

Научная статья

УДК 532.525.2

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-62-84

Обзор исследований сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии

Александр Сергеевич Тамбовцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия
alsetams@gmail.com

Аннотация

В обзорной статье представлены результаты анализа особенностей процесса диффузионного горения водорода при истечении в воздушное пространство. В статье рассматриваются работы, посвященные экспериментальному изучению особенностей диффузионного горения одиночной микроструи водорода в зависимости от скорости истечения и способа воспламенения. Результаты систематизированы и выражены в безразмерных числах Рейнольдса. Также рассмотрен процесс диффузионного горения водорода при его истечении из сопловых устройств, обеспечивающих независимую соосную подачу воздуха. Рассматриваются экспериментально обнаруженные сценарии диффузионного горения микроструи водорода, окруженной потоком воздуха и впервые показанная возможность стабилизации процесса диффузионного горения микроструи водорода соосным потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели. Также рассматривается обнаруженный полезный эффект, позволяющий поддерживать горение водорода при воздействии потока водяного пара. Рассматривается эффект «запирания» процесса горения в узкой области конусовидной формы вблизи среза сопла при взаимодействии водорода, истекающего из кольцевого сопла, со сверхзвуковой струей воздуха, истекающей из соосно расположенного микросопла. Обсуждаются установленные условия и особенности взаимодействия двух одиночных микроструй водорода.

Ключевые слова

диффузионное горение, водород, микроструи, взаимодействие микроструй

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (грант № 22-19-00151) (<https://rscf.ru/en/project/22-19-00151/>).

Для цитирования

Тамбовцев А. С. Обзор исследований сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 4. С. 62–84. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-62-84

© Тамбовцев А. С., 2024

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 4
Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 4

Review of Research on Scenarios of Diffusion Combustion of Hydrogen Microjets During Their Interaction with Each Other

Alexander S. Tambovtsev

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

alsetams@gmail.com

Abstract

This review article presents the results of the analysis of the features of the process of diffusion combustion of hydrogen during its outflow into the air space. The article considers works devoted to the experimental study of the features of diffusion combustion of a single hydrogen microjet depending on the outflow velocity and the ignition method. The results are systematized and expressed in dimensionless Reynolds numbers. The process of diffusion combustion of hydrogen during its outflow from nozzle devices providing independent coaxial air supply is also considered. Experimentally discovered scenarios of diffusion combustion of a hydrogen microjet surrounded by an air flow are considered, and the possibility of stabilizing the process of diffusion combustion of a hydrogen microjet by a coaxial air flow flowing out of a coaxially located annular gap is shown for the first time. The discovered useful effect, which allows maintaining hydrogen combustion under the influence of a water vapor flow, is also considered. The effect of “locking” the combustion process in a narrow cone-shaped region near the nozzle exit is considered during the interaction of hydrogen flowing out of an annular nozzle with a supersonic air jet flowing out of a coaxially located micronozzle. The established conditions and features of the interaction of two single hydrogen microjets are discussed.

Keywords

diffusion combustion, hydrogen, microjets, microjets interaction

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant No. 22-19-00151 (<https://rscf.ru/project/22-19-00151/>).

For citation

Tambovtsev A. S. Review of research on scenarios of diffusion combustion of hydrogen microjets during their interaction with each other. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 62–84 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-62-84

Введение

В современном мире при производстве энергии широко используются ископаемые углеводороды. В последние десятилетия активно развиваются альтернативные технологии, направленные на использование возобновляемых источников энергии, и водородная энергетика является одним из перспективных направлений в этой области. В отличие от углеводородных топлив, продукты сгорания водорода не содержат токсичных и вредных веществ, что придает ей экологическую привлекательность. Процессы производства водорода включают электролиз воды, риформинг углеводородных топлив, газификацию угля и биомассы. Несмотря на перспективы, водородная энергетика сталкивается с техническими проблемами, в частности, связанными с хранением и транспортировкой водорода, а также с дороговизной производства экологически чистого водорода. Эти аспекты ограничивают широкое применение данной энергетической системы. Водородная энергетика в настоящее время является областью, которая активно развивается и привлекает внимание многих стран. Этот процесс связан с рядом следующих причин.

1. Экологическая приемлемость: использование водорода в качестве источника энергии может привести к снижению выбросов парниковых газов, таких как углекислый газ, что способствует борьбе с глобальным потеплением и улучшению состояния атмосферы.

2. Экономическая эффективность: водород может использоваться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, что позволяет увеличить их КПД и снизить выбросы вредных веществ.

3. Развитие технологий: современные технологии позволяют создавать эффективные и безопасные системы производства, хранения и использования водорода, что делает его применение более доступным и привлекательным.

4. Увеличение доли возобновляемых источников энергии: в связи с ростом использования возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце, возникает потребность в разработке технологий хранения и преобразования этой энергии в форму, удобную для использования. Водород может служить одним из таких средств.

Для создания технологий водородной энергетики необходимы, в частности, исследования режимов горения струйных течений водорода, характерных для различного рода форсунок, горелок и сопел. Результаты таких исследований позволят предложить новые технологические решения для устойчивого и безопасного сжигания газообразного водорода, истекающего с дозвуковой скоростью (и вплоть до транзвуковых скоростей), при горении в окружающей инертной среде (например, на входе в паровую турбину для повышения давления и поднятия температуры рабочего пара).

В настоящей статье рассматриваются работы, посвященные экспериментальным исследованиям основных сценариев диффузионного горения водорода при его истечении в виде одиночной микроструи, при взаимодействии струи водорода со спутными потоками воздуха, а также взаимодействия двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения.

Основные задачи, решаемые в исследованиях:

- 1) экспериментальное исследование основных сценариев диффузионного горения одиночной микроструи водорода;
- 2) экспериментальное исследование диффузионного горения струи водорода, истекающей из круглого микросопла, окруженной потоком воздуха, истекающей из концентрично расположенной щели;
- 3) экспериментальное исследование диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии струи воздуха, истекающей через круглое микросопло;
- 4) экспериментальное исследование взаимодействия двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения.

Ламинарно-турбулентный переход в дозвуковых струях, истекающих в свободное пространство, изучен достаточно подробно как теоретически, так и экспериментально, большое количество работ по этой тематике представлено в [1]. Профиль распределения скорости на срезе классических сопел конфузорного типа при больших числах Рейнольдса ($Re_d > 104$) имеет П-образную форму. Ламинарно-турбулентный переход в этом случае происходит в пределах начального участка струи в слое смешения. Основная неустойчивость, приводящая к разрушению струи – неустойчивость Кельвина – Гельмгольца. Удлинение канала классического сопла приводит к формированию параболического профиля скорости на срезе сопла и возникновению протяженного ламинарного участка струи (при той же скорости истечения) и смещению переходного участка далее по потоку. Открытыми остаются вопросы о развитии диффузионного водородного факела при наличии области ламинарно-турбулентного перехода, поскольку данная область формирует две зоны горения; влияние области воспламенения струи (вблизи среза сопла или на расстоянии) на гистерезис развития факела. Обсуждению этих вопросов посвящены работы [2–5].

Диффузионное горение одиночной микроструи водорода

В работе [6] проводится экспериментальное исследование сценариев диффузионного горения одиночной микроструи, а результаты, выраженные в безразмерных числах Рейнольдса, сравниваются с ранее проведенными исследованиями. Схема экспериментальной установки для исследования процесса диффузионного горения водорода при истечении из одиночного

микросопла из работы [6] представлена на рис. 1. Сопло представляет собой тонкостенную металлическую трубку с внутренним диаметром $d = 200$ мкм, удлинение канала $L = 20$ мм, таким образом, соотношение $L/d = 100$ способствует формированию параболического профиля скорости на срезе сопла, согласно [1]. Из баллона (1) газ попадет в сопло (4) через клапан регулятора массового расхода газа (1179B MKS Instruments) (2), который обеспечивает точность измерений в пределах 0,7 %. Управление объемным расходом газов осуществлялось при помощи блока управления (PR 4000B-F MKS Instruments) (3). Поджигание микроструи производилось как вблизи среза микросопла, так и на расстоянии от него – для реализации режима горения с факелом, оторванным от среза сопла. Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451 (5), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (6).

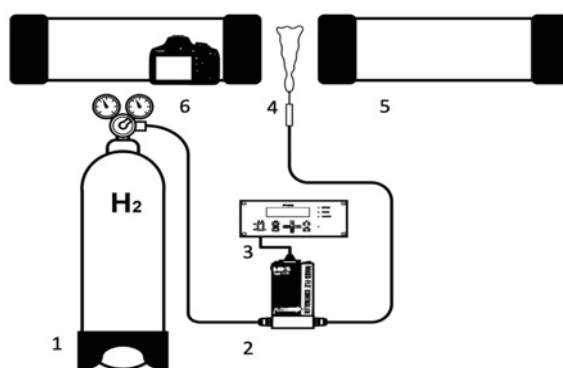


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – баллон со сжатым водородом; 2 – клапан расходомера (1179B MKS Instruments); 3 – контроллер расходомера (PR 4000B-F MKS Instruments); 4 – сопло; 5 – теневой прибор ИАБ-451; 6 – фотоаппарат

Fig. 1. Experimental setup:

1 – compressed hydrogen cylinder; 2 – flow meter valve (1179B MKS Instruments); 3 – flow meter controller (PR 4000B-F MKS Instruments); 4 – nozzle; 5 – IAB-451 shadow device; 6 – camera

Полученные в результате экспериментального исследования теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода для случая присоединенного факела представлены на рис. 2, 3. При низкой скорости истечения микроструи (вплоть до $U = 930$ м/с) результирующий факел оставался ламинарным с небольшим углом распространения, как видно из рис. 2, а. Увеличение скорости истечения водорода приводило к формированию двузонной структуры пламени. Первый участок пламени вблизи среза сопла приобретал характерную сферическую форму, которая наблюдалась также в работах [2–5]. На втором участке факела происходила интенсивная турбулизация потока и активное перемешивание водорода с воздухом. Второй участок факела приобретал конусообразную форму. При этом было обнаружено, что дальнейшее увеличение скорости истечения водорода приводило к уменьшению пространственных размеров сферического участка пламени, как видно из рис. 3.

