

**Г. Р. Грек¹, В. В. Козлов^{1,3}, О. П. Коробейничев²
Ю. А. Литвиненко^{1,3}, А. Г. Шмаков²**

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*grek@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru, korobein@kinetics.nsc.ru
litur@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru*

ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВЫХОДНОГО СОПЛА *

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от пространственной ориентации выходного сопла. Обнаружено, что при диффузионном горении водорода в круглой микроструе в условиях направленности вектора скорости истечения струи обратно и перпендикулярно вектору земной гравитации (g) основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи практически совпадают. К этим характеристикам относятся диапазоны наличия области «перетяжки» пламени, отрыва пламени при наличии области «перетяжки» пламени, наличия области «перетяжки» пламени, но отсутствия горения турбулентной струи и момент прекращения горения микроструи. Напротив, в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающего с направлением вектора земной гравитации (g), основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи резко отличаются от двух предыдущих случаев. Сокращается диапазон существования области «перетяжки» пламени, отрыв пламени происходит в отсутствие области «перетяжки» пламени и момент прекращения горения микроструи наступает при значительно большей скорости ее истечения.

Ключевые слова: круглая микроструя водорода, диффузионное горение, область «перетяжки» пламени, теневой метод исследования, теневые картины горения.

Введение

В работе [1] исследовано воздействие поперечного акустического поля на поведение круглой и плоской микроструи водорода. Обнаружено явление раздвоения пламени как круглой, так и плоской микроструи

водорода. Данное явление совпадало с поведением пламени при горении круглой и плоской микроструи пропана в поперечном акустическом поле [2]. С другой стороны, было обнаружено некое новое явление в поведении пламени (мы условно назвали его «перетяжкой» на участке выхода струи из

* Работа поддержана грантами РФФИ (№ 11-01-00292, 12-08-31083, 12-07-00548, 13-07-00616, 14-08-31166), грантом Президента РФ (НШ 2924-2014.1) и Интеграционным грантом СО РАН № 24.

Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации отверстия выходного сопла // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика.* 2015. Т. 10, вып. 4. С. 60–76.

сопла). Характеристики «перетяжки» сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука. Например, геометрические параметры «перетяжки» изменялись с повышением скорости истечения микроструи, одновременно при этом резко возрастала интенсивность звука, генерируемого горячей струей водорода. В работе [3] особое внимание уделено исследованию характеристик развития «перетяжки» пламени и его роли в процессе диффузионного горения круглой микроструи водорода. Показано, что область «перетяжки» пламени представляет собой замкнутую сферическую область горения смеси водорода с воздухом в ближнем поле горячей струи (вблизи выходного сопла). Область «перетяжки» пламени окружена мощным градиентом плотности. Обнаружено, что ламинарная струя водорода в этой области преодолевает градиент плотности газа, становится турбулентной и далее вниз по потоку можно наблюдать как процесс турбулентного смешения водорода с окружающим воздухом, так и наличие турбулентного пламени. Установлено, что пространственный размер «перетяжки» пламени уменьшается с ростом скорости истечения струи. Экспериментальные исследования процесса диффузионного горения водорода, истекающего из скошенного круглого [4] и плоского [5] микросопел подтвердили результаты исследований, полученные в работе [3]. В работах [3–5] также установлено, что верхний предел существования области «перетяжки» пламени при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от диаметра выходного сопла равен 3 000 мкм, а при горении плоской микроструи водорода в зависимости от удлинения сопла $l/h = 30$. В экспериментальной работе [6] исследовано воздействие плавучести (сила, направленная вертикально вверх, против действия силы тяжести – \bar{g}) на «переходное» (переход ламинарного пламени в турбулентное состояние) диффузионное пламя. Область «перетяжки» пламени (в работе [6] она названа областью перехода), как и в наших исследованиях, представляет собой область чисто ламинарного течения и пламени, заканчивающуюся ее сужением в точке перехода, за которой течение в струе и пламени становится турбулентным. Если в исследованиях [3–5] резкий скачок от ламинарного к турбулентному

