

Научная статья

УДК 544.452.42

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-47-55

Режимы горения микроструй водорода

Юрий Алексеевич Литвиненко

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Новосибирск, Россия

litur@itam.nsc.ru

Аннотация

Выполнено экспериментальное исследование диффузионного факела при истечении водорода из круглого и щелевого микросопла при до- и сверхзвуковой скорости. Впервые обнаружены четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая горение при сверхзвуковом истечении струи водорода. Установлено, что стабилизация факела при дозвуковой скорости истечения микроструи водорода связана с наличием «перетяжки» факела, разделяющей ламинарную и турбулентную части факела. При сверхзвуковой скорости истечения недорасширенной микроструи стабилизации факела способствует образующаяся волновая структура неоднородностей. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от области поджига. При поджиге вблизи среза сопла реализуется присоединенный факел, сопровождаемый нагревом сопла. При поджиге выше по струе реализуется поднятый факел, при этом нагрев среза сопла значительно меньше предыдущего случая. С ростом скорости истечения развитие двух типов факелов протекают по разным сценариям.

Ключевые слова

круглая микроструя, плоская микроструя, диффузионное горение водорода, «перетяжка» факела, теневой метод, тепловизионная картина горения

Финансирование

Исследование выполнено за счет проекта «Восприимчивость и развитие возмущений в сдвиговых дозвуковых потоках» № 124021400038-1.

Для цитирования

Литвиненко Ю. А. Режимы горения микроструй водорода // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 1. С. 47–55. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-47-55

Combustion Modes of Hydrogen Microjets

Yury A. Litvinenko

S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,

Novosibirsk, Russian Federation

litur@itam.nsc.ru

Abstract

An experimental study of the diffusion plume during the hydrogen flow from a round and slotted micro nozzle at pre- and supersonic velocity has been carried out. Four scenarios of diffusion combustion of a planar hydrogen microjet, including combustion at supersonic hydrogen jet outflow, are found for the first time. It was found that the stabilization of the plume at subsonic hydrogen microjet velocity is associated with the presence of a plume “drag” separating the

© Литвиненко Ю. А., 2025

laminar and turbulent parts of the plume. At supersonic velocity of the underexpanded microjet, the plume stabilization is promoted by the wave structure of inhomogeneities formed. The hysteresis of the diffusion combustion process of a flat hydrogen microjet has been found depending on the ignition region. At ignition near the nozzle cutoff, a connected plume accompanied by nozzle heating is realized. At ignition higher up the jet, a raised flare is realized, with heating of the nozzle cutoff being much less than in the previous case. With increasing flow velocity, the development of the two types of flares proceeds according to different scenarios.

Keywords

circular microjet, flat microjet, diffusive hydrogen combustion, flame “drag”, shadow method, thermal imaging combustion pattern

Funding

The research was supported by the project “Susceptibility and development of perturbations in shear subsonic flows” № 1240214.

For citation

Litvinenko Yu. A. Combustion Modes of Hydrogen Microjets. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 1, p. 47–55. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-1-47-55

Введение

Развитие водородной энергетики обусловлено не только назревшим переходом к освоению нового экологически приемлемого источника энергии, но и достижением более эффективного использования традиционных видов топлива, а также новых видов биотоплива на основе смеси газов с водородом. Немаловажным также является стремление к дальнейшей декарбонизации атмосферного воздуха (снижению доли «парниковых» выбросов углекислого газа). С этой целью осуществляется сокращение потребления мазута, нефти и угля. Осуществляется их замена экологически приемлемым природным газом. Следует также отметить развитие возобновляемых источников энергии. Солнечная, ветровая, гидрогенерирующая энергетика являются необходимым, но недостаточным шагом на пути декарбонизации. Суммарная доля такой энергии составляет ~ 20 % из общего баланса потребляемой энергии. В этой связи, учитывая огромные запасы водорода в Мировом океане, возникает значительный интерес к развитию абсолютно экологически чистых источников энергии. Однако на пути развития технологии водородопользования немало нерешенных задач. Одна из них – высокая взрывоопасность водорода. Производство, хранение и транспортировка водорода связаны с рядом проблем, обусловленных