Также было показано, что горение в двух зонах факела может происходить независимо. При высокой скорости истечения водорода горение в турбулентной области может прекращаться при сохранении горения в первой зоне, охватывающей срез сопла. Сферическая область пламени вблизи среза сопла выступает в качестве стабилизатора процесса горения в целом. Так, на рис. 4 показано, как при уменьшении скорости истечения водорода область пламени вблизи среза сопла способствует восстановлению процесса горения диффузионного факела во второй зоне.

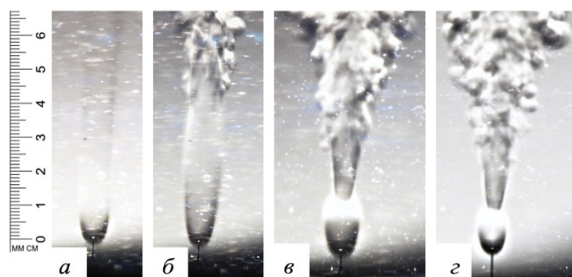


Рис. 2. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода

при различной скорости истечения микроструи U :
а) 305 м/с; б) 913 м/с; в) 1066 м/с; г) 1188 м/с

Fig. 2. Shadow patterns of the process of diffusion combustion of a hydrogen microjet, at different microjet flow velocities U :

а) 305 m/s; б) 913 m/s; в) 1066 m/s; г) 1188 m/s

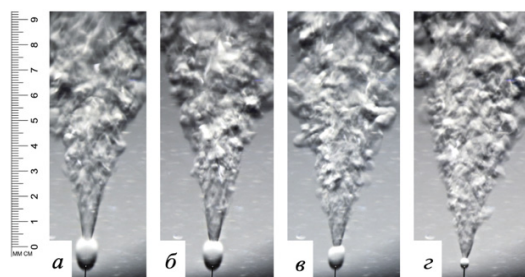


Рис. 3. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода,

при различной скорости истечения микроструи U :
а) 1248 м/с; б) 1370 м/с; в) 1706 м/с; г) 2010 м/с

Fig. 3. Shadow patterns of the process of diffusion combustion of a hydrogen microjet, at different microjet flow velocities U :

а) 1248 m/s; б) 1370 m/s; в) 1706 m/s; г) 2010 m/s

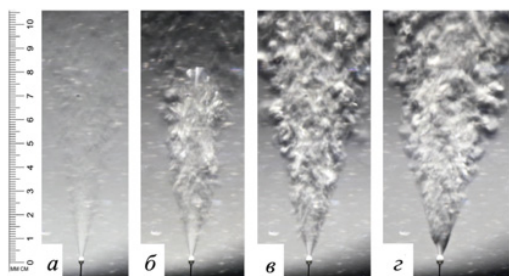


Рис. 4. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода

при различной скорости истечения микроструи U :
а) 2132 м/с; б) 2040 м/с; в) 2040 м/с; г) 2010 м/с

Fig. 4. Shadow patterns of the process of diffusion combustion of a hydrogen microjet, at different microjet flow velocities U :

а) 2132 m/s; б) 2040 m/s; в) 2040 m/s; г) 2010 m/s.

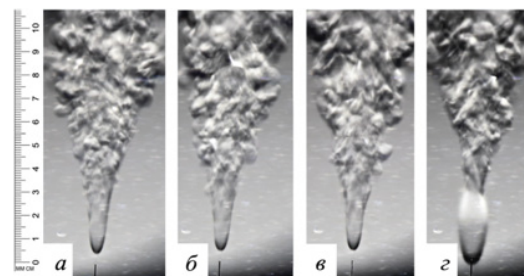


Рис. 5. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода

при различной скорости истечения микроструи U :
а) 1188 м/с; б) 1096 м/с; в) 1035 м/с; г) 944 м/с

Fig. 5. Shadow patterns of the process of diffusion combustion of a hydrogen microjet, at different microjet flow velocities U :

а) 1188 m/s; б) 1096 m/s; в) 1035 m/s; г) 944 m/s.

Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода с факелом, отошедшим от среза сопла, и переход к режиму горения с присоединенным факелом при уменьшении скорости истечения водорода представлен на рис. 5. Для данного сопла сценарии горения с факелом, оторванным от среза сопла, удавалось реализовать при воспламенении высокоскоростной микроструи $U \sim 1030$ м/с на расстоянии от среза сопла. В диапазоне скоростей истечения водорода $U = 944 - 1188$ м/с факел был оторван от сопла и при этом не происходило формирования двузонной структуры. Увеличение расхода или скорости истечения выше $U = 1188$ м/с приводило к срыву факела, а уменьшение скорости истечения ниже $U = 944$ м/с приводило к переходу режима горения с факелом, присоединенным к срезу сопла. Стоит отметить, что увеличение скорости истечения после реализации режима горения с присоединенным факелом приводит к развитию сценариев диффузионного горения аналогично тому случаю, как если бы воспламенение микроструи производилось вблизи среза сопла. Таким образом, существует гистерезис зависимости скорости истечения микроструи и наличия/отсутствия двузонной структуры пламени в зависимости от способа воспламенения микроструи вблизи или на расстоянии от среза микросопла.

Динамика уменьшения протяженности ламинарного участка пламени согласуется также с данными работ [2; 3] в ситуации воспламенения микроструи вблизи среза сопла. На рис. 6 по-

казаны кривые зависимости $l/d = f(U)$, где l – протяженность ламинарного участка, d – диаметр микросопла.

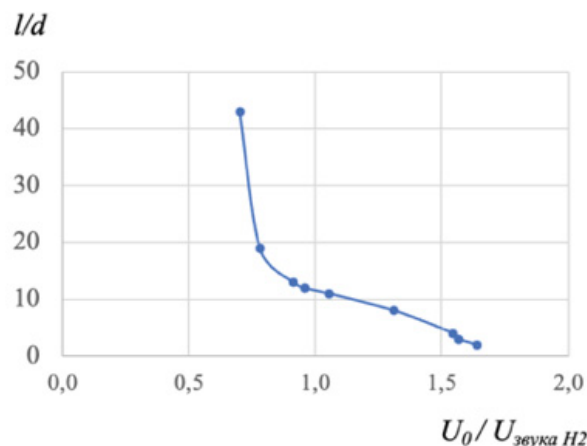


Рис. 6. Зависимость протяженности ламинарного участка пламени от скорости истечения

Fig. 6. Dependence of the length of the laminar flame section on the flow velocity

На рис. 7 показано, как происходит переход между сценариями диффузионного горения при изменении скорости истечения микроструи.

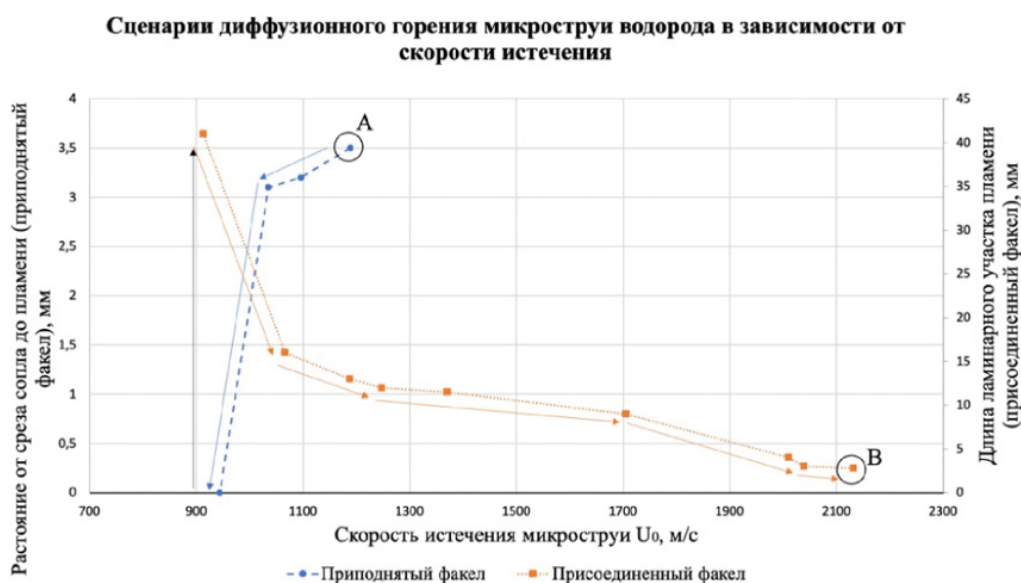


Рис. 7. Процесс перехода от одного сценария горения к другому.

Стрелками указана последовательность смены сценариев при изменении скорости истечения

Fig. 7. The process of transition from one combustion scenario to another.

