

УДК 532.525.5  
DOI: 10.15372/PMTF202315427

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ СТРУЙ ВОДОРОДА

А. С. Тамбовцев, В. В. Козлов, Ю. А. Литвиненко,  
М. В. Литвиненко, А. Г. Шмаков

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
E-mails: alsetams@gmail.com, kozlov@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru,  
litmar@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru

Представлены результаты исследований взаимодействия двух сталкивающихся осесимметричных ламинарных микроструй водорода в процессе диффузионного горения. Истечение газа происходило с одинаковыми скоростями через пары микросопел, представляющих собой цилиндрические тонкостенные стальные трубы с внутренним диаметром 200 мкм. В ходе эксперимента менялось поперечное положение трубок относительно друг друга. Выявлены особенности формирования результирующего факела из двух взаимодействующих микроструй в зависимости от поперечного положения трубок, проведено сравнение с факелами одиночных микроструй при той же скорости истечения.

**Ключевые слова:** диффузионное горение водорода, взаимодействие микроструй, микросопло

**Введение.** Известно, что развитие струйных течений обусловлено возникновением гидродинамической неустойчивости различного типа. В струях, создаваемых каналами с небольшим удлинением, обычно возникает неустойчивость Кельвина — Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с быстрой турбулизацией [1]. В то же время неустойчивость такого типа не реализуется для микроструй, создаваемых каналами с большим удлинением и имеющих ламинарный участок большой протяженности. Сценарии диффузионного горения одиночной микроструи водорода в зависимости от скорости истечения микроструи в затопленное пространство имеют ряд особенностей, которые не наблюдаются при горении углеводородного топлива, например метана и пропана. По характеристикам стабилизации горения водород превосходит углеводородное топливо. Согласно данным, приведенным в работе [2], для водорода минимальная скорость срыва пламени на два порядка больше, чем для метана или пропана. Особенности ламинарно-турбулентного перехода в процессе горения в микроструях по сравнению с процессом горения в макроструях были исследованы в работе [3]. Этапы формирования диффузионного факела при истечении микроструй водорода из сопел с внутренним диаметром в диапазоне 200  $\div$  500 мкм имеют некоторое сходство:

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (код проекта 075-15-2020-806).

- 1) горение с ламинарным факелом при малых скоростях истечения микроструй;
- 2) формирование двухзонной структуры факела, при этом первая зона представляет собой сферическую область ламинарного пламени, которая охватывает срез сопла, далее по течению развивается турбулентное пламя и образуется вторая зона;
- 3) пульсации в турбулентной части факела, вызывающие нестабильное горение или даже срыв этой части факела, при этом в ламинарной части факела сохраняется стабильный режим горения;
- 4) срыв факела при больших расходах или скоростях истечения микроструи, при этом область пламени сферической формы охватывает срез сопла в широком диапазоне скоростей, являясь стабилизатором процесса горения в целом, а также обуславливает возникновение эффекта “запирания” сопла, что не позволяет течению водорода из сопла выходить на сверхзвуковой режим.

Также следует отметить, что при поджиге струи выше по течению формирование факела происходит по другому сценарию. В этом случае существует узкий диапазон скоростей, в котором может поддерживаться горение с поднятым факелом. При этом среднерасходная скорость истечения микроструи водорода из сопла может достигать сверхзвуковых значений, дополнительно о выходе на сверхзвуковой режим истечения свидетельствуют визуализируемые теневым методом скачки уплотнений [4]. В работе [5] представлены результаты исследования сверхзвукового струйного истечения газа с образованием скачков уплотнения в слое сдвига, обусловленным пульсациями давления, которые вызывают турбулизацию струи ниже по течению.

Выявленные особенности микроструй проявляются также при столкновении струй. Использование сталкивающихся струй позволяет регулировать параметры результирующего потока [6–8], что в свою очередь влияет на форму и структуру факела. Особенностью исследований, проводимых в данной работе, является то, что оси симметрии сталкивающихся струй расположены под острым углом друг к другу, а поперечное положение сопел изменяется от положения, в котором струи полностью перекрываются, при этом оси симметрии находятся в одной плоскости, до положения, в котором струи полностью расходятся, при этом оси сопел ориентированы в поперечном направлении.

В экспериментах, описываемых в данной работе, определялась и изучалась структура газовой струи, образующейся при столкновении двух струй водорода в процессе диффузационного горения.