течению и пламени объясняется преодолением ими узкого ударного слоя градиента плотности газа, то авторы работы [6] данного факта не объясняют. Результаты исследований [6] показали существенное влияние плавучести в ближнем поле структуры пламени и его переходе от ламинарного к турбулентному горению. Для данного числа Рейнольдса ламинарная область пламени была шире и протяженность области перехода (область «перетяжки» пламени в наших исследованиях) была больше для больших чисел Фруда. Наименьшая протяженность области перехода в «плавучем» пламени (пламя, в котором наблюдается большой эффект «плавучести») была отличительным свойством (1) более раннего разрушения ламинарной топливной струи и (2) наименьшим расстоянием между поверхностью пламени и топливной струей, хотя индивидуальные вклады этих двух факторов не были разделены [6]. Эффекты «плавучести» были более явны при более низких числах Рейнольдса. Это навело авторов работы на мысль о том, что переходное пламя в условиях земной гравитации может стать ламинарным в условиях микрогравитации.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного отверстия круглого микросопла. Другими словами, при различной ориентации вектора скорости истечения круглой микроструи водорода относительно направления вектора ускорения силы тяжести земли – \bar{g} . Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития так называемой области «перетяжки» пламени и ее роли в процессе диффузионного горения микроструи водорода в настоящих условиях.

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи обратно вектору ускорения свободного падения (\bar{g})

Фотография экспериментальной установки и ее схема представлены на рис. 1. Выходной диаметр круглого микросопла составлял $d = 500$ мкм, профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла имел параболический характер из-за отно-

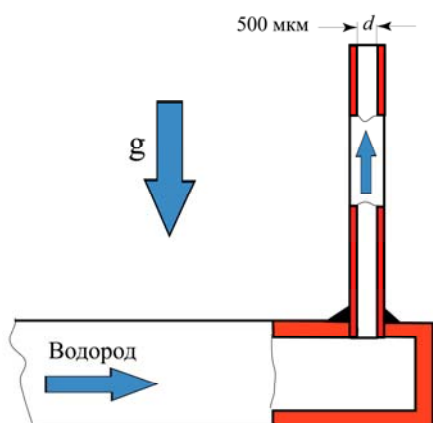


Рис. 1. Схема эксперимента

шения длины канала сопла (l) к диаметру отверстия выходного сопла (d) $l/d = 140$ [7]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследовалось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру. Фиксировались как непосредственно процесс горения, так и картины процесса горения, получаемые с помощью оптического теневого прибора (прибора Тёплера). Поток водорода задавался с помощью прецизионного расходомера

MKS – Instruments (США) с точностью $\pm 0,7\%$. Как видно из рис. 1, направление вектора скорости истечения водородной микроструи противоположно направлению вектора ускорения силы тяжести земли – \vec{g} .

На рис. 2 представлены картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа. Можно наблюдать образование области «перетяжки» пламени в ближнем поле при диффузионном горении микроструи водорода и уменьшение ее пространственного размера с ростом скорости истечения струи. Еще более наглядно это представлено на рис. 3, где для контраста показаны картины «перетяжки» пламени в ситуации минимальной и максимальной скоростей истечения горячей микроструи водорода.

На теневых картинах (рис. 4) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от скорости истечения струи. Отчетливо видно, что в области «перетяжки» пламени струя водорода и пламя, ее окружающее, чисто ламинарные, затем можно наблюдать узкую область градиента плотности, проходящую как струя, так и пламя становятся турбулентными.