The arrows indicate the sequence of scenario transitions when the flow rate changes

По оси абсцисс отложена среднерасходная скорость истечения микроструи. По оси ординат справа отложена длина ламинарного участка пламени – протяженность участка пламени, охватывающего срез сопла (в случае, когда воспламенение происходит вблизи среза сопла). По оси ординат слева отложена величина отрыва пламени – расстояние от среза сопла до факела (в случае, когда воспламенение происходит на расстоянии от среза сопла). В начальной

точке **A** наиболее высокая скорость, при которой поддерживается горение с факелом, оторванным от среза сопла. Далее при ее постепенном уменьшении (на графике отображено изменение расстояние от среза сопла до факела) при скорости около $U \sim 950$ м/с факел становится присоединенным, дальнейшее увеличение скорости истечения водорода после присоединения факела приводило к уменьшению ламинарного участка факела вблизи среза сопла (на графике отображено изменение протяженности ламинарного участка пламени), однако отрыва факела с увеличением скорости истечения струи не происходило. В точке **B** наиболее высокая скорость истечения, при которой поддерживается горение. Диапазон скоростей, при которых существует горение с приподнятым над срезом сопла пламенем, существенно уже, чем диапазон скоростей, при которых существует горение с присоединенным пламенем. Гистерезис зависимости процесса развития пламени круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения и способа воспламенения (вблизи или на расстоянии от среза сопла), диапазон скорости исчезновения перетяжки пламени и начало отрыва пламени, диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления перетяжки пламени также обсуждались в работе [4], однако там использовалось сопло большего диаметра, поэтому сценарии развития диффузионного горения в области высоких расходов несколько различаются, поскольку в том случае удастся реализовать режим горения с факелом, отошедшим от среза сопла, не прибегая к воспламенению микроструи на расстоянии от среза сопла. Тем не менее динамика уменьшения ламинарного участка пламени с ростом скорости струи и в целом гистерезисный цикл в проведенном исследовании и в [4] схожи.

Обобщая новые данные для микроструй, истекающих из сопла, с диаметром $d = 200$ с ранее полученными для струй, истекающих из сопел с диаметрами $d = 500$ мкм, из работы [5], сценарии диффузионного горения микроструи водорода были привязаны к безразмерным числам Рейнольдса, рассчитанными по диаметру микросопла:

$$Re_d = \frac{\rho u d}{\mu}.$$

В табл. 1 выделены основные сценарии диффузионного горения для микросопел с диаметрами $d = 200$ мкм из [6] и взяты диапазоны сценариев из работы [5] для микроструи, истекающей из сопла с $d = 500$ мкм.

Таблица 1

Сценарии диффузионного горения микроструй водорода
в зависимости от чисел Рейнольдса

Table 1

Scenarios of diffusion combustion of hydrogen microjets depending on Reynolds numbers

Описание сценария	d , мкм	Re_d
1. Ламинарное горение	200	< 1330
	500	< 1700
2. Двухзонная структура пламени	200	1330–4103
	500	1700–4600
3. Срыв пламени на турбулентном участке при сохранении горения на ламинарном участке	200	4165–4351
	500	4220–4600
4. Горение с факелом, приподнятым над срезом сопла	200	2112–2425
	500	1950–2342
5. Прекращение горения микроструи	200	> 4353
	500	> 4860

Диффузионное горение струи водорода, истекающей из круглого микросопла, окруженной потоком воздуха, истекающей из концентрично расположенной щели

Следующий этап исследований связан с изучением горения микроструи водорода, взаимодействующей с соосными потоками воздуха. В работе [7] представлены результаты экспериментального исследования диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из соплового аппарата, обеспечивающего одновременную подачу воздуха из соосно расположенного кольцевого сопла таким образом, что потоки смешиваются только на выходе из соплового аппарата. В экспериментах использовался сопловой аппарат, который обеспечивал независимую подачу газов через цилиндрическое микросопло и через соосно расположенное щелевое сопло. Схема соплового устройства в разрезе показана на рис. 8. Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рис. 9. Из баллонов воздух (1) и водород (2) через аналогично устроенные трассы попадают на клапаны регуляторов массового расхода газа (4) и (5) (1179В MKS Instruments), которые обеспечивают точность измерений в пределах 0,7 % и далее в сопловое устройство (6).

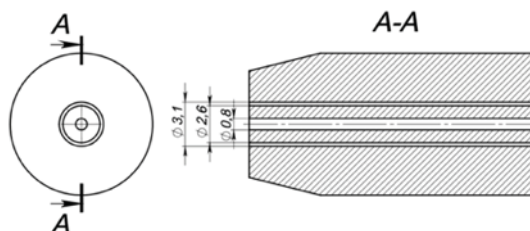


Рис. 8. Чертеж соплового устройства в разрезе

Fig. 8. Sectional drawing of the nozzle device

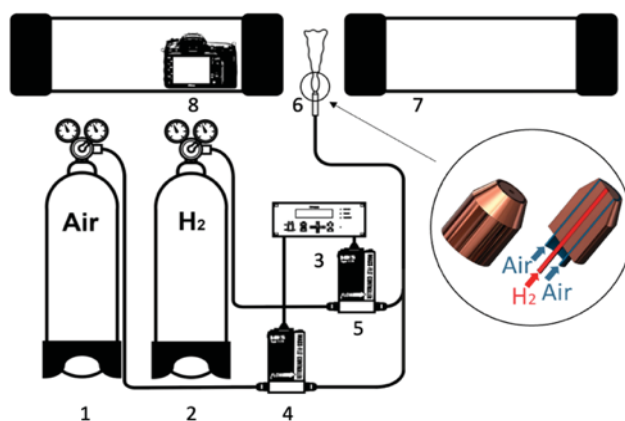


Рис. 9. Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство:

1 – баллон со сжатым водородом; 2 – баллон со сжатым воздухом; 3 – контроллер расходомера; 4, 5 – клапаны расходомера; 6 – сопловое устройство; 7 – теневой прибор ИАБ-4514; 8 – цифровая камера

Fig. 9. The schematic layout of the experimental setup and the gas flow system for the nozzle device:

1 – compressed hydrogen cylinder; 2 – compressed air cylinder; 3 – flow meter controller; 4, 5 – flow meter valves; 6 – nozzle device; 7 – IAB-451 shadow device; 8 – digital camera

На рис. 10 представлены результаты теневой визуализации при одновременном истечении водорода из микросопла и воздуха из соосно расположенного щелевого сопла, при этом скорость истечения водорода зафиксирована, а скорость истечения воздуха постепенно увели-

чивается. Изначально в отсутствии спутного потока воздуха струя имела развитую двузонную структуру факела, как показано на рис. 10, а. Возникновение спутного потока воздуха изменяло результирующую форму факела. Форма факела вблизи среза сопла трансформировалась из сферической в цилиндрическую, как видно из рис. 10, б, а увеличение скорости истечения потока воздуха приводило к вытягиванию этой зоны вблизи среза сопла, что видно на рис. 10, г.

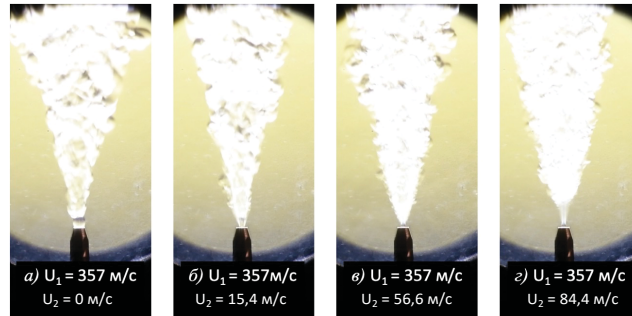


Рис. 10. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = \text{const}$), окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости истечения, срыв факела при скорости $U_2 = 86$ м/с

Fig. 10. Diffusion combustion of a hydrogen microjet ($U_1 = \text{const}$) surrounded by an air flow from a coaxially located annular gap at different flow rates, flame breakdown at a jet velocity $U_2 = 86$ m/s

На рис. 11 представлены результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения микроструи водорода, окруженной потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели, в случае, когда воспламенение производилось на расстоянии от среза сопла. Возникновение спутного потока воздуха не изменяло результирующую форму факела, но увеличение скорости истечения спутного потока воздуха приводило к увеличению дистанции отрыва факела от среза сопла.

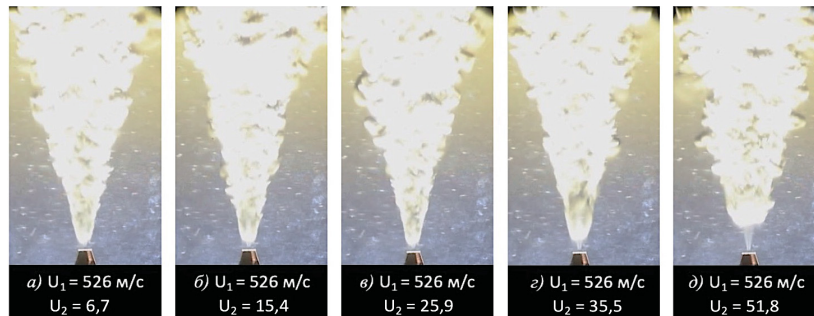


Рис. 11. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = \text{const}$), окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости, сценарии с приподнятым над срезом сопла факелом

Fig. 11. Diffusion combustion of a hydrogen microjet ($U_1 = \text{const}$) surrounded by an air flow from a coaxially located annular gap at different speeds, scenarios with a flame raised above the nozzle exit.