**1. Экспериментальная установка.** Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Сжатый водород подается из баллона на клапан расходомера, который управляется контроллером двухканального модуля MKS PR4000B. (Расход газа контролировался с погрешностью  $\pm 0,7\%$ .) Далее канал с водородом раздваивается и водород поступает к соплам. В экспериментах использовалась пара сопел, представляющих собой цилиндрические тонкостенные трубы длиной 50 мм с внутренним диаметром  $d = 0,2$  мм. Сопла располагались между осями симметрии трубок под углом  $50^\circ$ , а перекрытие факелов двух микроструй регулировалось в поперечном направлении. Скорость истечения микроструи определялась по формуле  $U_0 = Q/S$ , где  $Q$  — объемный расход газа;  $S$  — площадь поперечного сечения сопла. Скорость истечения из пары микросопел была установлена равной  $U_0 = U_1 = U_2$ . Визуализация процесса горения проводилась теневым методом с использованием прибора IAB-451, полученные теневые картины фиксировались цифровой камерой Nikon D7500 с объективом AF-S NIKKOR 18-105 mm. С использованием инфракрасного тепловизора СЕМ DT-9897Н проводилось исследование топологии пламени. Зажигание микроструи осуществлялось как вблизи среза микросопла, так и на некотором расстоянии от него, что позволяло реализовать режим горения с пламенем, оторванным от среза сопла.

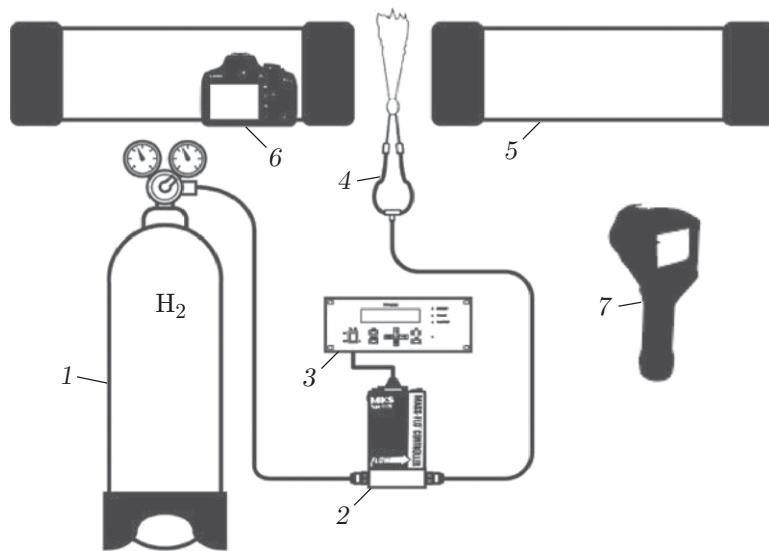


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — баллон со сжатым водородом, 2 — клапан расходомера MKS 1179B, 3 — двухканальный регулятор расходомера MKS PR4000B, 4 — пара сопел с внутренними диаметрами  $d_1 = d_2 = 200$  мкм, 5 — теневой прибор IAB-451, 6 — цифровой фотоаппарат Nikon D7500 с объективом AF-S NIKKOR 18-105 mm, 7 — тепловизор CEM DT-9897H

**2. Результаты исследования.** Ниже представлены результаты исследования диффузионного горения одиночной микроструи и взаимодействующих микроструй.

**2.1. Диффузионное горение одиночной микроструи.** До начала исследования взаимодействующих микроструй были проведены эксперименты с одиночной водородной микроструей. На рис. 2 показаны теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из тонкостенного цилиндрического микросопла с внутренним диаметром  $d = 200$  мкм, при различных значениях скорости истечения микроструи.

При скоростях истечения менее 305 м/с реализуется ламинарный режим горения с характерным факелом. С увеличением скорости истечения постепенно формируется двухзонная структура пламени с ламинарным режимом горения вблизи среза сопла и турбулентным режимом ниже по потоку. Двухзонная структура пламени существует в широком диапазоне скоростей микроструи  $U_0 = 1066 \div 2040$  м/с (в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанных по диаметру сопла,  $Re = 2180 \div 4351$ ) (см. рис. 2, в–ж). На рис. 2, е, ж видно, что при скорости истечения микроструи  $U_0 = 2040$  м/с горение в турбулентной зоне пламени становится неустойчивым и может произойти срыв пламени. При скорости истечения  $U_0 = 2132$  м/с горение поддерживается только в области пламени сферической формы, далее вверх по течению происходит выброс невоспламенившегося водорода.