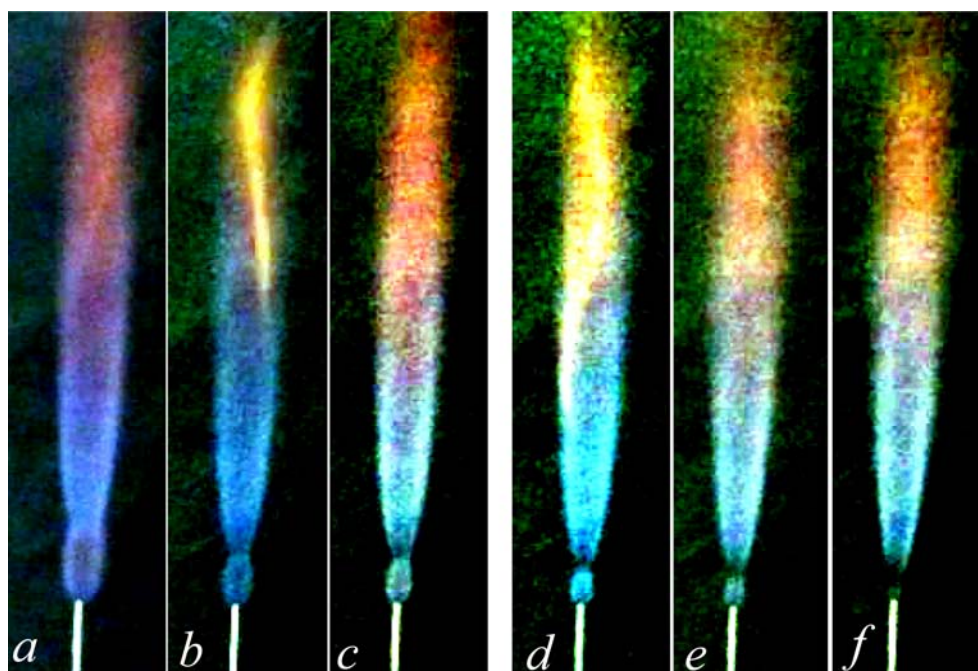


Рис. 2. Картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа (м/с): $a - 362$; $b - 510$; $c - 561$; $d - 612$; $e - 663$; $f - 765$, образование области «перетяжки» пламени

При скорости струи $u = 800$ м/с и более пламя в турбулентной области струи скачкообразно отделяется от области «перетяжки», оставляя часть турбулентной области струи, в промежутке между турбулентным пламенем и областью «перетяжки» пламени, без горения. При этом в области «перетяжки» процесс ламинарного смешения струи с окружающим воздухом, а также горение смеси продолжается (рис. 4, *j, k*).

При скорости истечения микроструи $u = 887$ м/с и выше (рис. 5, *a-c, e*) можно наблюдать процесс горения в области «перетяжки» пламени и отсутствие горения в турбулентной области микроструи водорода. Горение в области «перетяжки» пламени прекращается при скорости более $u = 1020$ м/с (рис. 5, *d*), при этом можно наблюдать процесс развития микроструи водорода в отсутствие горения.

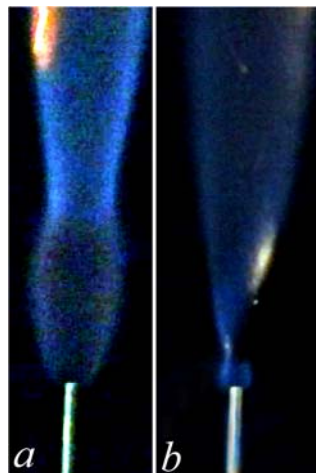


Рис. 3. Картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа (м/с): *a* – 357; *b* – 918, изменение формы и размера области «перетяжки» пламени

