

УДК 532.525.2

## РАЗЛИЧНЫЕ СЦЕНАРИИ ГОРЕНИЯ ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА НА ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

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

Представлено академиком РАН С.В. Алексеенко 10.10.2018 г.

Поступило 14.11.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая сверхзвуковое горение при наличии сверхзвуковых ячеек как по воздуху, так и по водороду. Установлено, что стабилизация дозвукового горения микроструи водорода связана с наличием “области перетяжки пламени”, а сверхзвукового горения микроструи — с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости её истечения (роста или уменьшения).

**Ключевые слова:** плоская микроструя водорода, диффузионное горение, “область перетяжки пламени”, профиль скорости, до- и сверхзвуковое горение, гистерезис.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524853300-305>

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [1–4] 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 ( $U_0 \leq 150$  м/с); 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 области градиента плотности газа ( $U_0 > 150$  м/с); 3) отрыв турбулентного пламени от ОПП ( $U_0 > 200$  м/с); 4) прекращение горения турбулентного участка микроструи при сохранении горения в ОПП, причём в данной ситуации горение в ОПП сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей её

истечения, однако при наличии такого явления, как “запирание сопла” [4–6] ( $U_0 > 331$  м/с); 5) прекращение горения микроструи ( $U_0 \approx 331$  м/с). 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 [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 запирания 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 пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работе [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.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла, и определении различных сценариев данного процесса в зависи-

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

<sup>3</sup> Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

\*E-mail: [kozlov@itam.nsc.ru](mailto:kozlov@itam.nsc.ru)

мости от скорости истечения микроструи. Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития данной микроструи на сверхзвуковой (относительно воздуха  $U_0 = 331$  м/с и водорода  $U_0 = 1284$  м/с) скорости её истечения и при наличии сверхзвуковых ячеек.

Следует заметить, что исследование характеристик диффузионного горения плоской микроструи при сверхзвуковой скорости проведено впервые, так как до сих пор горение водорода исследовалось главным образом в круглых микроструях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

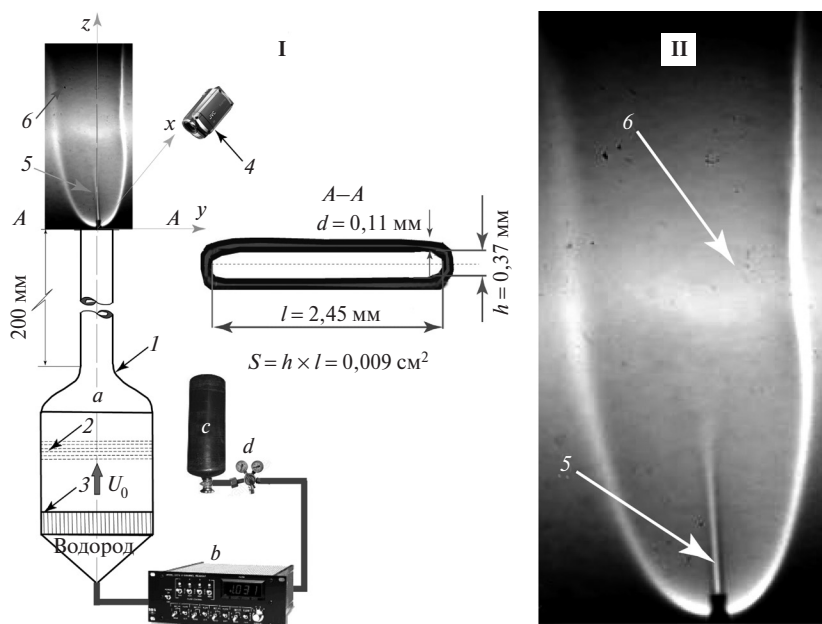
Сценарий диффузионного горения плоской микроструи водорода № 1. На рис. 1 показаны схема эксперимента и теневая картина процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода при скорости её истечения  $U_0 \leq 150$  м/с. В установку соплового аппарата (*a*) через блок управления электромагнитным клапаном типа 179В фирмы “MKS Instruments” объёмного расхода газа (*b*), обеспечивающий точность измерения расхода газа в пределах 0,7%, подавался водород из баллона (*c*) под давлением 100 атм через редуктор (*d*). Управление расходом газа осуществлялось блоком управления, а показания расхода водорода регистрировались на электронном табло (см. *b*). В эксперименте водород поступал в установку со-