высокой степенью диффузии. Водород активно взаимодействует с углеродом, содержащимся в стали, превращая его в метан. Также следует отметить, что водород способен воспламеняться от значительного перепада давления (ударной волны), образующегося при даже незначительной разгерметизации баллона. На пути развития технологий использования водорода немало сопутствующих проблем, требующих решения. Целью настоящей работы является исследование структуры водородного факела при струйном истечении из круглого и плоского микросопла с до- и сверхзвуковыми скоростями. Полученные результаты позволят предложить новые технологические решения для сжигания газообразного водорода при истечении со скоростями, близкими

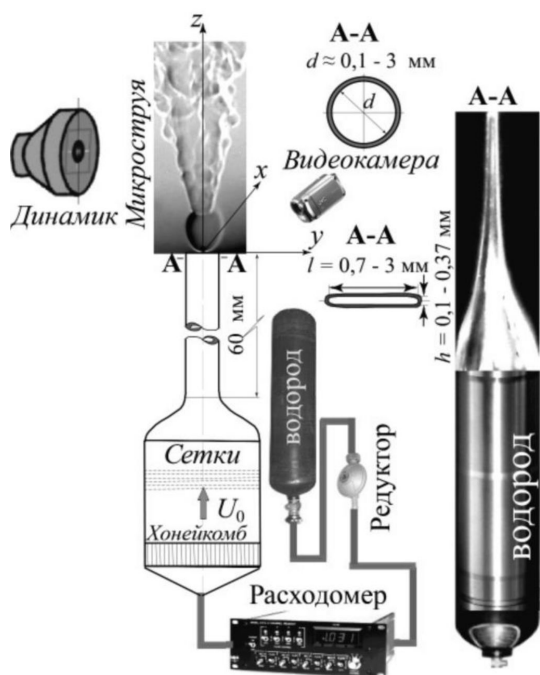


Рис. 1. Установка для исследования горения микроструи водорода

Fig. 1. Hydrogen microjet combustion research facility

к скорости звука при диффузионном горении, для стабильного и безопасного сжигания газообразного водорода в воздушной среде. В настоящей работе представлены результаты исследований диффузионного горения микроструй водорода. Под микроструями понимаются истечения из сопла, имеющего плоское либо круглое поперечное сечение и поперечный размер менее 3 мм (рис. 1). Основные результаты были получены с использованием теневого метода на базе оптического прибора ИАБ-451 (рис. 2).

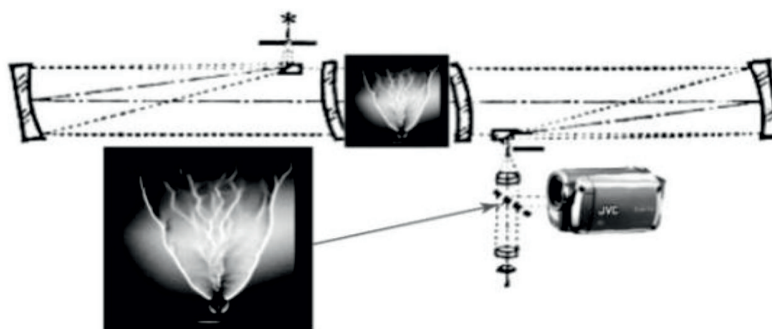


Рис. 2. Схематическое изображение прибора ИАБ-451 и теньевая картина горения водорода в плоской микроструе
Fig. 2. Schematic representation of the IAB-451 device and shadow picture of hydrogen combustion in a flat microjet

Структура течения и режимы горения микроструй водорода, истекающих из сопла круглого сечения

При изучении струйного течения и горения водорода с использованием круглых и щелевых сопел была обнаружена такая особенность структуры течения и горения, как возникновение области «перетяжки» пламени. Это явление отмечено в работах [1; 2] без детального анализа его характеристик. Область «перетяжки» пламени представляет собой близкую к сферической зону ламинарного течения вблизи среза микросопла (рис. 3, 4).