При диффузионном горении микроструи водорода в отсутствии спутного потока воздуха реализовывались основные сценарии, характерные для одиночной микроструи водорода (которые уже обсуждались ранее в текущей статье), а также дополнительные сценарии, до этого обнаруженные только для микросопел с $d = 1200$ мкм [4], в данном случае удавалось получить сценарий с факелом, отошедшим от среза сопла. В данном случае диаметр микросопла, из которого происходит истечение водорода, больше в 4 раза, чем у микросопла из работы [6].

Диапазоны существования основных сценариев для диффузионного горения одиночной микроструи из работ [5; 6], в безразмерных числах Рейнольдса, рассчитанных по диаметру, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сценарии диффузионного горения микроструй водорода
в зависимости от чисел Рейнольдса

Table 2

Scenarios of diffusion combustion of hydrogen microjets depending on Reynolds numbers

Описание сценария	d , мкм	Re_d
1. Ламинарное горение	200	до 1330
	500	до 1700
	800	до 1653
2. Двухзонная структура пламени	200	1330–4103
	500	1700–4600
	800	1653–4415
3. Факел, приподнятый над срезом сопла	200	2112–2425
	500	1950–2342
	800	3850–4958

Также при исследовании диффузионного горения микроструи водорода был обнаружен полезный эффект. На рис. 12 показана теневая картина процесса диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из центрального микросопла соплового аппарата, и результат воздействия на нее потока водяного пара.

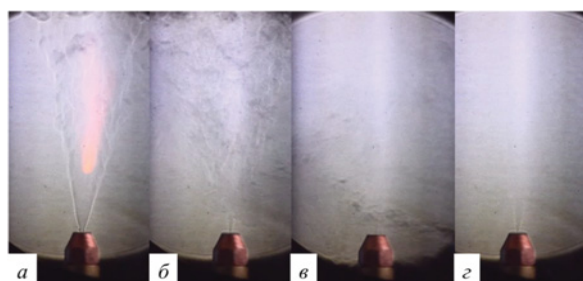


Рис. 12. Результат воздействия водяного пара на процесс диффузионного горения водорода, скорость истечения микроструи водорода $U_1 = 500$ м/с:

a – диффузионное горение микроструи водорода, истекающей из микросопла; b – момент возникновения слабого поперечного потока водяного пара и затухание микроструи; v – истечение микроструи, сносимой поперечным потоком водяного пара; z – свободное истечение микроструи в отсутствии потока водяного пара

Fig. 12. The result of the influence of water vapor on the process of diffusion combustion of hydrogen. The velocity of the hydrogen microjet flow $U_1 = 500$ m/s:

a – diffusion combustion of a hydrogen microjet flowing out of a micronozzle; b – the moment of occurrence of a weak transverse flow of water vapor and attenuation of the microjet; v – the flow of a microjet carried away by a transverse flow of water vapor; z – free flow of a microjet in the absence of a flow of water vapor

Изначально, при отсутствии воздействия, процесс горения был стабильным, скорость истечения микроструи водорода $U_1 = 600$ м/с. При такой скорости истечения факел имеет развитую двухзонную структуру, а протяженность ламинарной зоны пламени сферической зоны

вблизи среза сопла $l/d = 3,75$, как показано на теневой картине (рис. 12, а). Однако слабый поперечный поток водяного пара (создаваемый парогенератором) приводил к прекращению процесса горения (рис. 12, б, в). Можно сделать вывод, что такая струя водяного пара способна потушить данный водородный факел.

На рис. 13 показаны теневые картины эксперимента с аналогичным поперечным потоком водяного пара, но уже в ситуации факела, в котором микроструя водорода была окружена спутным потоком воздуха, скорость истечения микроструи водорода $U_1 = 600$ м/с, а скорость истечения спутного потока воздуха $U_2 = 16$ м/с. Результирующий факел имел двузонную структуру, зона пламени вблизи среза сопла теперь приобретала цилиндрическую форму. В случае когда микроструя водорода была окружена потоком воздуха, поперечный поток водяного пара не был способен полностью потушить микрострую. При этом поток водяного пара был способен потушить турбулентную область струи, но горение из первой области вблизи среза сопла быстро распространялось на вторую область. Таким образом, можно сделать вывод, что соосный поток воздуха приводил к дополнительной стабилизации процесса горения. Поток воздуха, истекающий из соосно расположенной кольцевой щели, позволяет организовать устойчивую зону смешения горючего с окислителем и защищает процесс горения от воздействия внешнего потока водяного пара.

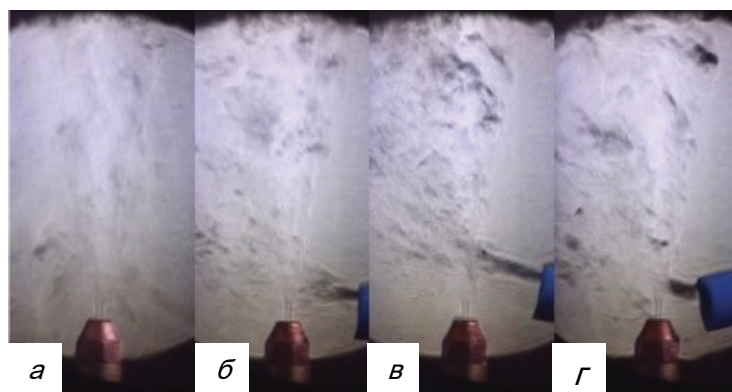


Рис. 13. Результат воздействия водяного пара на процесс диффузионного горения водорода:

$$U_1 = 500 \text{ м/с}, U_2 = 30 \text{ м/с}$$

Fig. 13. The result of the influence of water vapor on the process of diffusion combustion of hydrogen:

$$U_1 = 500 \text{ м/с}, U_2 = 30 \text{ м/с}$$

Диффузионное горение струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, в присутствии струи воздуха, истекающей через круглое микросопло

Результаты экспериментального исследования процесса диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, в присутствии потока воздуха при использовании соплового аппарата, аналогичного использованному в [7], с измененным способом подачи воздуха и водорода (водород подавался через кольцевое сопло, а воздух – через соосно расположенное цилиндрическое микросопло), представлены в работе [8]. Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рис. 14. Из баллонов воздух (1) и водород (2) через аналогично устроенные трассы попадают на клапаны регуляторов массового расхода газа (4) и (5) (1179В MKS Instruments), которые обеспечивают точность измерений в пределах 0,7 % и далее в сопловое устройство (6). Поджигание микроструи производилось вблизи среза сопла. Процесс диффузионного горения также визуализировался с помощью тепловизора СЕМ DT-9897Н.

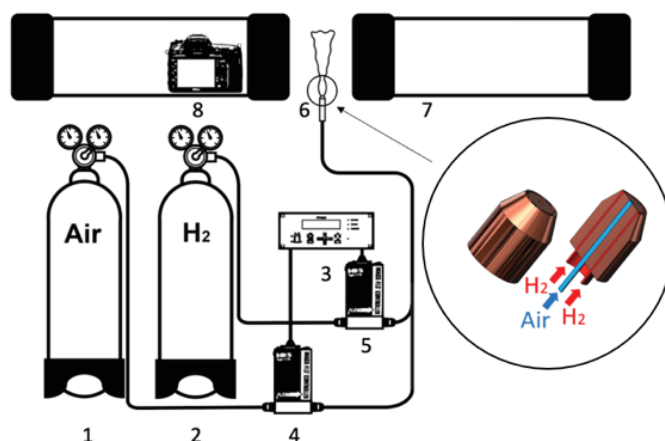


Рис. 14. Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство:

1 – баллон со сжатым водородом; 2 – баллон со сжатым воздухом; 3 – контроллер расходомера;

4, 5 – клапаны расходомера; 6 – сопловое устройство; 7 – теневой прибор ИАБ-451; 8 – цифровая камера

Fig. 14. The schematic layout of the experimental setup and the gas flow system for the nozzle device:

1 – compressed hydrogen cylinder; 2 – compressed air cylinder; 3 – flow meter controller; 4, 5 – flow meter valves;

6 – nozzle device; 7 – IAB-451 shadow device; 8 – digital camera

Результаты теневой визуализации горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла при отсутствии истечения воздуха из центрального микросопла, показаны на рис.15. При низких значениях расхода водорода наблюдался ламинарный факел, охватывающий верхнюю часть соплового аппарата, как показано на рис. 15, а. Увеличение скорости истечения водорода приводило к формированию факела с двузонной структурой. Факел вблизи среза сопла приобретал сферическую форму, затем следовала «перетяжка» пламени и конически расширяющаяся зона с турбулентным характером течения и горения, как показано на рис. 15, б. Дальнейшее увеличение скорости истечения водорода приводило к тому, что зона вблизи среза сопла приобретала цилиндрическую форму (рис. 15, в). При скорости истечения $U_2 = 40$ м/с происходил отрыв факела от среза сопла (рис. 15, г).

Как и при горении струи водорода, истекающей из цилиндрического сопла, формировался двузонный факел. Однако в данной ситуации вместо сферической формы вблизи среза сопла при увеличении скорости истечения водорода формировалась область факела в виде полого цилиндра, прикрепленного к соплу, с внешним диаметром, превышающим диаметр кольцевого сопла.