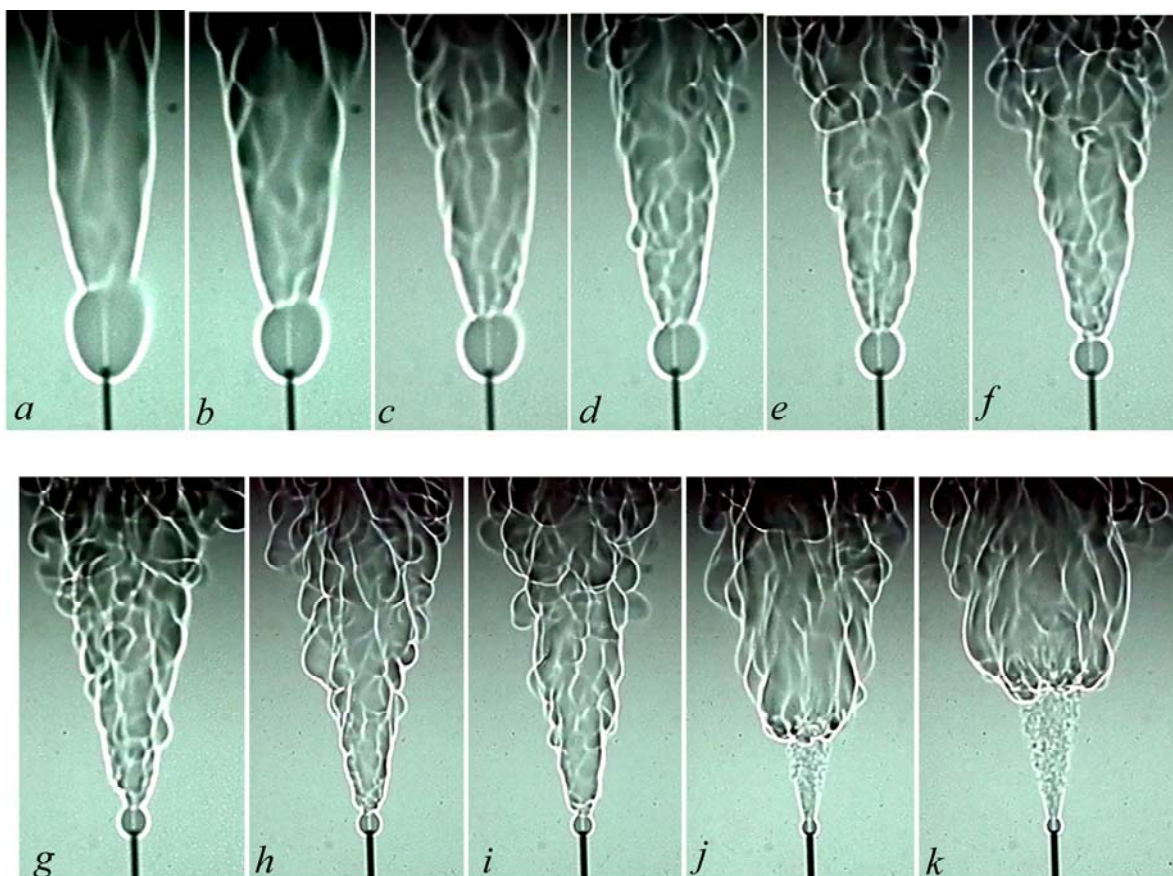


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 663; *h* – 714; *i* – 765; *j* – 816; *k* – 867; образование области «перетяжки» пламени (*a-k*), «перетяжка», область турбулентной струи без горения и область пламени при горении турбулентной струи вниз по потоку (*g-k*)

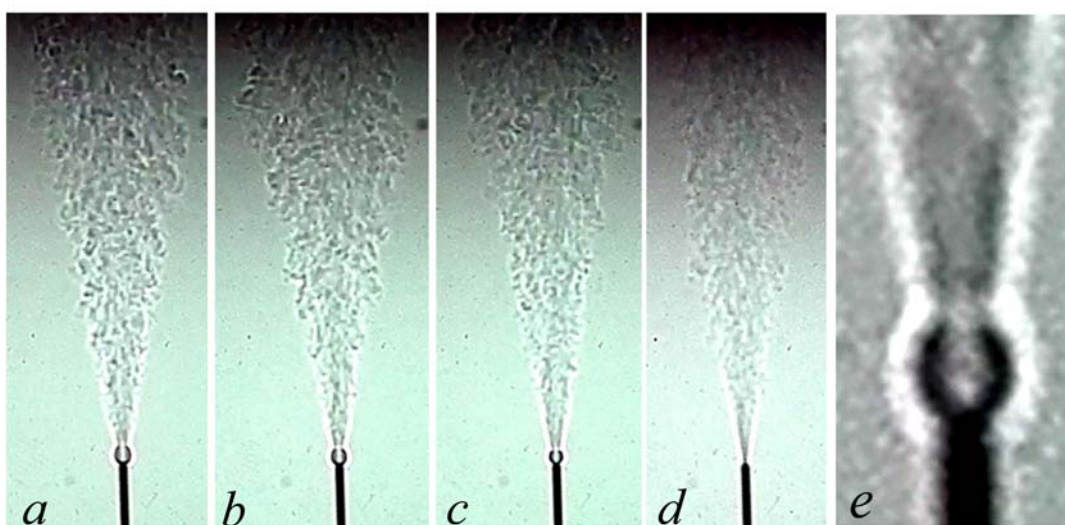


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 887; *b* – 918; *c* – 969; *d* – 1 020; *e* – 1 000; наличие горения в области «перетяжки», но его отсутствие в турбулентной струе (*a–c*), отсутствие области «перетяжки» и горения струи (*d*), область «перетяжки» в увеличенном масштабе (*e*)