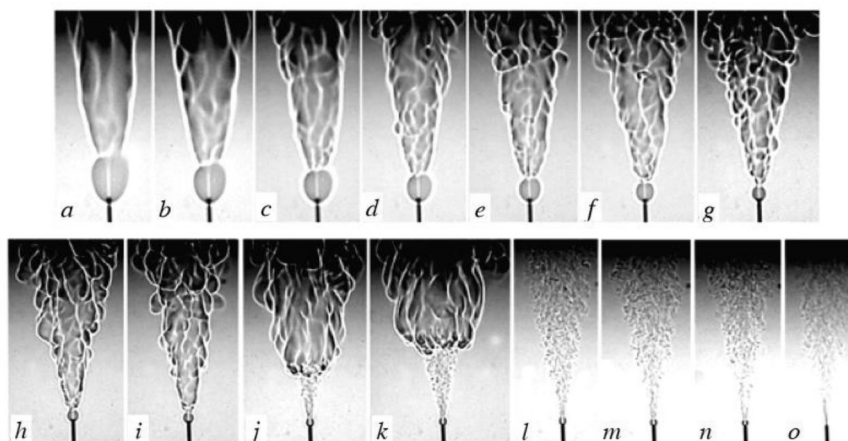


Рис. 3. Теньевые картины горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (м/с): а) 357; б) 408; в) 459; д) 510; е) 561; ф) 612; г) 663; h) 714; i) 765; j) 816; k) 867; l) 887; m) 918; n) 969; o) 1020; наличие области «перетяжки» пламени (а – n); отрыв пламени при горении в области «перетяжки» пламени (i – k); прекращение горения турбулентной струи при сохранении горения в области «перетяжки» пламени (l – n); прекращение горения струи (o)

Fig. 3. Shadow patterns of combustion of hydrogen flowing from a circular hole of 500 μm diameter at different jet velocities (m/s): (a) 357; (b) 408; (c) 459; (d) 510; (e) 561; (f) 612; (g) 663; (h) 714; (i) 765; (j) 816; (k) 867; (l) 887; (m) 918; (n) 969; (o) 1020; presence of flame “drag” region (a – n); flame detachment during combustion in the flame “drag” region (i – k); cessation of combustion of a turbulent jet while combustion remains in the flame “tug” region (l – n); cessation of jet combustion (o)

В пределах этой зоны течение в струе ламинарное, горение происходит в ламинарном режиме, на периферии струи происходит формирование тороидальных вихрей (см. рис. 3). Сферическая область течения окружена тонким слоем с большим градиентом плотности среды, при преодолении которого ламинарная струя разрушается и происходит переход к режиму турбулентного течения и горения.

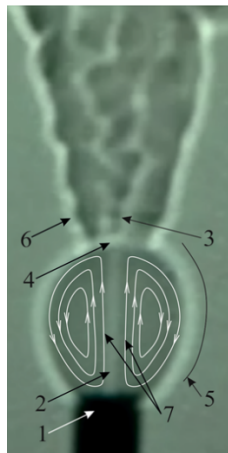


Рис. 4. Теневая фотография круглой микроструи водорода вблизи среза сопла: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – турбулентная струя; 4 – градиент плотности; 5 – узкая область градиента; 6 – турбулентное пламя; 7 – тороидальные вихри

Fig. 4. Shadow photograph of a round hydrogen microjet near the nozzle cutoff: 1 – nozzle; 2 – laminar jet; 3 – turbulent jet; 4 – density gradient; 5 – narrow gradient region; 6 – turbulent flame; 7 – toroidal vortices

Результаты исследований показали, что подобная структура струйного течения наблюдается в широком диапазоне значений параметров (поперечного размера сопла и скорости истечения (объемного расхода) водорода). Характерные картины течения вблизи среза сопла в условиях образования области «перетяжки» пламени и в ее отсутствие показаны на рис. 3. На рис. 4 показаны детали сценариев: при скорости истечения водорода 459 м/с – горение вблизи сопла, переход к турбулентности и турбулентное горение; при скорости 867 м/с – горение вблизи сопла, отсутствие горения в турбулентной зоне, но с остаточным горением в верхней части струи; при скорости 918 м/с – горение только вблизи сопла.