На рис. 3 представлены результаты теневой визуализации для случая, когда воспламенение микроструи осуществлялось на некотором расстоянии от среза микросопла. Высота, на которой происходит отрыв пламени, увеличивалась линейно с увеличением скорости истечения струи, при этом горение поддерживалось в более узком диапазоне скоростей  $U_0 = 944 \div 1188$  м/с, что соответствует значениям числа Рейнольдса, рассчитанного по диаметру сопла,  $Re = 1926 \div 2424$ .

Следует отметить, что высокая среднерасходная скорость истечения струи водорода, которая в несколько раз превышает скорость звука в окружающем воздушном пространстве, может приводить к формированию скачков на периферии струи, однако в данном эксперименте такое явление не наблюдалось.

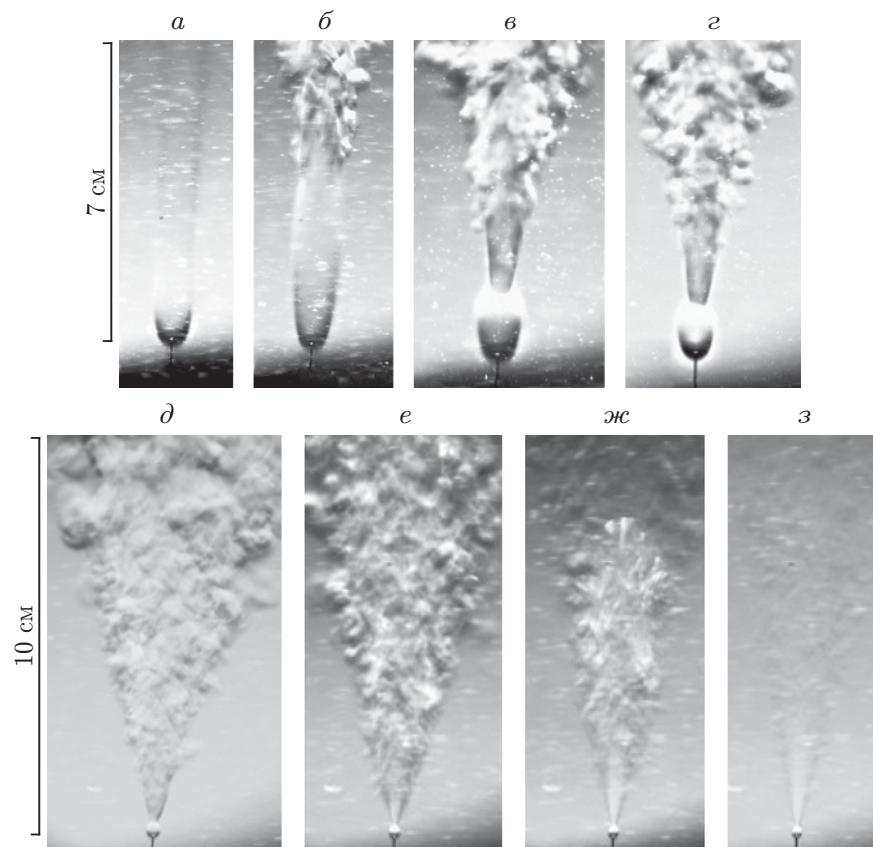


Рис. 2. Результаты теневой визуализации режимов диффузионного горения водородной микроструи при различных значениях скорости ее истечения:  
 $a — U_0 = 305 \text{ м/с}$ ,  $\delta — U_0 = 913 \text{ м/с}$ ,  $\psi — U_0 = 1066 \text{ м/с}$ ,  $г — U_0 = 1188 \text{ м/с}$ ,  $\partial — U_0 = 2010 \text{ м/с}$ ,  $е — U_0 = 2040 \text{ м/с}$ ,  $\text{жс} — U_0 = 2040 \text{ м/с}$ ,  $з — U_0 = 2132 \text{ м/с}$

