

УДК 532.525.2

## ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ

© 2020 г. Ю. А. Литвиненко<sup>1</sup>, Г. Р. Грек<sup>1</sup>, В. В. Козлов<sup>1,2,\*</sup>,  
М. В. Литвиненко<sup>1,2</sup>, А. Г. Шмаков<sup>2,3</sup>

Представлено академиком РАН С.В. Алексеенко 11.06.2020 г.

Поступило 15.06.2020 г.

После доработки 15.06.2020 г.

Принято к публикации 18.06.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из сопла при до- и сверхзвуковой скорости. Впервые выделены четыре сценария диффузионного горения круглой микроструи водорода, включая сверхзвуковое горение при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Установлено, что стабилизация пламени при дозвуковой скорости истечения микроструи водорода связана с наличием “области перетяжки пламени”, приводящей к явлению запираания сопла, а стабилизация пламени при сверхзвуковом истечении микроструи связана с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа воспламенения микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения).

**Ключевые слова:** круглая микроструя водорода, диффузионное горение, “область перетяжки пламени”, до- и сверхзвуковое горение, гистерезис

**DOI:** 10.31857/S2686740020050119

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–5] показали наличие различных сценариев 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; 2) возникновение сферической “области перетяжки пламени” (ОПП) с наличием в ней ламинарной микроструи и ламинарного пламени с турбулизацией микроструи и пламени при преодолении ламинарной микроструи узкой обла-

сти градиента плотности газа; 3) отрыв турбулентного пламени от сопла; 4) прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в ОПП, причем в данной ситуации горение в ОПП сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как “запираание микросопла” [4–6]; 5) прекращение горения микроструи. Следует заметить, что запираание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода, близкой к скорости звука в воздухе ( $U_0 \approx 331$  м/с). Стабилизация горения как круглой [1–6], так и плоской [7] микроструи обеспечивалась в данной ситуации наличием ОПП и существованием в ней горения.

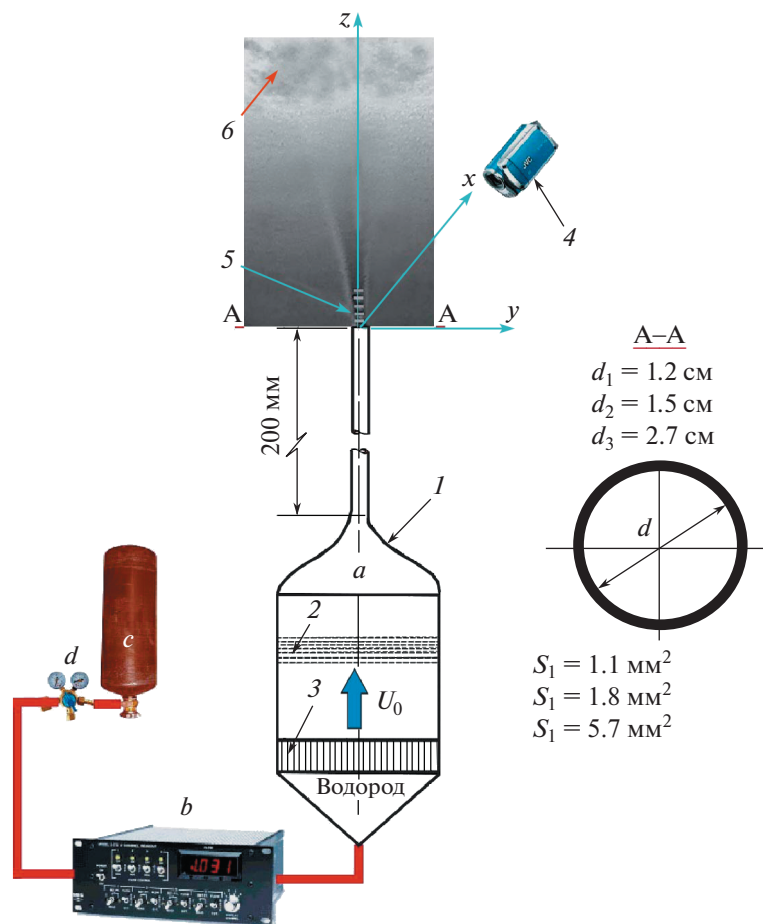
Тем не менее нам не удалось выйти на сверхзвуковое диффузионное горение микроструи водорода по причине запираания сопла ОПП, которая приводила к нагреву выхода микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик сверхзвукового горения струйного течения, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени. Это подробно 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

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

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

<sup>3</sup> 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: *a* – сопловой аппарат, *b* – регулятор массового расхода газов, *c* – баллон сжатого водорода (100 атм), *d* – редуктор. Сопловой аппарат (*a*): *1* – форкамера, *2* – набор детурбулизирующих сеток, *3* – хонейкомб и микротрубки длиной 200 мм с круглым микросоплом, *4* – цифровая видеокамера.