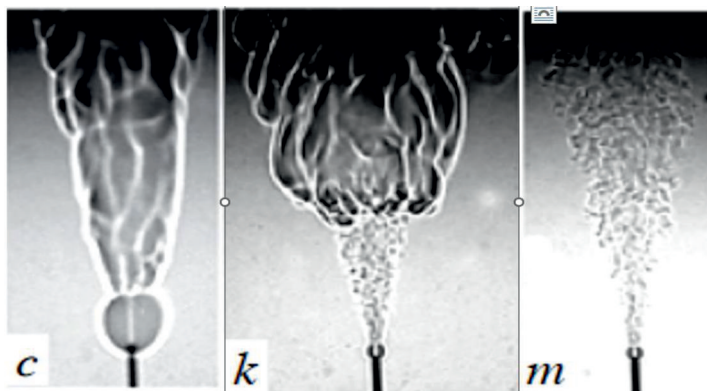


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи: 459 м/с (слева); 867 м/с (в центре); 918 м/с (справа)

Fig. 5. Shadow patterns of diffusive combustion of hydrogen flowing from a circular hole with a diameter of 500 μm at different jet velocities: 459 m/s (left); 867 m/s (center); 918 m/s (right)

В работе [3] предполагалось, что особенности течения могут быть обусловлены в том числе его начальным состоянием – распределением средней скорости струи на срезе сопла. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что пространственная структура горения зависит от длины канала микросопла: по мере ее увеличения наблюдается исчезновение области «перетяжки» пламени. Зависимость режима горения микроструй водорода от условий на срезе сопла описана ниже.

В целом экспериментальные исследования диффузионного горения круглой микроструи водорода [4–8] 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. При этом в данной ситуации горение в области перетяжки пламени сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей ее истечения, однако при наличии такого явления, как «запирание сопла» [1;8] ($U_0 > 330$ м/с).
5. Прекращение горения микроструи ($U_0 \approx 330$ м/с).

Особенности диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла

Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [2; 5]. Следует заметить, что запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода, близкой к скорости звука в воздухе ($U_0 \approx 330$ м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструи обеспечивалась

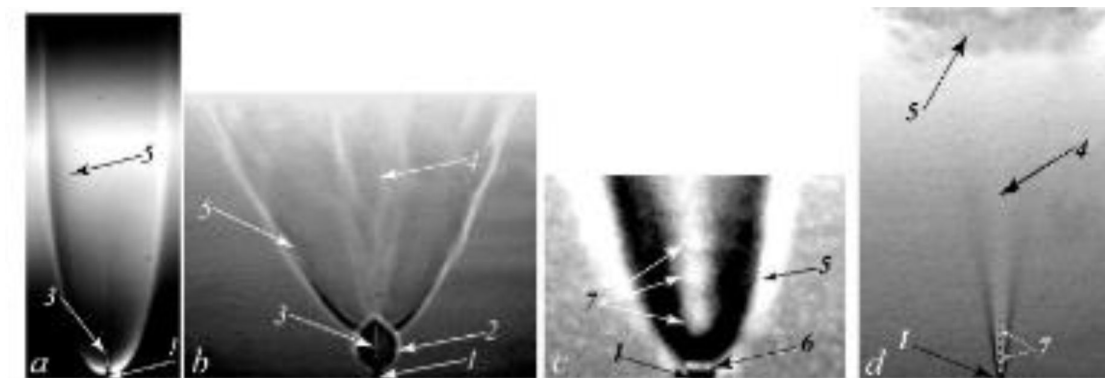


Рис. 6. Четыре сценария диффузионного горения плоской водородной микроструи при изменении ее скорости:

$U_0 \leq 150$ м/с (a), $U_0 = 150$ м/с (b), $U_0 = 330$ м/с (c) и $U_0 = 1280$ м/с (d);

1 – микроджет; 2 – «узкая область пламени»; 3 – ламинарная микроструя; 4 – турбулентная микроструя; 5 – пламя; 6 – поднятое пламя; 7 – сверхзвуковые ячейки

Fig. 6. Four scenarios of diffusive combustion of a flat hydrogen microjet when its velocity changes: $U_0 \leq 150$ m/s (a), $U_0 = 150$ m/s (b), $U_0 = 330$ m/s (c), and $U_0 = 1280$ m/s (d);

1 – microjet; 2 – “narrow flame region”; 3 – laminar microjet; 4 – turbulent microjet; 5 – flame; 6 – raised flame; 7 – supersonic cells