плового аппарата (*a*), состоящую из форкамеры (*1*) с набором детурбулизирующих сеток (*2*), хонейкомба (*3*) и далее через цилиндрический микроканал длиной 200 мм в щелевое микросопло с размерами его выходного отверстия, указанными на рис. 1. Детальное описание оборудования, используемого в экспериментах, и процедура проведения исследований представлены в работе [11].

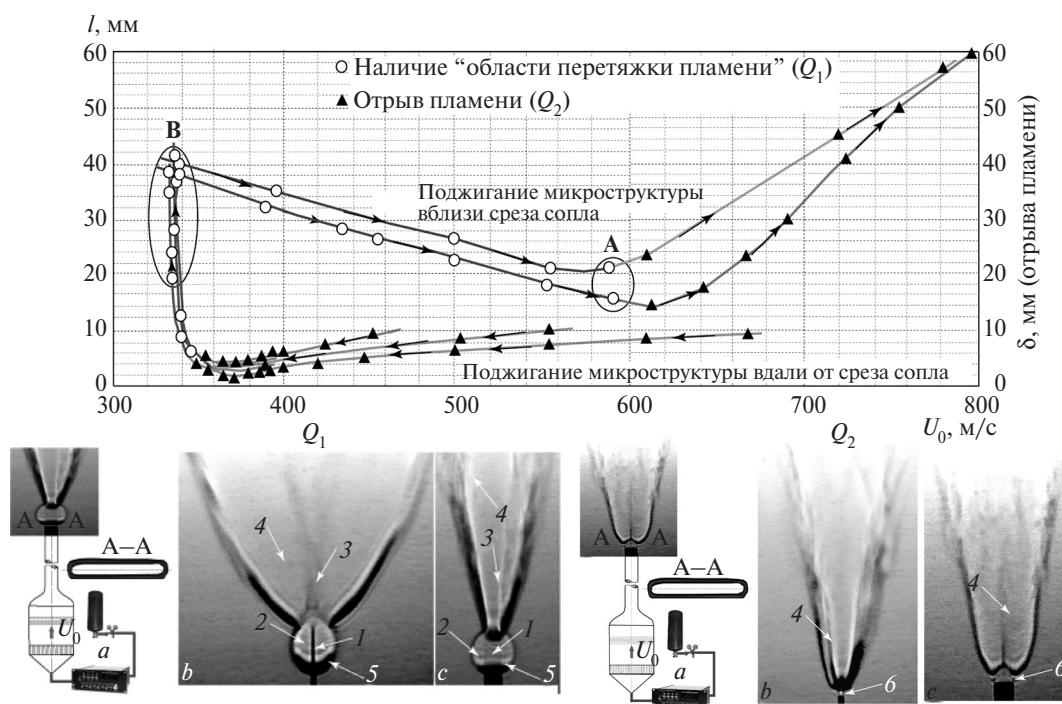
Как видно на рис. 1, **II**, теневая картина демонстрирует процесс ламинарного горения плоской микроструи водорода на скорости её истечения  $U_0 \leq 150$  м/с и при наличии ламинарного характера развития как микроструи, так и пламени.