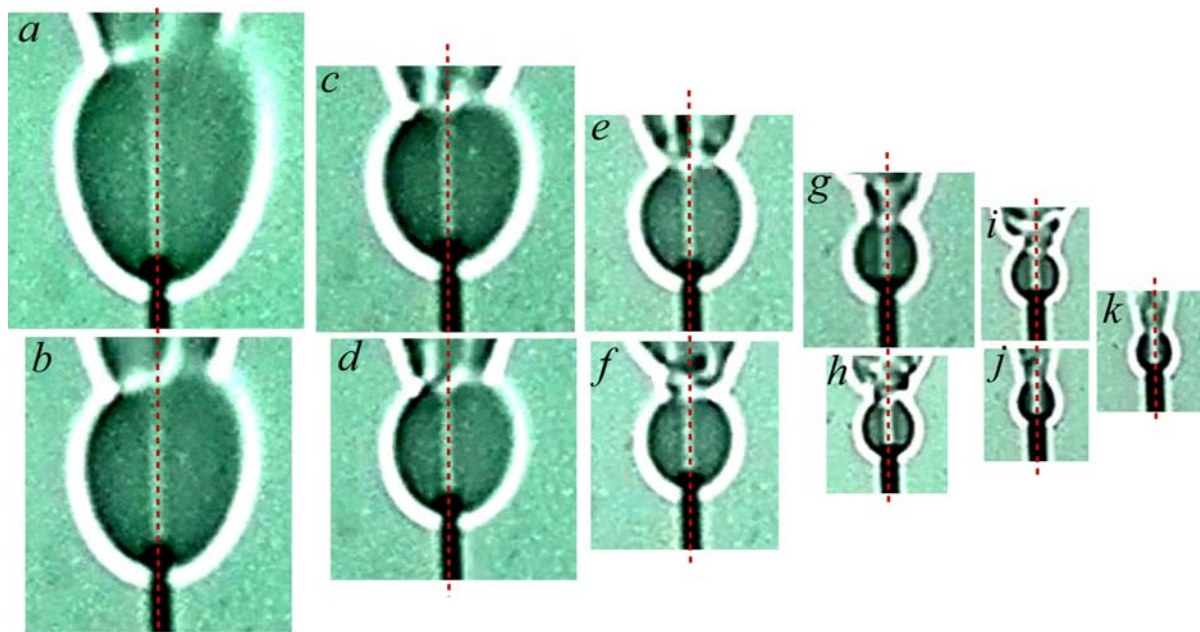


Рис. 6. Теневые картины развития области «перетяжки» пламени (картины взяты из рис. 4, но в большем масштабе) при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 663; *h* – 714; *i* – 765; *j* – 816; *k* – 867

На рис. 6 показаны теневые картины процесса развития области «перетяжки» пламени в зависимости от скорости истечения микроструи, взятые из рис. 4, и для более детального рассмотрения они представлены в крупном масштабе.

Видно, что область «перетяжки» пламени представляет собой замкнутую сферическую область диффузионного горения смеси ламинарной струи с окружающим воздухом в ближнем поле микроструи. Отчетливо видна узкая область градиента плотности

газа на верхней границе области «перетяжки» пламени. Проходя через зону градиента плотности, ламинарная микроструя становится турбулентной, и далее, вниз по потоку, пламя микроструи водорода приобретает турбулентный характер горения (рис. 4). Следует также отметить, что поверхность горения в сферической области охватывает выходное сопло ниже его среза, примерно, на величину $3d$, где d – диаметр отверстия выходного сопла. С ростом скорости истечения микроструи форма области «перетяжки» пламени изменяется от эллипсоидной к сферической, а ее пространственный размер уменьшается (см. рис. 6).

Преимущество использования теневой методики изучения горения микроструи над обычным ее фотографированием показано на рис. 7. Если теневой метод позволяет обнаружить ряд характерных особенностей диффузионного горения микроструи водорода (ламинарная струя и пламя в области «перетяжки» пламени, узкая область градиента плотности газа, турбулентная струя и турбулентное пламя) (рис. 7, *b*), то обычная фотография горения микроструи водорода демонстрирует лишь наличие области «перетяжки» пламени и пламени далее вниз по потоку (рис. 7, *a*).

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при совпадении направления вектора скорости истечения струи и вектора ускорения свободного падения (g)

Фотография экспериментальной установки и ее схема представлены на рис. 8. Выходной диаметр круглого микросопла ($d = 500$ мкм), профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла параболический из-за отношения длины канала сопла (l) к диаметру отверстия выходного сопла (d) $l/d = 140$ [7]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследовалось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру. Фиксировались процесс горения и картины процесса горения, получаемые с помощью оптического теневого прибора (прибора Тёплера). Поток водорода задавался с помощью прецизионного расходомера MKS – Instruments (США) с точностью измерений $\pm 0,7\%$. Как видно из рис. 8, направление

вектора скорости истечения водородной микроструи совпадает с направлением вектора ускорения силы тяжести земли – \vec{g} .

На рис. 9 представлены картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа. Можно наблюдать образование области «перетяжки» пламени в ближнем поле при диффузионном горении микроструи водорода и уменьшение ее пространственного размера с ростом скорости истечения струи.