среза сопла пламени. Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при сверхзвуковых скоростях их истечения представлены в работах [9–11], а плоской – в [12].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения круглых микроструй водорода и определении различных сценариев данного процесса в зависимости от скорости истечения микроструи. Внимание будет уделено исследованию характеристик развития данной микроструи при дозвуковой и сверхзвуковой (относительно воздуха  $U_0 = 331$  м/с и водорода  $U_0 = 1284$  м/с) скорости ее истечения и при наличии сверхзвуковых ячеек.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

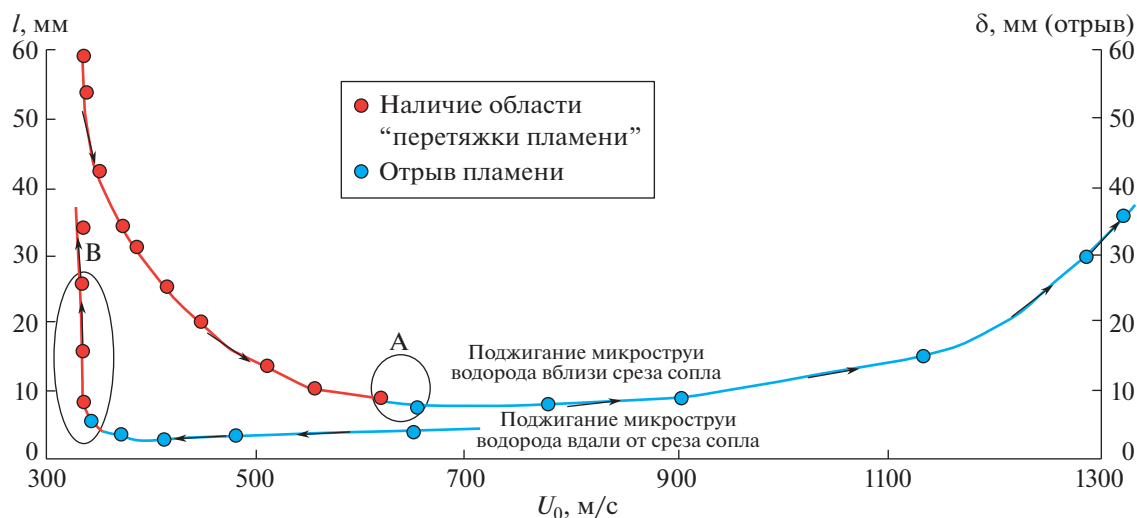
На рис. 1 показана схема эксперимента. В установку соплового аппарата через клапан регулятора массового расхода газов “MKS Instruments”, обеспечивающий

печивающий точность измерения расхода газа в пределах 0.7%, подавался водород из баллона под давлением 100 атм через редуктор.

Управление расходом газа осуществлялось регулятором массового расхода газов, а показания расхода водорода регистрировались на его электронном табло (см. *b*). В эксперименте водород поступал в установку соплового аппарата, состоящую из форкамеры с набором детурбулизирующих сеток, хонейкомба и далее через цилиндрический микроканал длиной порядка 200 мм в круглое микросопло с размерами его выходного отверстия, указанными на рис. 1. Детальное описание оборудования, используемого в экспериментах, и процедура проведения исследований представлены в работах [1–5].

### Сценарии сверхзвукового диффузионного горения круглых микроструй водорода ( $d_0 = 0.5$ мм и $d_1 - d_3 = 1.2; 1.5; 2.7$ мм)

Как показали эксперименты, при диаметре (площади)  $d = 0.5$  мм ( $S = 0.2$  мм<sup>2</sup>), соответствен-



**Рис. 2.** График (гистерезис) зависимости процесса развития пламени круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения и способа воспламенения (вблизи/вдали от среза сопла), диапазон скорости исчезновения ОПП и начало отрыва пламени (А) и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления ОПП (В). Стрелками указано направление изменения скорости микроструи (повышение/уменьшение). Диаметр сопла 1.2 мм.