Сценарий диффузионного горения плоской микроструи водорода № 2. 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 запираания микросопла по причине нагрева ОПП его выхода. Диапазон скоростей истечения микроструи водорода при наличии ОПП зависит от способа её воспламенения: вблизи или вдаль 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 спо-



**Рис. 1.** Схема эксперимента **I**: *a* — сопловый аппарат, *b* — блок управления электромагнитным клапаном расходомера, *c* — баллон сжатого водорода (100 атм), *d* — редуктор. Сопловый аппарат (*a*) состоит из: *1* — форкамеры, *2* — набора детурбулизирующих сеток, *3* — хонейкомба и микротрубки длиной 200 мм с щелевым микросоплом, *4* — цифровой видеокамеры. Теневая картина ламинарного пламени и плоской микроструи **II**: *5* — плоская ламинарная микроструя, *6* — ламинарное пламя.



**Рис. 2.** График (гистерезис) зависимости процесса развития пламени микроструи водорода в зависимости от скорости её истечения и способа поджигания (вблизи/вдали от среза сопла), диапазон скорости исчезновения “области перетяжки пламени” и начало отрыва пламени (А) и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления “области перетяжки пламени” (В). Стрелками указано направление изменения скорости микроструи (нарастание/снижение). Схема эксперимента (а) и теневые картины пламени с узкой (b) и широкой (c) стороны микросопла в случае  $Q_1$  и схема эксперимента (а) и теневые картины пламени с узкой (b) и широкой (c) стороны микросопла в случае  $Q_2$ : 1 — ламинарная микроструя, 2 — ламинарное пламя, 3 — турбулентная микроструя, 4 — турбулентное пламя, 5 — “область перетяжки пламени”, 6 — отрыв пламени от среза сопла.

способа поджигания плоской микроструи водорода (вдали/вблизи от среза сопла) и при снижении или нарастании скорости её истечения. На основе результатов исследований работы [9] на рис. 2 показан график процесса развития и исчезновения ОПП в зависимости от способа воспламенения (вблизи/вдали от среза сопла), а также нарастания/снижения скорости истечения плоской микроструи водорода. График ясно демонстрирует наличие гистерезиса в данном процессе. Поджигание микроструи вблизи среза сопла ОПП и нагрев выхода сопла дают возможность существования данной области до момента её исчезновения и возникновения отрыва пламени на достаточно большой скорости истечения микроструи ( $U_0 \approx 590$  м/с). Однако при снижении скорости истечения микроструи процесс инверсии отрыва пламени на его присоединении с появлением ОПП происходит при  $U_0 \approx 333$  м/с, что коррелирует с ситуацией, наблюдаемой при поджигании микроструи водорода вдали от среза сопла.

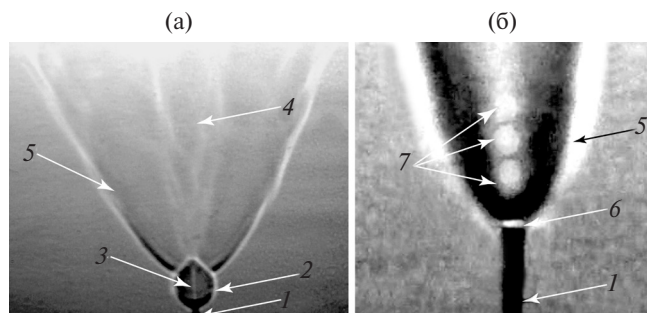
Таким образом, в данном случае можно наблюдать гистерезисный цикл. Полуцикл А: наличие ОПП, её исчезновение и отрыв пламени при под-

жигании микроструи вблизи среза сопла и нарастании скорости её истечения (позиция А). Полуцикл В: процесс инверсии от оторвавшегося пламени к его присоединению и возникновению ОПП при уменьшении скорости истечения микроструи в ситуации её поджигания 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 запираания микросопла и выхода горения микроструи водорода на сверхзвуковых скоростях.