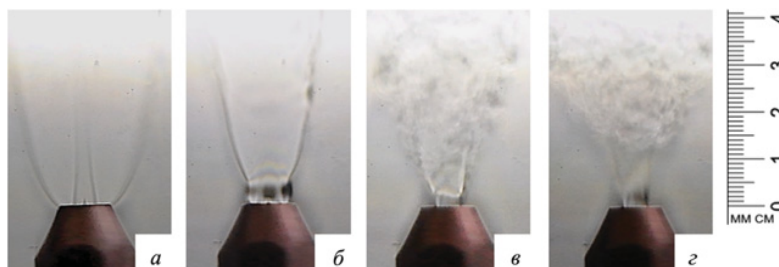


Рис. 15. Теневые картины диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, при различной скорости истечения U_2 :

а) 7,5 м/с; б) 14 м/с; в) 27 м/с; г) 40 м/с

Fig. 15. Shadow patterns of diffusion combustion of a hydrogen jet flowing out of an annular nozzle at different flow velocities U_2 :

а) 7,5 m/s; б) 14 m/s; в) 27 m/s; г) 40 m/s

Возникновение потока воздуха, истекающего через микросопло, влияло на процесс диффузионного горения микроструи водорода, истекающего из кольцевого сопла, и кардинально меняло форму результирующего факела. На рис. 16 показаны результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения струи водорода, истекавшей из кольцевого сопла, в присутствии высокоскоростной струи воздуха (скорость струи воздуха составляла $U_1 = 398$ м/с).

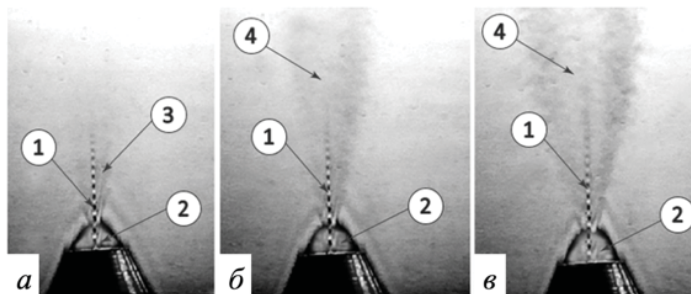


Рис. 16. Теневые картины горения струи водорода, истекающей из кольцевой щели, при различных скоростях, при наличии центральной сверхзвуковой струи воздуха $U_1 = 398$ м/с:

- а) $U_2 = 7,5$ м/с; б) $U_2 = 14$ м/с; в) $U_2 = 17$ м/с; 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха; 2 – область «запертого» пламени; 3 – выход водорода из области 2 без горения; 4 – локальное воспламенение, неустойчивое горение

Fig. 16. Shadow patterns of combustion of a hydrogen jet flowing out of an annular gap at different speeds, in the presence of a central supersonic air jet $U_1 = 398$ m/s:

- а) $U_2 = 7,5$ m/s; б) $U_2 = 14$ m/s; в) $U_2 = 17$ m/s; 1 – supersonic cells on a round air microjet; 2 – region of «trapped» flame; 3 – hydrogen exit from region 2 without combustion; 4 – local ignition, unstable combustion

При низкой скорости истечения водорода из кольцевого сопла вместо полого ламинарного цилиндра, прикрепленного к соплу, возникала конусообразная структура, границы которой хорошо видны на визуализации, внутри которой происходило горение, а выходящая из этого конуса газовая смесь не воспламенялась, т. е. происходило «запирание пламени» в этом конусе (рис. 16, а). Это явление наблюдалось в диапазоне скоростей истечения водорода $U_2 = 7,5 - 17$ м/с. На рис. 17 показаны теневые картины дальнейшего развития сценариев диффузионного горения струи водорода в присутствии высокоскоростной струи воздуха.

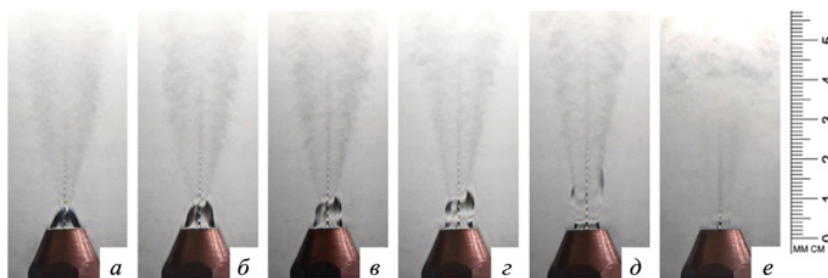


Рис. 17. Теневые картины горения H_2 при его истечении совместно со сверхзвуковым потоком воздуха при наличии центральной сверхзвуковой микроструи воздуха $U_1 = 398$ м/с.

От а) к е) скорость истечения водорода U_2 увеличивается: а) 5 м/с; б) 17 м/с; в) 25 м/с; г) 45 м/с; д) 50 м/с; е) 60 м/с

Fig. 17. Shadow patterns of H_2 combustion during its outflow together with a supersonic air flow in the presence of a central supersonic air microjet $U_1 = 398$ m/s. From а) to е), the hydrogen outflow velocity U_2 increases:

- а) 5 m/s; б) 17 m/s; в) 25 m/s; г) 45 m/s; д) 50 m/s; е) 60 m/s

При последовательном увеличении скорости истечения водорода в присутствии сверхзвукового потока воздуха поток водорода все активнее прорывается далее вверх по течению, воз-

никают области неустойчивого горения в области турбулентного факела, что сопровождается генерацией акустического шума. Одновременно с этим зона факела вблизи среза сопла постепенно трансформируется из конусообразной сначала к усеченному конусу, большее основание которого со стороны среза сопла, затем к цилиндрической, полусферической и при дальнейшем увеличении скорости истечения водорода вытягивается.

Как уже упоминалось ранее, процесс диффузионного горения также визуализировался с помощью тепловизора. Тепловизор и не позволяет точно определить поля температур, тем не менее с помощью него получены удовлетворительные картины, демонстрирующие топологию результирующего факела. Полученные с помощью тепловизора картины представлены на рис. 18 и 19. В данном случае скорость истечения водорода была зафиксирована, а скорость истечения воздуха регулировалась.

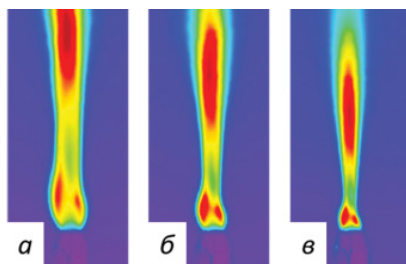


Рис. 18. Визуализация процесса диффузионного горения с помощью тепловизора:

а) $U_1 = 49,7$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; б) $U_1 = 99,5$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; в) $U_1 = 132,6$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с

Fig. 18. Visualization of the diffusion combustion process using a thermal imager: а) $U_1 = 49.7$ m/s, $U_2 = 47.4$ m/s;

б) $U_1 = 99,5$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; в) $U_1 = 132.6$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с

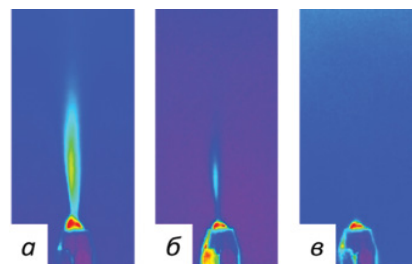


Рис. 19. Визуализация процесса диффузионного горения с помощью тепловизора:

а) $U_1 = 451$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; б) $U_1 = 583,6$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; в) $U_1 = 696,3$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с

Fig. 19. Visualization of the diffusion combustion process using a thermal imager: а) $U_1 = 451$ m/s, $U_2 = 47.4$ m/s;

б) $U_1 = 583.6$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с; в) $U_1 = 696.3$ м/с, $U_2 = 47,4$ м/с

Как видно из рис. 18, пространственные размеры зоны факела близи среза сопла, имеющей сферическую форму, уменьшаются при увеличении среднерасходной скорости истечения струи воздуха. Струя воздуха, истекающая со сверхзвуковой скоростью, изменяет топологию пламени, что видно из рис. 19, в. Зона факела вблизи среза сопла приобретает конусовидную форму, ее пространственные размеры уменьшаются с увеличением скорости истечения струи воздуха. На рис. 19, в показан момент, когда процесс горения заперт в узкой области вблизи среза соплового аппарата.

Сценарии диффузионного горения одиночной струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, связаны с формированием двузонной структуры пламени при небольшой скорости истечения. Отрыв факела от среза сопла происходит при увеличении расхода или скорости истечения водорода. Стоит отметить, что при исследовании сценариев диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, в присутствии сверхзвуковой струи воздуха, было обнаружено новое явление. Возникновение сверхзвуковой струи воздуха, истекающей из центрального сопла, приводит к тому, что изначально ламинарный факел от горения кольцевой струи водорода запирается в узкой области вблизи среза сопла. Топология результирующего факела, воспламенение зоны вдали от среза сопла зависит от соотношения скоростей истечения воздуха/водорода. Прорыву водорода из узкой области конусной формы с воспламенением второй турбулентной зоны способствует либо уменьшение скорости истечения воздуха до дозвуковых значений, либо увеличение расхода или скорости истечения водорода. Увеличение скорости истечения воздуха также приводит к запираанию горения в области вблизи среза сопла, и результирующий факел приобретает конусную форму. Истечение воздуха происходит со

сверхзвуковой скоростью, что подтверждают результаты теневой визуализации, на которых присутствуют сверхзвуковые скачки уплотнений в течении.

В зависимости от скорости истечения водорода можно условно выделить следующие этапы горения спутной струи водорода при наличии в центре сверхзвуковой струи воздуха.