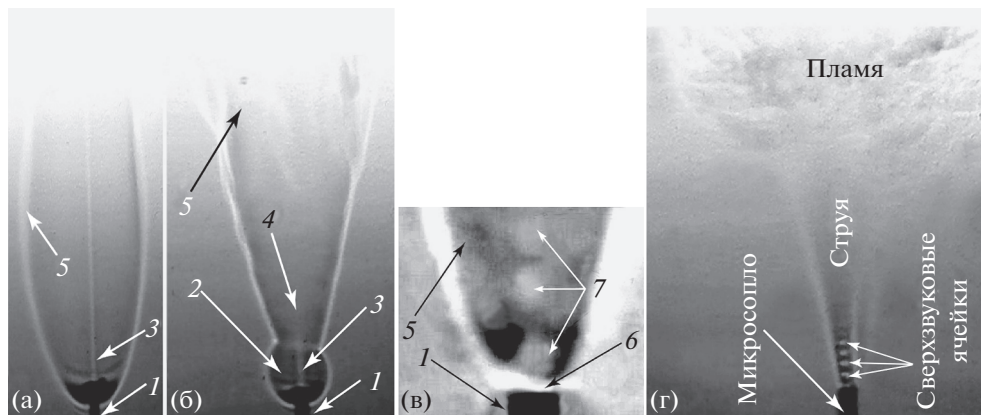
но, выходного отверстия круглого сопла при расходе около  $200 \text{ см}^3/\text{с}$  ( $U_0 \approx 1000 \text{ м/с}$ ) наблюдается срыв пламени и отсутствие горения микроструи водорода. С другой стороны, наблюдалось стабильное сверхзвуковое горение как плоской ( $S = 0.9 \text{ мм}^2$ ) [12], так и круглой ( $S \approx 3 \text{ мм}^2$ ) струи водорода с оторвавшимся от среза сопла пламенем, но с размером площади выходного отверстия (щели), более чем в четыре раза превышающим аналогичный параметр у круглой микроструи с диаметром выходного отверстия  $d = 0.5 \text{ мм}$  ( $S = 0.2 \text{ мм}^2$ ). Результаты настоящих экспериментальных исследований диффузионного горения круглой струи водорода, истекающей из круглых сопел с диаметром выходного отверстия сопла  $d = 1.2; 1.5; 2.7 \text{ мм}$  и площадью поперечного сечения выхода сопла  $S = 1.1; 1.8; 5.7 \text{ мм}^2$ , соответственно, демонстрируют процесс "сверхзвукового диффузионного горения" с наличием сверхзвуковых ячеек, стабилизирующих горение, на скорости истечения струи, превышающей скорость звука по водороду ( $U_0 \geq 1284 \text{ м/с}$ ). Данный результат исследований коррелирует с результатами исследования диффузионного "сверхзвукового горения" плоской микроструи водорода, представленными в работе [12]. Из этого можно сделать вывод, что "сверхзвуковое диффузионное горение" круглых микроструй водорода на скорости их истечения, превышающей сверхзвуковую скорость водорода, возможно при диаметре выходного отверстия микросопла, находящегося в пределах 1 мм и выше.

С ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать появление ОПП, наличие горения в

которой существует вплоть до трансзвуковых скоростей истечения микроструи, но в конечном итоге приводит к явлению заклинивания микросопла по причине нагрева ОПП его выхода. Диапазон скоростей истечения микроструи водорода при наличии ОПП зависит от способа ее воспламенения (зажигания): вблизи или вдали от среза сопла. В данном случае можно наблюдать так называемый гистерезис, который хорошо виден на рис. 2.

#### Гистерезис процесса развития и исчезновения ОПП в зависимости от способа воспламенения круглой микроструи водорода (вдали/вблизи от среза сопла) и при снижении или нарастании скорости ее истечения

На рис. 2 представлен график процесса развития и исчезновения ОПП в зависимости от способа воспламенения (вблизи/вдали от среза сопла), а также нарастания/снижения скорости истечения круглой микроструи водорода. График ясно демонстрирует наличие гистерезиса в данном процессе. Воспламенение микроструи вблизи среза сопла ОПП и нагрев выхода сопла дают возможность существования данной области до момента ее исчезновения и возникновения отрыва пламени на достаточно большой скорости истечения микроструи ( $U_0 \approx 590 \text{ м/с}$ ). Однако при снижении скорости истечения микроструи процесс инверсии отрыва пламени на его присоединение с появлением ОПП происходит при  $U_0 \approx 333 \text{ м/с}$ , что коррелирует с ситуацией, наблюдаемой при воспламенении микроструи водорода вдали от среза сопла.