Сценарий диффузионного горения плоской микроструи водорода № 3. Сверхзвуковое горение плоской микроструи водорода при наличии сверхзвуковых ячеек относительно скорости звука в воздухе (331 м/с). На рис. 3 показаны теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из шелевого микросопла на дозвуковой (а,  $U_0 \leq 333$  м/с) [7] и сверхзвуковой (b,  $U_0 \approx 400$  м/с) [10] скорости. Видна классическая картина дозвукового горения микроструи





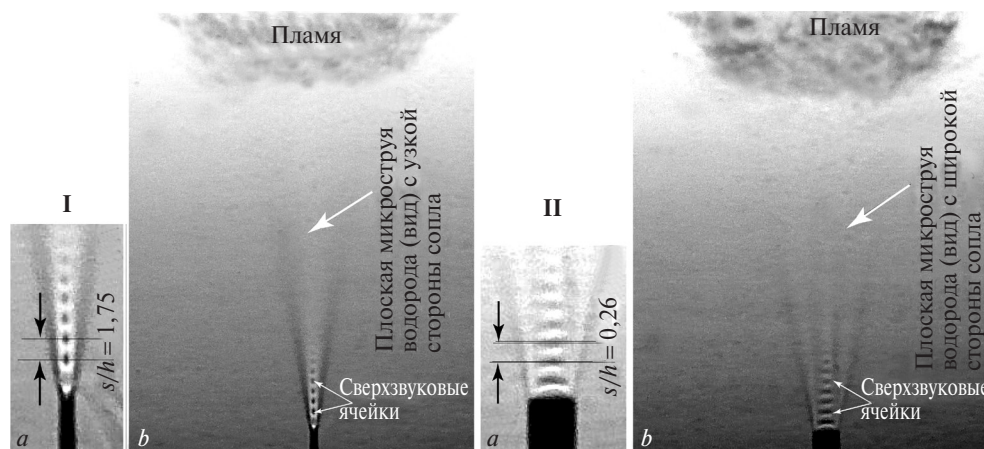
**Рис. 3.** Теневые картины горения плоской микроструи водорода при скорости её истечения  $U_0 \leq 330$  (a) и 400 м/с (b): 1 — плоское микросопло, 2 — “область перетяжки пламени”, 3 — ламинарная микроструя, 4 — турбулентная микроструя, 5 — турбулентное пламя, 6 — отрыв пламени от среза сопла, 7 — сверхзвуковые ячейки.

водорода, в частности плоской микроструи (a), детально исследованной в работе [7]. С другой стороны, можно наблюдать теневую картину сверхзвукового горения плоской микроструи водорода с отрывом пламени от среза сопла и наличием сверхзвуковых ячеек в нём (b). Причём в данной ситуации можно наблюдать сверхзвуковые ячейки, характерные для сверхзвукового горения (относительно скорости звука в воздухе) круглой микроструи водорода, исследованной в работе [10].

Сценарий диффузионного горения плоской микроструи водорода № 4. Сверхзвуковое горение плоской микроструи водорода при наличии сверхзвуковых ячеек относительно скорости звука в водороде (1284 м/с). На рис. 4 представлены теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла со скоростью  $U_0 \approx 1484$  м/с, вид на узкую (I) и широкую (II) стороны микросопла: a — без

горения, b — с горением. Можно наблюдать наличие сверхзвуковых ячеек,  $U_0 = 1484$  м/с. Учитывая, что  $U_0 = 1000$  м/с — среднерасходная скорость микроструи, а профиль скорости параболический, то максимальная скорость достигает скорости звука по водороду  $U_0 \approx 1284$  м/с.

Таким образом, существуют четыре основных сценария диффузионного горения как для круглой [1–6, 8, 10], так и плоской микроструи водорода в зависимости от скорости её истечения. Это следующие сценарии. Ламинарное горение при наличии ламинарной микроструи и ламинарного пламени (рис. 1, II,  $U_0 \leq 150$  м/с). Возникновение и развитие ОПП с ламинарной микроструей и пламенем сферической формы, наличием узкой области градиента плотности газа, преодолевая которую микроструя и пламя становятся турбулентными (рис. 2,  $Q_1$ ,  $U_0 \geq 150$  м/с). Исчезновение ОПП, отрыв пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в воздухе (рис. 3б,  $U_0 \geq 330$  м/с). Нарастание величины отрыва пламени от среза сопла и сверхзвуковое горение микроструи относительно скорости звука в водороде (рис. 4,  $U_0 \geq 1280$  м/с). Результаты расчётов и экспериментальные данные относительно развития диффузионного пламени при горении круглой микроструи водорода на дозвуковой и сверхзвуковой скорости её истечения представлены в работе [11]. Максимальная скорость, до которой дошли авторы при  $d = 1$  мм, более чем в 1,5 раза превышает скорость звука в водороде, и с увеличением диаметра выходного отверстия сопла эта скорость уменьшалась, тем не менее превышала скорость звука в водороде. Следует заметить, что автор работы [11] не приводит в качестве доказательства картин теневой визуализации течений. Наличие либо отсутствие сверхзвуковых ячеек в процессе горения струй на сверхзву-