1. При малой скорости истечения водорода и поджигании вблизи сопла горение «запирается» в конусе. Наблюдается горение вблизи среза сопла, факел имеет конусовидную форму, при этом сверхзвуковая струя воздуха пронизывает этот факел и выходит через вершину конуса, выбрасывая смесь воздуха и водорода, в которой горение отсутствует.

2. При увеличении скорости истечения водорода происходит распространение пламени вниз по струе, образуются локальные области горения, генерирующие акустический шум, конусовидная область трансформируется в полусферу.

3. Происходит стабильное турбулентное горение с генерацией акустического шума. Вблизи среза сопла наблюдаются области ламинарного течения, окружающие сверхзвуковую струю воздуха.

4. При дальнейшем увеличении скорости истечения область турбулентного горения смещается ближе к срезу сопла, ламинарный факел исчезает.

5. При уменьшении скорости истечения водорода последовательно происходит переход от этапа 4 к 1.

Взаимодействие двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения

Микрогорелочные устройства находят широкое применение в различных областях науки и техники. Отличительными особенностями микрогорелочных устройств является их безопасность, высокая степень управляемости сценариями горения и возможность масштабирования устройства путем изменения числа микрогорелок. Устройство, состоящее из нескольких горелочных устройств, подразумевает возможность столкновения и взаимодействия потоков, истекающих из сопел. Поведение струй при столкновении зависит от множества факторов, среди которых скорость, угол, диаметр сопел. Взаимодействие может привести к образованию вихрей и турбулизации потока в области столкновения, уменьшению скорости или изменению направления течения. Все это повлияет на характер диффузионного горения результирующего факела.

В [9] приведены результаты экспериментальных исследований микроструй, расположенных под небольшим углом друг относительно друга, и определены основные особенности топологии результирующего факела при различной скорости истечения для случая пересекающихся и смещенных микроструй, при воспламенении вблизи и на расстоянии от среза микросопел. Полученные результаты о развитии сценариев диффузионного горения взаимодействующих микроструй сравниваются с экспериментальными данными, полученными для одиночной микроструи, истекающей из сопел того же диаметра, при таких же значениях чисел Рейнольдса. Схема экспериментальной установки, использованной в [9], представлена на рис. 20. Сжатый водород из баллона (1) подается на клапан регулятора объемного расхода газа (1179B MKS Instruments) (2), обеспечивающий точность измерения расхода в пределах 0,7 %. Клапан регулятора управляется контроллером (PR 4000B-F MKS Instruments) (3). Далее трасса с водородом раздваивается, каждая выходит на свое сопло (4), представляющее собой вытянутую цилиндрическую тонкостенную трубку. Скорость истечения из пары микросопел $U = U_1 = U_2$. В экспериментах использовались пары сопел с внутренними диаметрами $d_1 = d_2 = 200$ мкм, а удлинение канала $L/d = 200$ способствовало формированию параболического профиля скорости на срезе сопла. Сопла располагались симметрично, относительно вектора $\mathbf{g}$, угол между ними составлял 50° . Визуализация горения производилась с помощью теневого метода с использованием установки ИАБ-451 (5). Снимки теневых картин получены с помощью цифровой

камеры (6). Также процесс диффузионного горения визуализировался с помощью тепловизора СЕМ DT-9897Н.

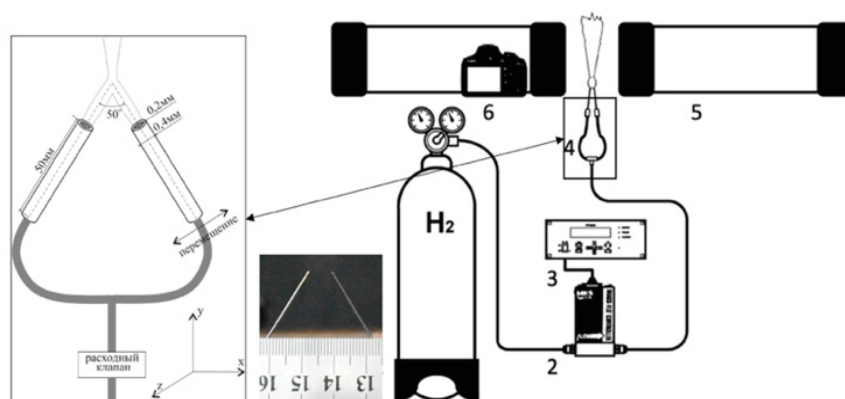


Рис. 20. Схема экспериментальной установки:

1 – баллон со сжатым водородом; 2 – расходомер; 3 – контроллер расходомера; 4 – теневой прибор ИАБ – 451;
5 – микросопла, расположенные под углом; 6 – цифровой фотоаппарат

Fig. 20. The schematic layout of the experimental setup:

1 – cylinder with compressed hydrogen; 2 – flow meter; 3 – flow meter controller; 4 – shadow device IAB – 451;
5 – micro nozzles located at an angle; 6 – digital camera

На рис. 21 показано, как выглядит истечение из одиночной микроструи, ориентированной под углом к горизонту (рис. 21, а), взаимодействие микроструй, оси которых пересекаются (рис. 21, б), и взаимодействие микроструй, оси которых смещены на расстояние порядка двух диаметров микросопел (рис. 21, в), при одинаковых скоростях истечения микроструй водорода. Результаты визуализации показывают, что смещение оси одной микроструи относительно другой влияет на турбулизацию результирующего факела.

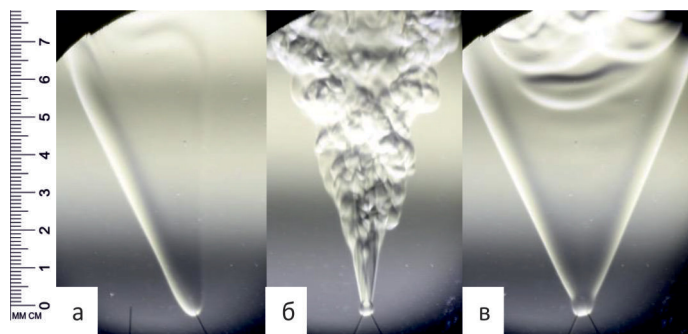


Рис. 21. Теневые картины:

а – факел одиночной микроструи; б – взаимодействие присоединенных факелов пересекающихся микроструй;
в – взаимодействие присоединенных факелов непересекающиеся микроструй, оси которых смещены на расстояние $= 2d$. Во всех случаях скорости истечения микроструй одинаковы $U = U_1 = U_2 = 457$ м/с ($Re_d = 932$)

Fig. 21. Shadow patterns:

а – the jet flame of a single microstream; б – interaction of attached flames of intersecting microjets;
в – interaction of attached flames of non-intersecting microjets, the axes of which are shifted by a distance $= 2d$.
In all cases, the outflow velocities of the microjets are the same $U = U_1 = U_2 = 457$ м/с ($Re_d = 932$)

Свободно истекающая одиночная микроструя, ориентированная под углом, формирует ламинарный факел, из-за относительно небольшой скорости истечения $U = 457$ м/с ($Re_d = 932$)

влияние сил конвекции приводит к значительной деформации факела. Взаимодействие микроструй, оси которых пересекаются, приводит к формированию развитого турбулентного результирующего факела, о чем свидетельствует наличие вихревых структур результирующего факела на теневой картине. При такой ориентации микросопел наблюдается сужение результирующего факела в плоскости наблюдателя и уширение факела в плоскости, перпендикулярной плоскости наблюдателя. Небольшое смещение микроструй таким образом, чтобы оси микросопел лежали в плоскостях, смещенных друг относительно друга, на расстояние порядка двух диаметров микросопел, приводит к формированию результирующего факела, который уширяется в плоскости наблюдателя. При этом также на расстоянии 5 см ($200d$ микросопла) на теневой картине не наблюдается вихревых структур, следовательно, на таком расстоянии факел остается ламинарным. В результате можно сделать вывод, что смещение осей микроструй способно влиять на процесс ламинарно-турбулентного перехода в результирующем факеле взаимодействующих микроструй водорода.

На рис. 22 показаны результаты экспериментов, в которых зафиксировано положение микросопел таким образом, чтобы микроструи не пересекались, и рассмотрены сценарии горения в зависимости от скорости истечения микроструй, а также слева от взаимодействующих микросопел представлены картины диффузионного горения одиночной микроструи, истекающей при тех же скоростях.