в данной ситуации наличием области перетяжки пламени и существованием в ней горения. Тем не менее нам не удалось выйти на сверхзвуковое истечение микроструи водорода по причине запираания сопла областью перетяжки пламени, которая приводила к нагреву микросопла и предотвращала отрыв пламени от его среза. Одной из характеристик горения струйного течения при сверхзвуковом истечении, наряду с рядом других, является наличие сверхзвуковых структур как в струе, так и в пламени, но в ситуации отрыва пламени от среза сопла. Это детально продемонстрировано в работах [1; 3] 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.

В результате экспериментальных исследований получены четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая горение при наличии сверхзвуковых ячеек, как по воздуху, так и по водороду (рис. 6).

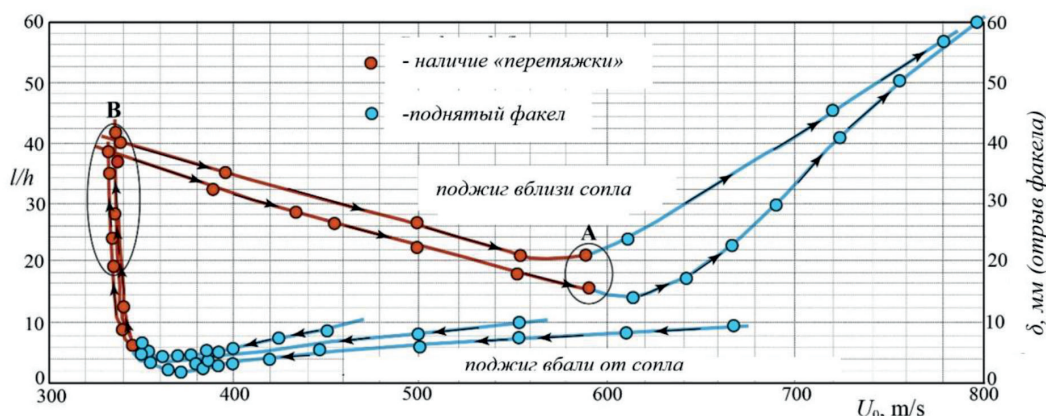


Рис. 7. График (гистерезис) зависимости пламени: развитие водородной микроструи в зависимости от скорости истечения и способ воспламенения (вблизи/вдали от среза сопла, диапазон скоростей (А) исчезновения сужения пламени область и начало отделения пламени и внешний вид (В) области сужения пламени. Стрелки указывают направление изменений в микроструе

Fig. 7. Graph of the dependence (hysteresis) of the development of a hydrogen microjet flame as a function of expulsion velocity and ignition method (near/far from the nozzle cutoff, velocity range (A) disappearance of the flame constriction region and the beginning of flame separation and appearance (B) of the flame constriction region. Arrows indicate the direction of change in the microjet

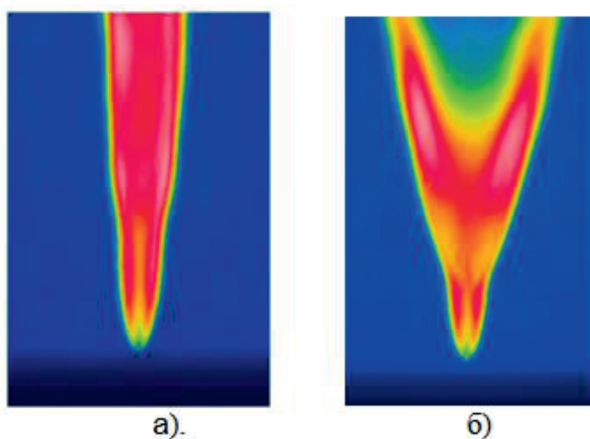


Рис. 8. Влияние акустического поля на форму пламени при скоростях истечения водорода менее 150 м/с (а) без акустического поля, (б) с наложенным акустическим полем (амплитуда 95 dB, $f = 5500$ Hz) (вид на узкую грань)

Fig. 8. Effect of acoustic field on the flame shape at hydrogen flow velocities less than 150 m/s (a) without acoustic field, (b) with superimposed acoustic field (amplitude 95 dB, $f = 5500$ Hz) (narrow edge view)