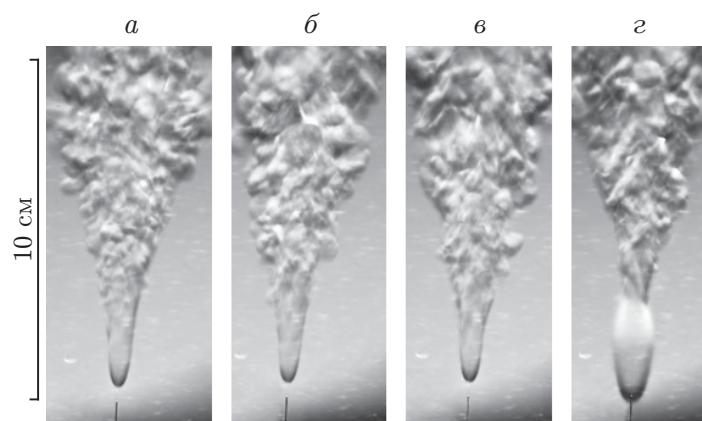


Рис. 3. Результаты теневой визуализации режимов диффузионного горения микроструи водорода с поднятым факелом при различных значениях скорости ее истечения:  
 $a — U_0 = 1188 \text{ м/с}$ ,  $\delta — U_0 = 1096 \text{ м/с}$ ,  $\psi — U_0 = 1035 \text{ м/с}$ ,  $г — U_0 = 944 \text{ м/с}$

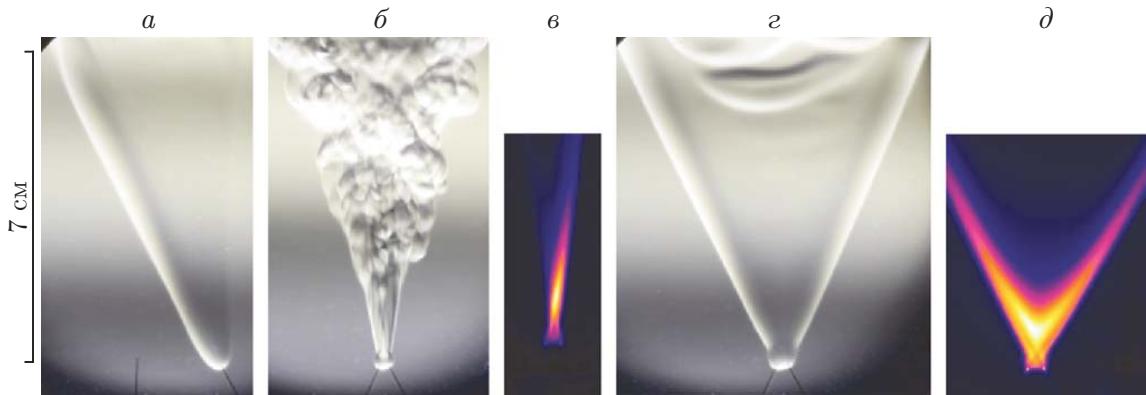


Рис. 4. Результаты теневой визуализации (*a*, *b*, *г*) и визуализации с помощью тепловизора (*б*, *д*) процесса диффузионного горения водорода при скорости истечения микроструи  $U_0 = 457$  м/с ( $Re = 932$ ):

*а* — одиночная микроструя, *б*–*д* — две взаимодействующие микроструи (*б*, *в* — в случае пересечения осей микроструй, *г*, *д* — в случае смещения осей микроструй в поперечном направлении)

**2.2. Взаимодействие микроструй в процессе диффузионного горения.** На рис. 4 показаны теневые картины одиночных и взаимодействующих микроструй водорода в процессе диффузионного горения. Для взаимодействующих микроструй приведены также результаты визуализации структуры пламени с помощью тепловизора. Следует отметить, что визуализация структуры пламени с помощью тепловизора имеет качественный характер и позволяет оценить температуру нагрева среза сопла, охваченного факелом. Более подробно сопоставление значений температуры в различных областях пламени, полученных с помощью тепловизора и измеренных с помощью термопары, было проведено в работе [9] при измерении температуры пламени метана.

