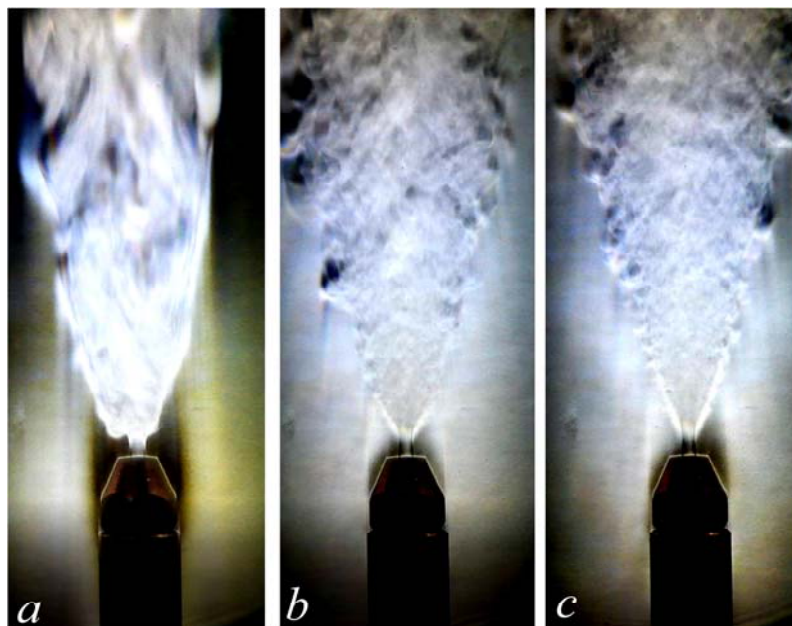


Рис. 8. Теневые картины горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от объемного расхода газа ( $Q$ ,  $\text{см}^3/\text{с}$ ) или скорости истечения ( $U_0$ ,  $\text{м/с}$ ) водорода и спутной струи:  $a$  – водород ( $Q; U = 102; 204$ ),  $b$  – спутная струя ( $Q; U = 70, 140, 200; 17,5, 35, 50$ ) соответственно

Fig. 8. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet  $Q = 18 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 4.5 \text{ m/s}$  with a coaxial air jet at different flow rate: (a) –  $Q = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 17.5 \text{ m/s}$  (b) –  $Q = 140 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 35 \text{ m/s}$ , and (c) –  $Q = 200 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 50 \text{ m/s}$