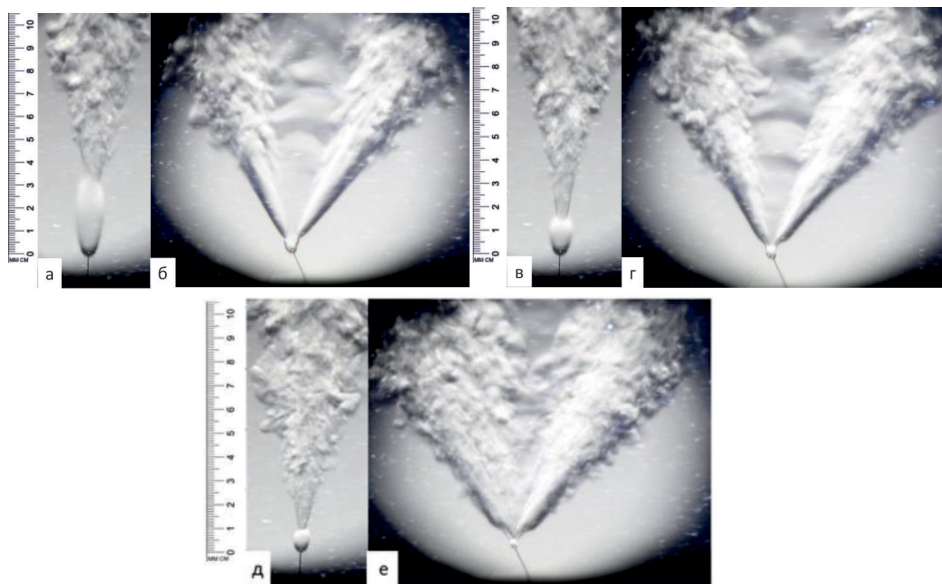


Рис. 22. Теневая визуализация, взаимодействия факелов с двузонной структурой (справа),
изначальная структура пламени микроструи при той же скорости (слева):
а, б) $U = U_1 = U_2 = 913$ м/с ($Re_d = 1865$); в, г) $U = U_1 = U_2 = 1188$ м/с ($Re_d = 2424$);
д, е) $U = U_1 = U_2 = 1706$ м/с ($Re_d = 3419$)

Fig. 22. Shadow visualization of the interaction of jet flames with a two-zone structure (on the right),
and the initial structure of the microjet flame at the same velocity (on the left):
а, б) $U = U_1 = U_2 = 913$ m/s ($Re_d = 1865$); в, г) $U = U_1 = U_2 = 1188$ m/s ($Re_d = 2424$);
д, е) $U = U_1 = U_2 = 1706$ m/s ($Re_d = 3419$)

Все микроструи имеют скорость истечения, достаточную для формирования изначально двузонной структуры со сферической зоной пламени, охватывающей срез сопла и развитым турбулентным факелом далее вверх по потоку. Скорость истечения микроструи водорода достаточно высокая, и ориентация сопел под таким углом слабо влияет на формирование двузонной структуры факела и на протяженность ламинарного участка вблизи среза сопла, как было

показано в работе [3]. При увеличении скорости истечения микроструй также постепенно увеличивается угол раскрытия результирующего факела до значения $\sim 50^\circ$, что продемонстрировано на серии теневых картин, представленных на рис. 23.

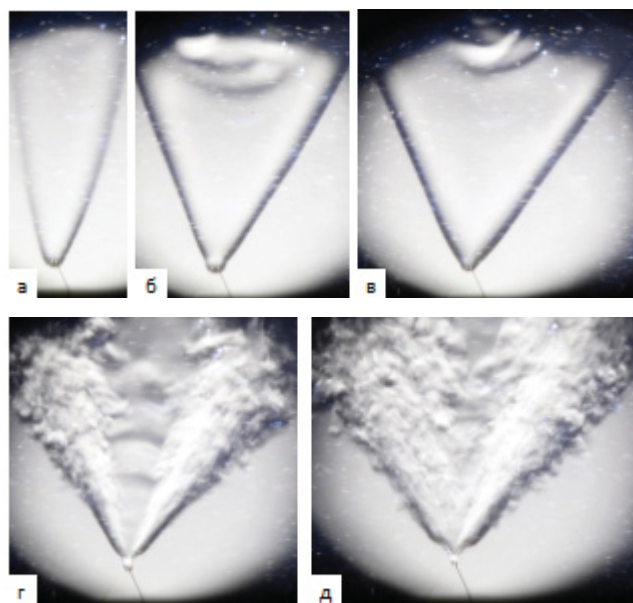


Рис. 23. Взаимодействие двух факелов при различной скорости истечения микроструй:
 а) $U_1 = U_2 = 152$ м/с ($Re_d = 311$); б) $U_1 = U_2 = 381$ м/с ($Re_d = 777$); в) $U_1 = U_2 = 609$ м/с ($Re_d = 1243$);
 г) $U_1 = U_2 = 1218$ м/с ($Re_d = 2486$); д) $U_1 = U_2 = 1675$ м/с ($Re_d = 3419$)

Fig. 23. Interaction of two jet flames at different flow velocities:

а) $U_1 = U_2 = 152$ м/с ($Re_d = 311$); б) $U_1 = U_2 = 381$ м/с ($Re_d = 777$); в) $U_1 = U_2 = 609$ м/с ($Re_d = 1243$);
 г) $U_1 = U_2 = 1218$ м/с ($Re_d = 2486$); д) $U_1 = U_2 = 1675$ м/с ($Re_d = 3419$)

На рис. 24 представлено сравнение взаимодействующих микроструй, полученное с помощью теневой визуализации и визуализации с помощью тепловизора. Картины, полученные с помощью тепловизора, позволяют увидеть топологию сформировавшегося факела на начальном участке, а также нагрев сопла. На полученных снимках отчетливо видно, что результирующий факел охватывает срезы сопел. Смещенные на расстояние двух калибров микроструи приводят к формированию факела с углом раствора 50° , а пересекающиеся микроструи формируют турбулентный факел, угол которого 12° в плоскости наблюдения.

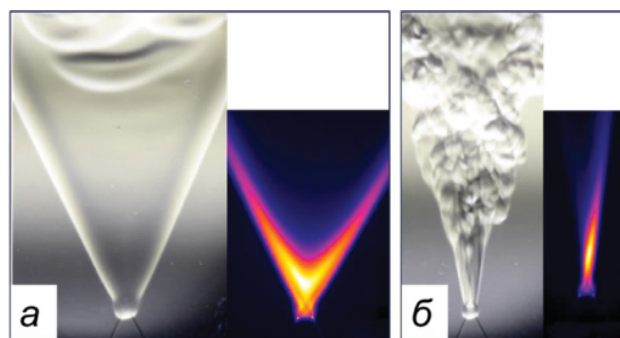


Рис. 24. Теневая картина и визуализация тепловизором: а – пересекающиеся микроструи; б – непересекающиеся микроструи. Во всех случаях скорости истечения микроструй одинаковы $U_1 = U_2 = 457$ м/с ($Re_d = 932$)

Fig. 24. Shadow pattern and thermal imaging: а – intersecting microjets; б – non-intersecting microjets flowing out. In all cases, the outflow velocities of the microjets are the same $U_1 = U_2 = 457$ м/с ($Re_d = 932$)

В результате можно сделать вывод, что смещение осей микроструй способно влиять на процесс ламинарно-турбулентного перехода в результирующем факеле взаимодействующих микроструй водорода.

Режим горения с результирующим факелом, отошедшим от среза сопел, удается реализовать при поджигании микроструй на расстоянии от среза микросопел. Теневые картины процесса взаимодействия факелов, приподнятых над срезом сопла, показаны на рис. 25. На рис. 25, *а* микроструи пересекаются, на рис. 25, *б* микроструи не пересекаются и лежат в плоскостях, смещенных на расстояние двух калибров.

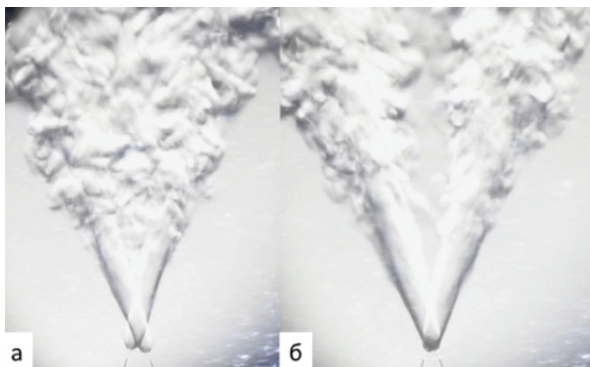


Рис. 25. Взаимодействие факелов, приподнятых над срезом сопла:
а – пересекающиеся микроструи; *б* – непересекающиеся микроструи.
 Во всех случаях скорости истечения микроструй одинаковы $U_1 = U_2 = 914$ м/с ($Re_d = 1865$)
Fig. 25. Interaction of flames raised above the nozzle exit section:
a – intersecting microjets; *b* – non-intersecting microjets. In all cases, the outflow velocities of the microjets are the same $U_1 = U_2 = 914$ m/s ($Re_d = 1865$)

Визуализация с помощью тепловизора на рис. 26 также наглядно демонстрирует, как происходит уширение факела, оторванного от среза сопла в плоскости, перпендикулярной плоскости наблюдателя. Уширение факела в плоскости наблюдателя происходит при смещении осей микроструй друг относительно друга, как показано на рис. 27.

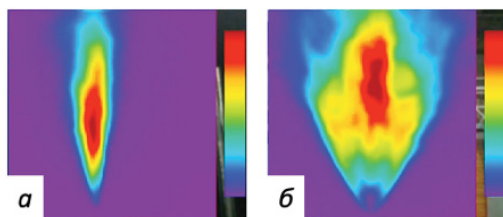


Рис. 26. Диффузионное горение взаимодействующих микроструй с факелом, оторванным от среза сопла, $U_1 = U_2 = 914$ м/с ($Re_d = 1865$):
а – результирующий факел, оси микроструй пересекаются; *б* – уширение факела в плоскости, перпендикулярной первоначальной плоскости наблюдения

Fig. 26. Diffusion combustion of interacting microjets with a resulting jet flame separated from the nozzle exit
 $U_1 = U_2 = 914$ m/s ($Re_d = 1865$):
a – resulting flame with intersecting microjet axes;
b – widening of the flame in a plane perpendicular to the initial observation plane

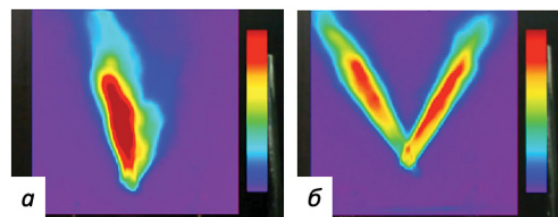


Рис. 27. Диффузионное горение взаимодействующих микроструй, факел, оторванный от среза сопла, $U_1 = U_2 = 914$ м/с ($Re_d = 1865$):
а – оси микроструй пересекаются; *б* – оси микроструй смещены на расстояние $2d$

Fig. 27. Diffusion combustion of interacting microjets, with a flame detached from the nozzle exit,
 $U_1 = U_2 = 914$ m/s ($Re_d = 1865$):
a – the axes of the microjets intersect,
b – the axes of the microjets are shifted by a distance of $2d$

На рис. 28 показано сравнение процесса диффузионного горения двух различных режимов горения с результирующим факелом, присоединенным к срезу сопла и с результирующим факелом, отошедшим от среза сопла. Режим горения с факелом, оторванным от среза сопла, реализуется при воспламенении микроструй на расстоянии от среза микросопел в диапазоне $Re_d = 2000\text{--}2500$, факел при таком режиме изначально турбулентный, в то время как результирующий присоединенный факел при низкой скорости истечения водорода остается ламинарным на начальном участке.