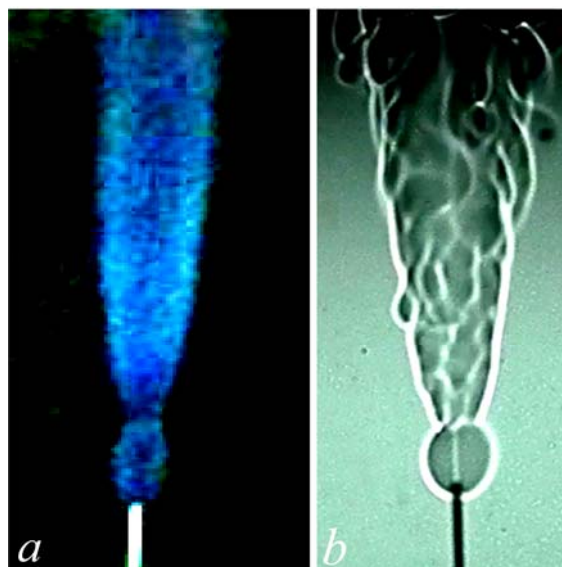


Рис. 7. Фотография (*a*) и теневая картина (*b*) горения микроструи водорода при скорости истечения струи 510 м/с

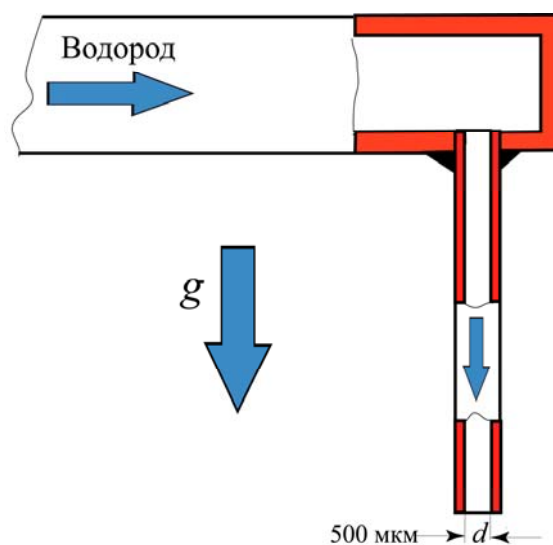


Рис. 8. Схема эксперимента

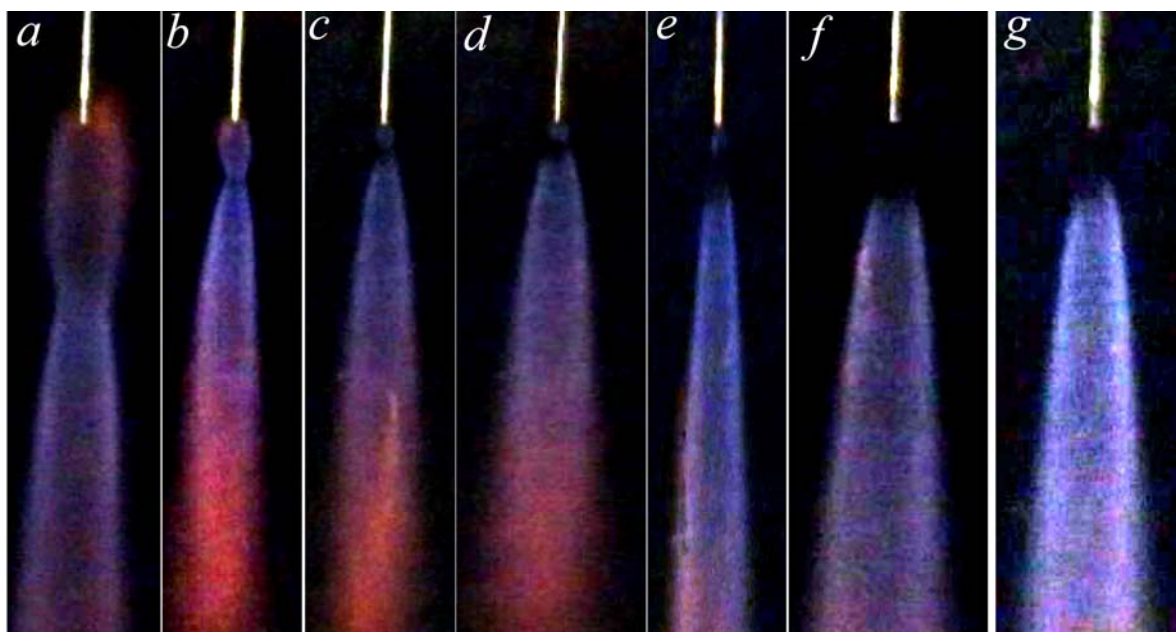


Рис. 9. Картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа (м/с): *a* – 357; *b* – 459; *c* – 561; *d* – 714; *e* – 765; *f* – 969; *g* – 1 020; образование области «перетяжки» пламени