На рис. 4,*а* показан ламинарный факел, реализующийся при  $U_0 = 457$  м/с. Микроструя истекает под некоторым углом к горизонту, при этом под действием сил конвекции возникает несимметричный факел. На рис. 4,*б*,*в* представлен результат взаимодействия двух микроструй; оси сопел, из которых они вытекают, пересекаются, что в свою очередь приводит к турбулизации результирующей струи. Угол раскрытия результирующего факела уменьшается в плоскости наблюдения. На рис. 4,*г*,*д* микроструи водорода взаимодействуют, образуя результирующую ламинарную симметричную струю, оси микросопел смещены в поперечном направлении и не пересекаются.

На рис. 5 представлены теневые картины процесса диффузионного горения одиночных и взаимодействующих микроструй при одинаковых скоростях истечения. Результирующий факел, создаваемый взаимодействующими микроструями, как и факел, создаваемый одиночной микроструей, имеет двухзонную структуру с ламинарным участком пламени, перекрывающим срез сопла. С увеличением скорости микроструи длина ламинарного участка пламени уменьшается. При горении взаимодействующих микроструй она в несколько раз меньше длины ламинарного участка в пламени одиночной микроструи. Турбулизация результирующего пламени, созданного двумя взаимодействующими микроструями, начинается на краях и постепенно распространяется к центру.

На рис. 6 показаны результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения взаимодействующих микроструй в случае, когда факел находится на некотором расстоянии от среза сопла. Как и в случае одиночной микроструи, для взаимодействующих микроструй можно реализовать режим горения с отделенным от среза сопла факелом,

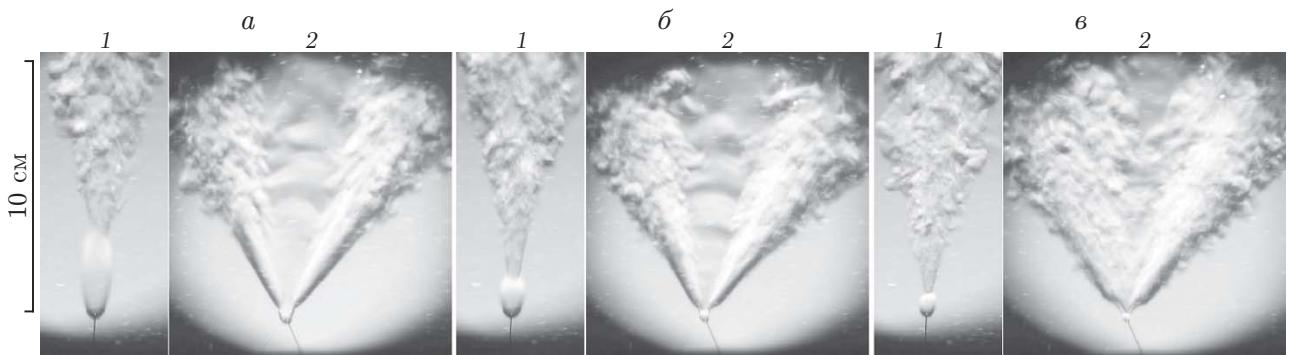


Рис. 5. Результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения одиночной (1) и взаимодействующих (2) микроструй водорода при различных значениях скорости истечения:

*a* —  $U_0 = 913 \text{ м/с}$  ( $\text{Re} = 1865$ ), *б* —  $U_0 = 1188 \text{ м/с}$  ( $\text{Re} = 2424$ ), *в* —  $U_0 = 1706 \text{ м/с}$  ( $\text{Re} = 3419$ )

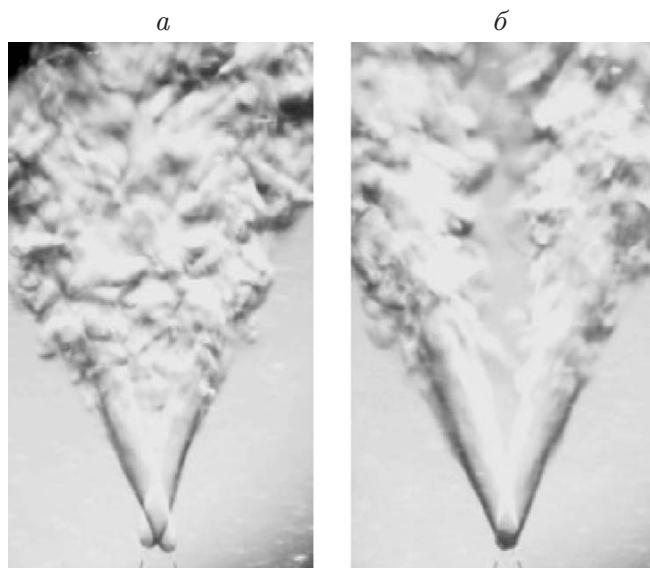


Рис. 6. Результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения с поднятым факелом двух взаимодействующих микроструй водорода при  $U_0 = 914 \text{ м/с}$  ( $\text{Re} = 1865$ ):