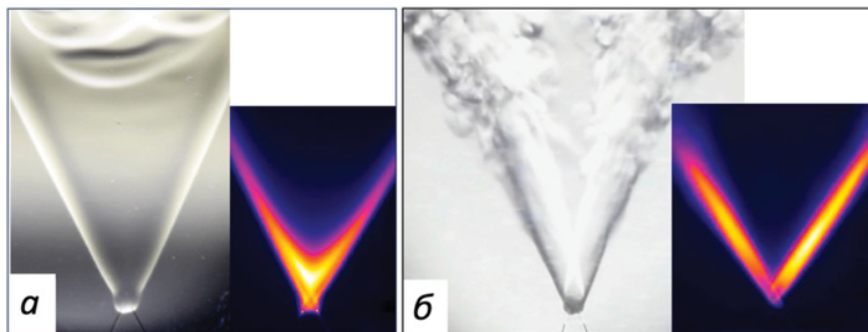


Рис. 28. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструй и картины, полученные с помощью тепловизора:

a – присоединенный факел, $U_1 = U_2 = 457$ ($Re_d = 932$); *б* – факел, оторванный от среза сопла, $U_1 = U_2 = 914$ м/с ($Re_d = 1865$)

Fig. 28. Shadow patterns of the process of diffusion combustion of microjets and patterns obtained using a thermal imager:

a – attached jet flame $U_1 = U_2 = 457$ ($Re_d = 932$); *б* – jet flames detached from the nozzle exit $U_1 = U_2 = 914$ м/с ($Re_d = 1865$)

В результате исследования взаимодействующих микроструй водорода, истекающих из сопел с $d = 200$ мкм, ориентированных друг относительно друга под углом 50° , в процессе диффузионного горения были получены следующие результаты.

1. Длина участка пламени вблизи среза сопла для взаимодействующих микроструй уменьшается с увеличением скорости микроструй, при этом сам ламинарный участок пламени, формируемый при горении взаимодействующих микроструй, в несколько раз меньше по протяженности, чем такой же участок в пламени одиночной микроструи.

2. Взаимное расположение осей микроструи влияет на турбулентность результирующего факела. При пересечении осей микроструй результирующий факел сужается в плоскости наблюдателя и турбулизуется, при этом уширяясь в ортогональной плоскости. Расположение микроструй с небольшим смещением осей относительно друг друга на расстояние $2d$ (где d – диаметр микросопла) позволяет результирующему факелу оставаться ламинарным в диапазоне до $Re_d = 932$.

3. Скорость истечения взаимодействующих микроструй влияет на турбулентность и результирующую структуру факела. При малой скорости истечения микроструи результирующий факел ламинарный до $Re_d = 932$. Начиная с определенной скорости, вблизи среза сопла формируется двузонная структура результирующего пламени $Re_d = 932\text{--}3500$.

4. Режим горения с факелом, оторванным от среза сопла, реализуется при воспламенении микроструй на расстоянии от среза микросопел в диапазоне $Re_d = 2000\text{--}2500$.

Выводы

По итогам рассмотренных работ были получены следующие результаты.

1. Подтверждены сценарии диффузионного горения одиночной микроструи, связанные с образованием двузонной структуры пламени в широком диапазоне скоростей истечения водорода при воспламенении микроструи вблизи среза сопла. Подтверждены сценарии диффузионного горения одиночной микроструи при воспламенении на расстоянии от среза микросопла. Диффузионное горение с факелом, отошедшим от среза микросопла, существует в гораздо более узком диапазоне скоростей истечения водорода. Также все обнаруженные сценарии для микроструи, истекающей из сопла с $d = 200$ мкм, приведены в зависимости от безразмерных чисел Re_d .

2. Все сценарии диффузионного горения микроструи водорода, обнаруженные для одиночной микроструи, сохраняются с незначительными изменениями и при подаче спутного потока воздуха из соосно расположенной кольцевой щели. Область результирующего факела вблизи среза сопла претерпевает определенные изменения: она приобретает цилиндрическую форму при увеличении скорости спутного потока воздуха. Развитие ламинарной зоны факела, а именно ее уменьшение при увеличении скорости истечения микроструи, сохраняется также и при увеличении скорости истечения спутного потока воздуха.

3. Обнаружено, что типичные сценарии горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, связаны с образованием двузонной структуры пламени при малом расходе и при горении с факелом, отошедшим от среза сопла при высоких расходах. Воздух, подаваемый из микросопла, существенно меняет процесс горения струи водорода. Показано, что высокоскоростная струя воздуха с ударно-волновой структурой, истекающая из центрального сопла соплового аппарата, приводит к эффекту «запирания» процесса горения водорода в узкой области вблизи среза сопла. Развитие ламинарной зоны пламени с увеличением скорости истечения или расхода происходит следующим образом: ламинарный участок пламени переходит из конической формы в полусферическую, а затем в сферическую, после чего ее границы размываются, и она исчезает, оставляя турбулентное оторванное от среза сопла пламя.

4. Проведено исследование взаимодействия микроструй водорода. Взаимное расположение микросопел способно влиять на процесс турбулизации результирующего пламени. Смещение осей микроструй в определенном диапазоне скоростей позволяют ламинаризовать результирующий факел на протяженном участке между струями, отодвинуть турбулентную зону дальше от среза сопел. Горение с результирующим факелом, отошедшим от среза сопел, существует в существенно более узком диапазоне скоростей истечения.

Список литературы

1. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2012.
2. Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного сопла // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4. С. 60–76. DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-4-60-76 <https://journals.nsu.ru/siberian-journal-physics/archive/2015/T10V2/3/0493/>
3. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Влияние направление вектора ускорения силы тяжести земли на диффузионное горение микроструи водорода // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. № 45. С. 175–192. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.09 https://vestnik.pstu.ru/aero/archives/?id=&folder_id=5550
4. 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.

5. **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. DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-2-27-41 <https://journals.nsu.ru/siberian-journal-physics/archive/2015/T10V2/3/0493/>
6. **Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г.** Исследование режимов диффузионного горения микроструи водорода // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 3. С. 12–21. DOI: 10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21 <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21>
7. **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 <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-2-21-34>
8. **Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С., Шмаков А. Г.** Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 3. С. 53–63. DOI: 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63 <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63>
9. **Тамбовцев А. С., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г.** // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2022. № 71. С. 191–200. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.21 https://vestnik.pstu.ru/aero/archives/?id=&folder_id=11271

References

1. **Grek G. R., Kozlov V. V. and Litvinenko Yu. A.** “Stability of Subsonic Jets,” The Manual with CD-ROM Presentation, Novosibirsk State University, Novosibirsk, 2012, pp. 1–208.
2. **Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Features of the Diffusion Combustion of Hydrogen Microjet at Various Spatial Orientation of the Nozzle Exit. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 60–76. (in Russ.) DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-4-60-76
3. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Influence of the acceleration vector direction of earth gravity on diffusion combustion of the hydrogen microjet, *Vest. PNIPU, Aerokosm. Tekhn.*, 2016, no. 45, pp. 175–192. (in Russ.) DOI: 10.15593/2224-9982/2016.45.09
4. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study of diffusion combustion of a round hydrogen microjet when it is ignited far from the nozzle exit. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 62–73. (in Russ.)
5. **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, pp. 27–41. (in Russ.) DOI: 10.54362/1818-7919-2015-10-2-27-41
6. **Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G.** Study of the Regimes of Diffusive Combustion of a Hydrogen Microjet. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 12–21. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21
7. **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
8. **Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G.** Air Round Microjet Interaction with Coaxial Hydrogen Jet at Its Combustion for Supersonic Speed Jets Efflux. *Siberian Journal of Physics*, 2019, vol. 14, no. 3, p. 53–63. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-3-53-63

9. **Tambovtsev A. S., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Investigation of scenarios of diffusive combustion of hydrogen microjets during their interaction. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 71, pp. 191–200. (in Russ.) DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.21

Сведения об авторе

Тамбовцев Александр Сергеевич, младший научный сотрудник

Information about the Author

Alexander S. Tambovtsev, Junior Researcher

*Статья поступила в редакцию 04.09.2024; одобрена после рецензирования 04.09.2024;
принята к публикации 02.10.2024*

*The article was submitted 04.09.2024; approved after reviewing 04.09.2024;
accepted for publication 02.10.2024*