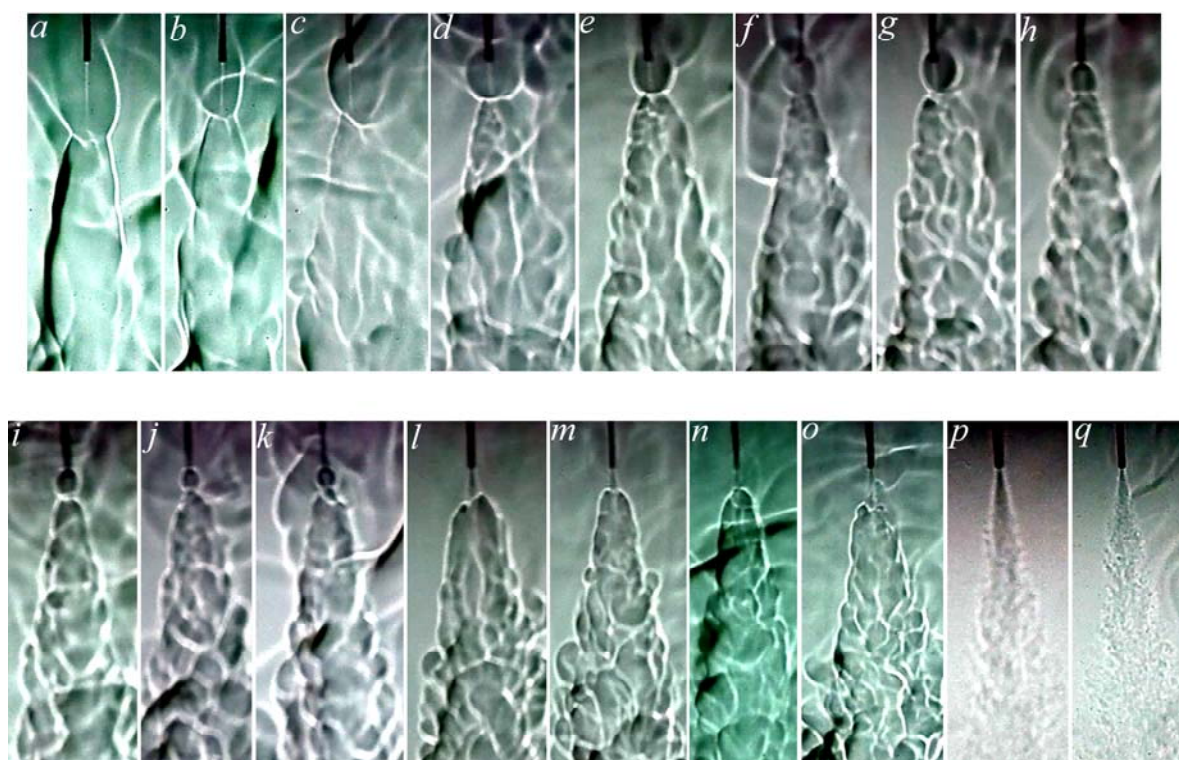


Рис. 10. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 663; *h* – 714; *i* – 765; *j* – 816; *k* – 867; *l* – 918; *m* – 1 020; *n* – 1 071; *o* – 1 097; *p* – 1 107; *q* – 1 122; образование «перетяжки» пламени (*a*–*k*), отрыв пламени без его «перетяжки» (*l*–*o*), микроструя без горения (*p*–*q*)