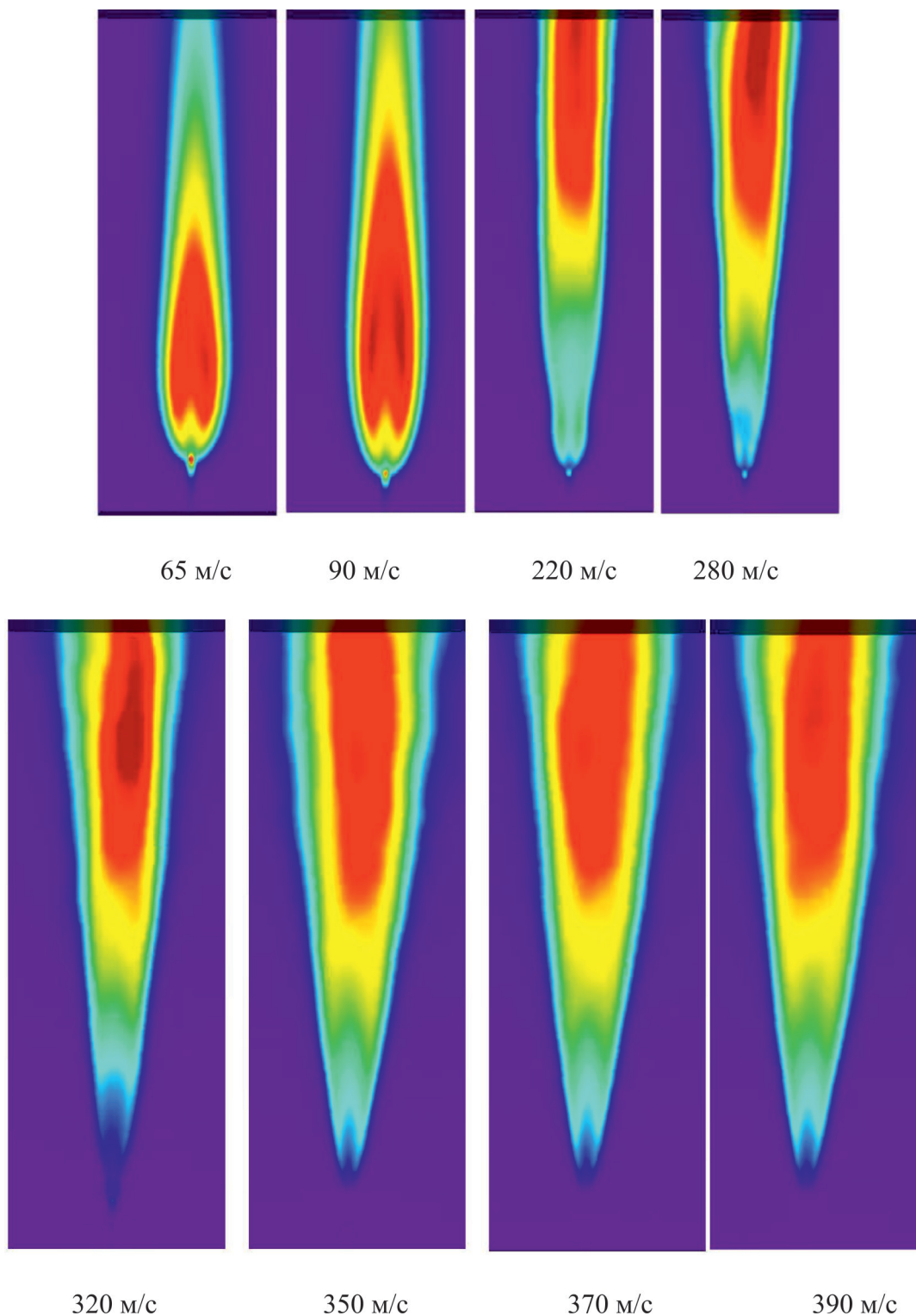


Рис. 9. Визуализация горения водорода с помощью тепловизора CEM DT-9897H для различных скоростей потока водорода

Fig. 9. Visualization of hydrogen combustion with the CEM DT-9897H thermal imager for different hydrogen flow rates

Для этого размера сопла при скоростях истечения водорода менее 150 м/с первого режима (сценария) истечения водорода было дополнительно найдено влияние акустического поля

на структуру плоской струи. Измерения в этом случае были проведены с использованием тепловизора, показывающего топологию пламени (рис. 8).