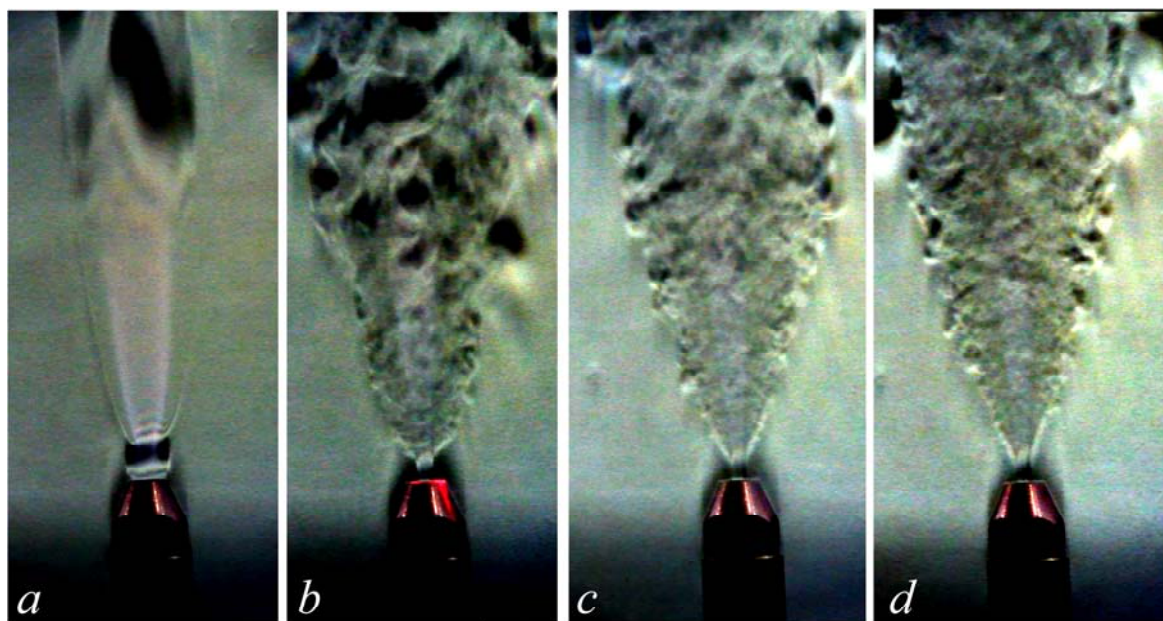


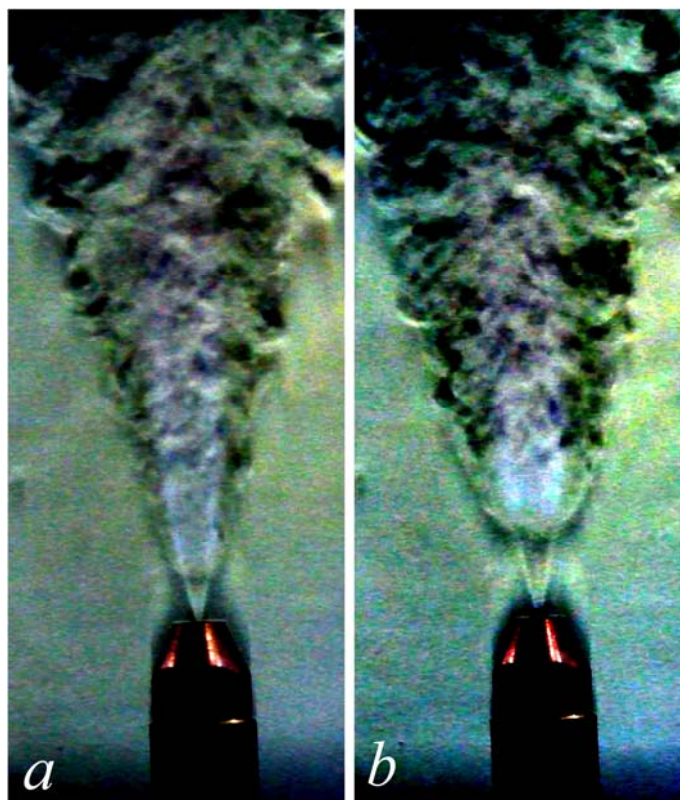
Рис. 9. Теневые картины горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха в зависимости от объемного расхода газа ( $Q$ ,  $\text{см}^3/\text{с}$ ) или скорости истечения ( $U_0$ ,  $\text{м/с}$ ) водорода и спутной струи:  $a$  – водород ( $Q; U = 102; 204$ );  $b$  – спутная струя ( $Q; U = 0, 70, 140, 200; 0, 17,5, 35, 50$ ) соответственно

Fig. 9. Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet without coaxial air jet (a) ( $Q = 102 \text{ cm}^3/\text{s}$ ;  $U = 204 \text{ m/s}$ ), with a coaxial air jet at different flow rate: (b) –  $Q = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 17.5 \text{ m/s}$  (c) –  $Q = 140 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 35 \text{ m/s}$ , and (d) –  $Q = 200 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $U = 50 \text{ m/s}$

Таким образом, экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на дозвуковой скорости показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1–5], сохраняются и в данной ситуации, но 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.

*Сценарий горения круглой микроструи водорода в спутной струе на сверхзвуковой скорости*

Рисунок 10, *a* демонстрирует сверхзвуковое горение круглой микроструи водорода в отсутствие спутной струи ( $Q = 170 \text{ см}^3/\text{с}$ ) или скорости истечения ( $U_0 \approx 340 \text{ м/с}$ ), а рис. 10, *b* – сверхзвуковое горение круглой микроструи водорода ( $Q; U = 170 \text{ см}^3/\text{с}; 340 \text{ м/с}$ ) при наличии спутной струи ( $Q; U = 200 \text{ см}^3/\text{с}; 50 \text{ м/с}$ ). Можно наблюдать отрыв пламени от среза микросопла в обеих ситуациях и интенсивное турбулентное горение сверхзвуковой микроструи водорода. Следует отметить увеличение отрыва пламени от среза сопла в ситуации наличия спутной струи воздуха (см. рис. 10, *b*).



*Рис. 10.* Теневые картины горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглой (*a*) и из круглого и коаксиального (*b*) отверстий горелки одновременно при максимальном расходе ( $Q = 170 \text{ см}^3/\text{с}$ ) или скорости истечения ( $U_0 = 340 \text{ м/с}$ ) газа: *a* – микроструя водорода в отсутствие спутной струи ( $Q; U = 170; 340$ ), *b* – при наличии спутной струи ( $Q; U = 200; 50$ ) соответственно

*Fig. 10.* Shadow images of combustion of a round hydrogen microjet without coaxial air jet (*a*) ( $Q = 170 \text{ cm}^3/\text{s}; U = 340 \text{ m/s}$ ), with a coaxial air jet at different flow rate: (*b*) –  $Q = 200 \text{ cm}^3/\text{s}, U = 50 \text{ m/s}$

Таким образом, экспериментальные исследования горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости показали, что сценарии диффузионного горения микроструй водорода, исследованные нами ранее [1–5], сохраняются и в данной ситуации.

### Заключение

Установлено, что как при дозвуковом, так и при сверхзвуковом горении круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха, сценарии процессов совпадают со сценарием диффузионного горения микроструи чистого водорода. К ним относятся:

- 1) наличие области перетяжки пламени при дозвуковом горении;
- 2) исчезновение области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла при сверхзвуковом горении.

Обнаружено, что в ситуации отсутствия горения и спутного потока микроструи воздуха и водорода демонстрируют наличие сверхзвуковых ячеек при сверхзвуковом истечении. Однако микроструя воздуха фокусировалась в узкую цилиндрическую струю, в то время как микроструя водорода, наоборот, конически расширялась. Выявлено, что сверхзвуковые ячейки при истечении плоской микроструи воздуха из плоской щели спутной струи, имитирующей геометрические параметры коаксиальной щели выходного сопла спутной микроструи, идентичны, несмотря на различия формы и конфигурации ячеек у плоской и круглой микроструй.

Обнаружены особенности горения круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха. Показано, что сценарий горения связан с наличием области перетяжки пламени, и данный эффект коррелирует с аналогичными сценариями диффузионного горения микроструи водорода, истекающей на дозвуковой скорости в покоящийся воздух, исследованными нами ранее. Обнаружено, что сферическая форма области перетяжки пламени трансформируется в цилиндрическую форму. Установлено, что горение круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха на сверхзвуковой скорости сопровождается наличием сверхзвуковых ячеек как в микроструе водорода, так и в спутной струе воздуха. Сверхзвуковое горение круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной струе воздуха связано с отрывом пламени от среза сопла.

### 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., Сverdlov E. D.** 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: 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.
- 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 Methane, 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*  
*03.04.2019*

### 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

**Катасонов Михаил Михайлович**, 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)

**Mikhail M. Katasonov**, 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)

mikhail@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