**Рис. 4.** Теневые картины горения плоской микроструи водорода при скорости её истечения  $U_0 \approx 1284$  м/с: вид с узкой стороны микросопла (I) и с широкой стороны микросопла (II): a — без горения, b — с горением.

ковой скорости раньше нигде не найдено. Однако в отличие от данных [11] наши результаты исследования указывают на горение на сверхзвуковых структурах плоской микроструи; они подкреплены одной из важных характеристик такого процесса, а именно наличием при истечении водорода сверхзвуковых ячеек (по воздуху и водороду).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований диффузионного горения плоской микроструи водорода получены следующие результаты. Впервые представлено четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая горение при сверхзвуковом истечении водорода. Установлено, что стабилизация дозвукового горения микроструи водорода связана с наличием нагрева сопла ОПП [12], приводящего к явлению запыриания сопла. При сверхзвуковом истечении струи водорода из сопла перемешивание и горение происходят на сверхзвуковых структурах плоской микроструи, и это подкреплено одной из важных характеристик такого процесса, а именно наличием при истечении водорода сверхзвуковых ячеек (по воздуху и водороду). Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости её истечения (роста или уменьшения).

**Источник финансирования.** Работа поддержана грантом РФФИ 16–19–10330.

### 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 // Вестн. НГУ. Физика. 2015. Т. 10. В. 2. С. 27–41.
2. Грек Г.Р., Катасонов М.М., Козлов В.В., Литвиненко М.В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. НГУ. Физика. 2015. Т. 10. В. 2. С. 42–51.
3. Козлов В.В., Грек Г.Р., Коробейников О.П., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Горение истекающей

4. 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.
5. 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 // Int. J. Hydrogen Energy. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.002>
6. Козлов В.В., Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Явление запыриания микросопла при диффузионном горении водорода // ДАН. 2018. Т. 480. № 1. С. 34–39.
7. 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 // Вест. НГУ. Физика. 2015. Т. 10. В. 2. С. 52–66.
8. Козлов В.В., Грек Г.Р., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при её зажигании вдали от среза сопла // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12. № 3. С. 62–73.
9. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В. Диффузионное горение плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости // Сиб. физ. журн. 2018. Т. 13. № 2. С. 23–36.
10. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Ч. 2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12. № 2. С. 46–59.
11. Аннушкин Ю.М. Диффузионное горение газообразных топлив в неограниченном пространстве // Тр. ЦИАМ. 1979. № 857. С. 1–45.
12. Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Yu.A. Influence of Initial and Boundary Conditions at the Nozzle Exit Upon Diffusion Combustion of a Hydrogen Microjet // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 24. P. 15913–15924.

## COMBUSTION OF A PLANE HYDROGEN MICROJET AT SUBSONIC AND SUPERSONIC SPEEDS

V. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, G. R. Grek<sup>1</sup>, Yu. A. Litvinenko<sup>1</sup>,  
A. G. Shmakov<sup>1,2,3</sup>, V. V. Vikhorev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

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

<sup>3</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 October 10, 2018

Received November 14, 2018

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

**Keywords:** hydrogen plane microjet, diffusion combustion, «bottleneck flame region», mean velocity profile, sub- and supersonic combustion, hysteresis.