*a* — в случае пересечения осей микроструй, *б* — в случае смещения осей микроструй в поперечном направлении на расстояние, равное диаметру микросопла  $d$

в случае когда микроструя зажигается на некотором расстоянии от среза микросопла. В этом режиме факел не охватывает верхнюю часть сопла, что отчетливо видно при визуализации процесса горения с помощью тепловизора. На рис. 7 показано влияние взаимного расположения осей микросопел на форму результирующего факела.

На рис. 8 показано влияние взаимного расположения осей микросопел на форму результирующего факела в случае низкоскоростных струй, когда факел остается присоединенным.

На рис. 7, *а*, 8, *а* видно, что оси микроструй пересекаются, происходит полное перекрытие потоков, угол раскрытия результирующего факела уменьшается в плоскости наблюдения и увеличивается в ортогональной плоскости.

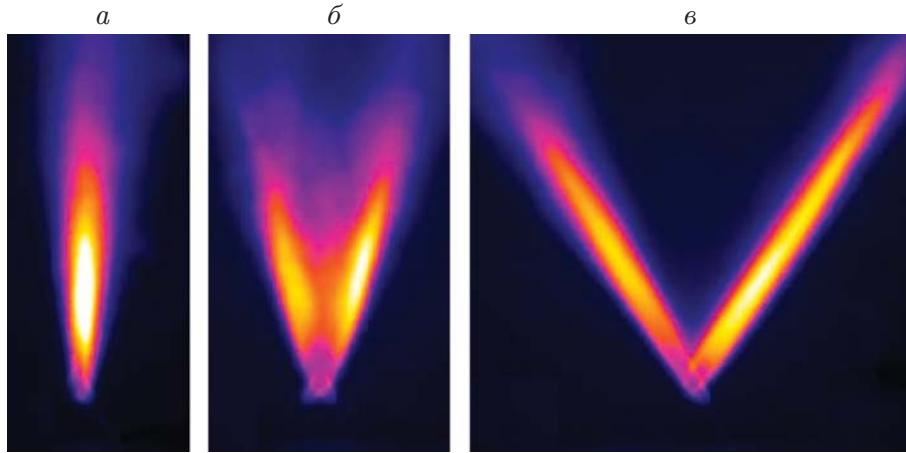


Рис. 7. Результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения с поднятым факелом двух взаимодействующих микроструй водорода при  $U_0 = 914$  м/с ( $Re = 1865$ ):

*a* — в случае пересечения осей микроструй, *б*, *в* — в случае смещения осей микроструй в поперечном направлении (*б* — на расстояние, равное  $d$ , *в* — на расстояние, равное  $2d$ )

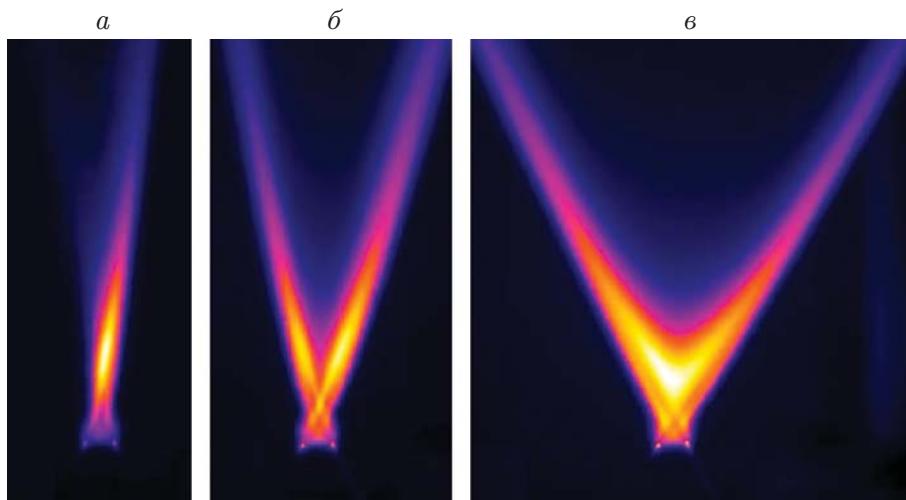


Рис. 8. Результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения взаимодействующих микроструй водорода (присоединенный факел) при  $U_0 = 457$  м/с ( $Re = 932$ ):