Для сравнения, в рамках этого исследования, был рассмотрен случай микросопла с размерами в шесть раз меньшими ($0,400$ на $0,07$ мм²). На рис. 6 приведены снимки, полученные с использованием тепловизора, пламени такой струи (вид на узкую грань). Как показали исследования, в диапазоне скоростей 320 – 370 м/с также наблюдается гистерезис в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения) (рис. 7). Отметим, что сценарии диффузионного горения для этого случая были другими и повторяли сценарии для круглого микросопла с диаметром 30 микрон (см. работу [7]).

Таким образом, при воздействии периодическим акустическим сигналом с частотой от 10 Гц до 20 КГц эффект расщепления или влияния отсутствовал во всем диапазоне скоростей (рис. 9).

Результаты сравнения показывают, с одной стороны, на возможность применимости тепловизора (мы видим нагретое сопло и топологию пламени), с другой стороны, на необходимость в дальнейшем подробных исследований этих случаев.

Заключение

Подводя итог этой части проведенных исследований, необходимо констатировать тот факт, что экспериментально обнаружено новое физическое явление микроструйного диффузионного горения водорода с нагревом сопла, обеспечивающее стабилизацию горения вплоть до транзвуковых скоростей истечения водорода. Обнаруженный режим может быть использован для различных технологических целей, таких как организация эффективного перемешивания различных потоков и их подогрев. В таком режиме сгорает только небольшая часть водорода, а остальная смешивается с продуктами горения и воздухом, в результате чего температура такой смеси может варьироваться (путем подбора скорости потока и диаметра сопла) от близкой к начальной до температуры самовоспламенения водорода. Кроме того, такая система может служить своеобразным реактором для осуществления, например, в мягких и контролируемых условиях различных термолитических реакций, таких как синтез наночастиц металлов и оксидов металлов из летучих металлосодержащих прекурсоров, обработка углеводородного сырья и др. Также такие системы могут быть использованы для организации эффективного смешения топлива с воздухом и подогрева такой смеси для летательных аппаратов и других горелочных устройств.

Список литературы

1. **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 (1). P. 457.
2. **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*. Elsevier, 2016. Vol. 41, iss. 44. P. 20240–20249.
3. **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.
4. **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. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.

5. 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 // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.
6. Грек Г. Р., Катарасов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
7. 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.
8. 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 // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 28–45.

References

1. 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*, Elsevier, 2019, vol. 44, iss. 1, p. 457.
2. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A. 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*. Elsevier, 2016, vol. 41, iss. 44, pp. 20240–20249.
3. Kozlov V. V., Grek G. G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental study of diffusion combustion of a round hydrogen microjet during its ignition far from the nozzle cutoff. *Siberian Physical Journal*, 2017, vol. 12, № 3, pp. 62–73. (in Russ.)
4. Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A. Various modes of diffusion combustion of a round hydrogen jet in air. *Vestnik. NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 27–41. (in Russ.)
5. Litvinenko Y. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G. Structure of the attached diffusion flame of a hydrogen microjet flowing from a slot nozzle. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 52–66. (in Russ.)
6. Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov G. V., Litvinenko M. V. Diffusion combustion of hydrogen (round beveled nozzle). *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, iss. 2, pp. 42–51.
7. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, pp. 457–462.
8. Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Y. A. Experimental study of diffusion combustion of a high-speed round hydrogen microjet. Part 1. Attached flame, subsonic flow. *Siberian Physical Journal*, 2017, vol. 12, № 2, pp. 28–45. (in Russ.)

Сведения об авторе

Литвиненко Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Information about the Author

Yury A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher

Статья поступила в редакцию 09.12.2024;

одобрена после рецензирования 12.12.2024; принята к публикации 19.12.2024

The article was submitted 09.12.2024;

approved after reviewing 12.12.2024; accepted for publication 19.12.2024