**Рис. 3.** Теневые картины четырех сценариев диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (а –  $U_0 \leq 150$  м/с; б –  $U_0 \geq 150$  м/с; в –  $U_0 \geq 330$  м/с; г –  $U_0 \geq 1280$  м/с): 1 – круглое микросопло, 2 – ОПП, 3 – ламинарная микроструя, 4 – турбулентная микроструя, 5 – пламя, 6 – отрыв пламени, 7 – сверхзвуковые ячейки.

Таким образом, в данном случае можно наблюдать гистерезисный цикл. Полуцикл А: наличие ОПП, ее исчезновение и отрыв пламени при воспламенении микроструи вблизи среза сопла и нарастании скорости ее истечения (позиция А). Полуцикл В: процесс инверсии от оторвавшегося пламени к его присоединению и возникновению ОПП при уменьшении скорости истечения микроструи в ситуации ее воспламенения вдали от среза сопла (позиция В).

Следует также отметить, что отрыв пламени от среза сопла и исчезновение ОПП, гарантирующие отсутствие нагрева выхода микросопла, создают условия для прекращения явления запирания микросопла и выхода горения микроструи водорода на сверхзвуковых скоростях.

#### Четыре сценария диффузионного горения круглых микроструй водорода

Таким образом, результаты экспериментальных исследований указывают на то, что существует четыре основных сценария диффузионного горения круглой, как и плоской [12], микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения. Это следующие сценарии (см. рис. 3):

1. Ламинарное горение при наличии ламинарной микроструи и ламинарного пламени (рис. 3а,  $U_0 \leq 150$  м/с).

2. Возникновение и развитие ОПП с ламинарной микроструей и пламенем почти сферической формы, наличием узкой области градиента плотности газа, преодолевая которую микроструя и пламя становятся турбулентными (рис. 3б,  $U_0 \geq 150$  м/с).

3. Исчезновение ОПП, отрыв пламени от среза сопла и “сверхзвуковое горение” микроструи относительно скорости звука в воздухе (рис. 3в,  $U_0 \geq 330$  м/с).

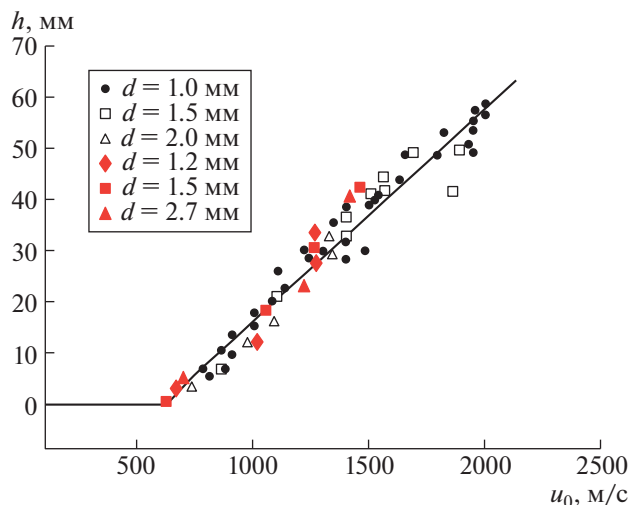
4. Нарастание величины отрыва пламени от среза сопла и “сверхзвуковое горение” микроструи относительно скорости звука в водороде (рис. 3г,  $U_0 \geq 1280$  м/с).

#### Сравнение результатов настоящих экспериментальных исследований с результатами исследований других авторов

Результаты экспериментальных и численных исследований горения круглых струй водорода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях их истечения детально представлены в работах [9–11]. На рис. 4 представлен график зависимости высоты отрыва от среза сопла для диффузионного пламени круглой микроструи водорода от скорости ее истечения по данным работ [9, 10], в которой был исследован только последний сценарий с зажиганием оторвавшейся микроструи вдали от сопла.