*a* — в случае пересечения осей микроструй, *б*, *в* — в случае смещения осей микроструй в поперечном направлении (*б* — на расстояние, равное  $d$ , *в* — на расстояние, равное  $2d$ )

Из рис. 7,*b,v*, 8,*b,v* следует, что расстояние между осями микросопел увеличивается, в результате чего меняется форма факела, который расширяется в плоскости наблюдения. В режиме горения взаимодействующих микроструй с поднятым факелом результирующий факел является турбулентным, в режиме горения взаимодействующих микроструй с изначально ламинарными присоединенными факелами результирующий факел турбулизуется при полном перекрытии осей микроструй, незначительное смещение одной оси относительно другой на расстояние, равное  $2d$  ( $d$  — диаметр микросопла), позволяет его ламинаризовать.

**Заключение.** Результаты проведенного исследования микроструй водорода в процессе диффузионного горения позволяют сделать следующие выводы.

Сценарии диффузионного горения одиночной микроструи водорода совпадают с выявленными ранее в работе [3]. Эти сценарии описывают двухзонную структуру пламени в широком диапазоне скоростей при горении микроструи с присоединенным факелом и линейное увеличение высоты поднятия факела при увеличении скорости истечения в случае отделенного факела.

Длина ламинарного участка пламени в случае взаимодействия двух микроструй уменьшается с увеличением скорости микроструи, при этом его длина в несколько раз меньше длины такого же участка пламени в случае одиночной микроструи.

Взаимное расположение осей микроструи влияет на степень турбулентности результирующего факела в случае, когда изначально микроструи формируют присоединенные факелы. В случае, когда оси микроструй пересекаются, результирующий факел сужается в плоскости наблюдения, расширяясь в ортогональной плоскости. Расположение микроструй с небольшим смещением осей относительно друг друга на расстояние, равное  $2d$ , позволяет сохранять ламинарный режим горения результирующего факела.

Скорость истечения двух взаимодействующих микроструй влияет на степень турбулентности и структуру результирующего факела. При малой скорости истечения микроструи течение является ламинарным, при определенном значении скорости вблизи среза сопла формируется ламинарная зона факела, которая выше по потоку становится турбулентной.

В некотором диапазоне скоростей истечения микроструй, соответствующих числу Рейнольдса  $Re \approx 1800$ , поддерживается стабильное турбулентное горение начиная с области пересечения струй. Ниже этой области горение отсутствует, сопла не контактируют с факелом.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гrek Г. Р. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. пособие / Г. Р. Грек, В. В. Козлов, Ю. А. Литвиненко. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2013.
- Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразного топлива // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 53–63.
- Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В. и др. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.
- Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., et al. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // Intern. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44, iss. 1. P. 457–468.
- Aniskin V. M., Mironov S. G., Maslov A. A., et al. Supersonic axisymmetric microjets: structure and laminar-turbulent transition // Microfluid Nanofluid. 2015. V. 19. P. 621–634.

6. **Кулумбаев Э. Б., Никуличева Т. Б.** Взаимодействие плазменных струй в двухструйной электрической дуге // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 4. С. 483–490.
7. **Laurendeau E., Jordan P., Bonnet J. P., et al.** Subsonic jet noise reduction by fluidic control: The interaction region and the global effect // Phys. Fluids. 2008. V. 20. 101519.
8. **Жилкин Б. П., Зайков Н. С., Кисельников А. Ю., Худяков П. Ю.** Особенности изменения термической структуры газовых импактных струй // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 2. С. 104–111.
9. **Козлов В. В., Литвиненко Ю. А., Катасонов М. М. и др.** Особенности формирования факела при столкновении двух ламинарных газовых струй // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2023. № 4. С. 131–136.

*Поступила в редакцию 9/X 2023 г.,  
после доработки — 9/X 2023 г.  
Принята к публикации 27/XI 2023 г.*

---