Можно наблюдать, что приведенная на рис. 4 зависимость – линейная, максимальная скорость, при которой авторы провели измерения при  $d = 1$  мм, более чем в 1.5 раза превышает скорость звука в водороде, и с увеличением диаметра выходного отверстия сопла эта скорость понижалась, но при этом превышала скорость звука в водороде.

Следует отметить, что авторы работы [10] не приводят картин теневой визуализации течений, хотя они такие исследования проводили. Наблюдали ли они наличие сверхзвуковых ячеек в процессе горения струй при сверхзвуковой скорости истечения, нигде не отмечено. Результаты экспериментальных исследований зависимости величины отрыва пламени от скорости при диффузионном горении круглых микроструй, полученные в данной работе, также нанесены на график (рис. 4). Наблюдается хорошее совпадение наших экспериментальных данных с представленной зависи-



**Рис. 4.** График зависимости величины отрыва пламени от среза сопла в зависимости от скорости истечения круглых микроструй водорода при их диффузионном горении, символы (●, □, △ — из работы [10] и ◆, ■, ▲ — данные исследования).

мостью из работы [10]. Однако, в отличие от данных работы [10], наши результаты исследования, указывающие на “сверхзвуковое горение” круглой микроструи, подкреплены одной из важных характеристик такого процесса, а экспериментальное обнаружение существования сверхзвуковых ячеек в микроструе водорода, как мы предполагаем, является важнейшим фактором стабилизации пламени в этих условиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые представлены четыре сценария диффузионного горения круглых микроструй водорода, включая “сверхзвуковое горение” при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Установлено, что стабилизация пламени при дозвуковой скорости истечения круглой микроструи водорода связана с наличием нагрева сопла ОПП, приводящего к явлению “запирания” сопла, а стабилизация пламени при сверхзвуковой скорости истечения микроструи водорода связана с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструй водорода в зависимости от места зажигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и от изменения скорости истечения (роста или уменьшения). Установлено, что “сверхзвуковое диффузионное горение” круглых микроструй водорода, как по воздуху, так и водороду, реализуется лишь в ситуации, когда диаметр выходного микросопла лежит в диапазоне от 1 мм и выше.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 16–19–10330.

## 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. Физика. 2015. Т. 10. Вып. 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. Физика. 2015. Т. 10. Вып. 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. Вып. 2. С. 42–51.
4. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // ДАН. 2016. Т. 470. № 2. С. 166–171. <https://doi.org/10.7868/S0869565216260091>
5. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Ч. 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сиб. физ. журн. 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. 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 (Pt II) // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41. Iss. 44. P. 20 240–20 249.
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 // Сиб. физ. журн. 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 // ФГВ. 1978. Т. 14. № 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 // 8<sup>th</sup> Intern. Seminar on Fire and Explosion. 25–28 April 2016. Hefei, China.
12. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В. Различные сценарии горения плоской микроструи на до- и сверхзвуковой скорости // ДАН. 2019. Т. 485. № 3. С. 300–305.



## DIFFUSION COMBUSTION OF A ROUND HYDROGEN MICROJET AT SUBSONIC AND SUPERSONIC SPEEDS

**Yu. A. Litvinenko<sup>a</sup>, G. R. Grek<sup>a</sup>, V. V. Kozlov<sup>a,b</sup>,  
M. V. Litvinenko<sup>a,b</sup>, and A. G. Shmakov<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russian Federation*

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

<sup>c</sup> *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

In this paper, we presented the results of experimental studies of the diffusion combustion of a round hydrogen micro jet flowing from a slit micro nozzle at subsonic and supersonic speeds. For the first time, four scenarios of diffusion combustion of a round hydrogen micro jet including supersonic combustion in the presence of supersonic cells in both air and hydrogen are specified. The stabilization of the subsonic combustion of a hydrogen micro jet was found to be due to the presence of a “bottleneck flame region” leading to nozzle choking, while the stabilization of the supersonic combustion of a micro jet was found to be associated with the presence of supersonic cells. The observed hysteresis of diffusion combustion of a round hydrogen micro jet depends on both the method of igniting the micro jet (near or far from the nozzle exit) and the direction of change in the rate of its outflow (growth or reduction).

*Keywords:* hydrogen round microjet, diffusion combustion, “bottleneck flame region”, sub- and supersonic combustion, hysteresis