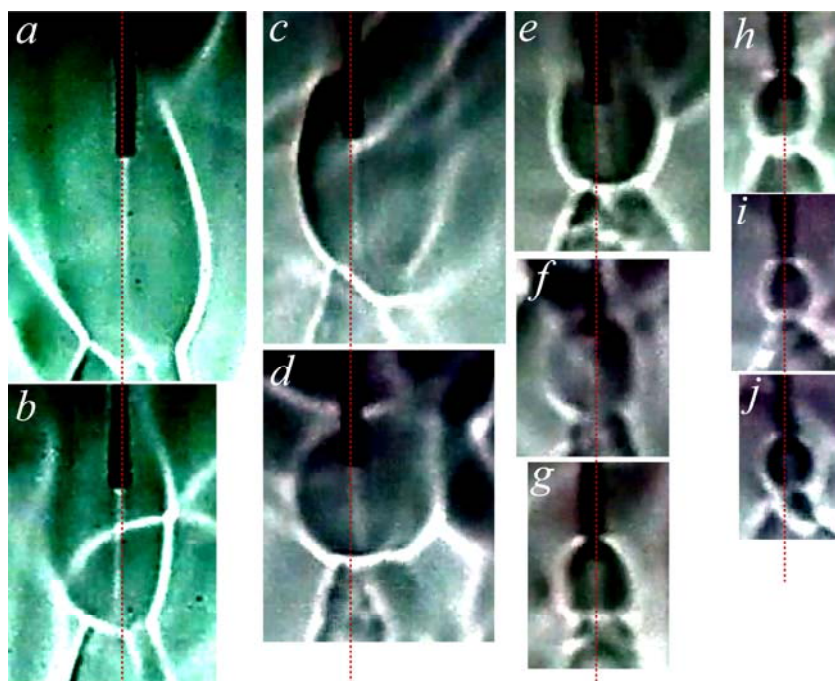


Рис. 11. Теневые картины развития «перетяжки» пламени (картины взяты из рис. 10, но в большем масштабе) при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 357; *b* – 408; *c* – 459; *d* – 510; *e* – 561; *f* – 612; *g* – 714; *h* – 765; *i* – 816; *j* – 867

Более наглядно диффузионное горение микроструи водорода в зависимости от скорости и направления ее истечения представлено на картинах, полученных с использованием метода Тёплера. На теневых картинах (рис. 10) процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от скорости истечения струи. Следует отметить, что в отличие от предыдущего случая, в данной ситуации, когда направление вектора скорости истечения струи совпадает с направлением вектора ускорения свободного падения (g), можно наблюдать ряд особенностей в развитии пламени при горении струи водорода (см. рис. 10).

Во-первых, конвективные потоки затемяют и слегка искажают картины горения, особенно при малых скоростях истечения струи (см. рис. 10, *a–c*). Во-вторых, область «перетяжки» пламени сохраняется на менее высокой скорости истечения струи (≈ 900 м/с), чем в предыдущей ситуации ($\approx 1\,000$ м/с). Отрыв пламени от среза сопла в отсутствие области «перетяжки» пламени лежит в диапазоне скоростей ($\approx 900\div 1\,000$ м/с) и при скорости ($\approx 1\,100$ м/с) горение микроструи прекращается. В то время как в предыдущей ситуации отрыв пламени от среза сопла за-

канчивается при скорости (≈ 870 м/с), горение в области «перетяжки» пламени в отсутствие горения турбулентной струи лежит в диапазоне скоростей ($\approx 870\div 1\,000$ м/с), и при скорости ($\approx 1\,000$ м/с) горение микроструи прекращается. Можно высказать предположение, что все эти отличия связаны с влиянием противоположной направленности векторов скорости истечения струи и ускорения свободного падения – \bar{g} .

Пространственный размер области «перетяжки» пламени уменьшается с ростом скорости микроструи, как и в предыдущем случае. С другой стороны, отчетливо видно, что в области «перетяжки» пламени струя водорода и пламя, ее окружающее, чисто ламинарные, затем можно наблюдать узкую область градиента плотности, проходя которую как струя, так и пламя становятся турбулентными. При скорости струи $u = 918$ м/с и более пламя горения турбулентной области струи отрывается от среза сопла, и исчезает область «перетяжки» пламени. При скорости истечения микроструи $u = 1\,107$ м/с и выше горение микроструи водорода прекращается.

На рис. 11 показаны теневые картины процесса развития области «перетяжки» пламени в зависимости от скорости истече-

ния микроструи, взятые из рис. 10, и для более детального рассмотрения они представлены в крупном масштабе.

Видно, что области «перетяжки» пламени представляют собой замкнутые сферические области диффузионного горения ламинарной струи в окружающем воздухе в ближнем поле микроструи, но, в отличие от предыдущего случая, эти области заметно искажены, вероятно, под воздействием конвективного потока нагретого окружающего воздуха, особенно при малых скоростях истечения струи (рис. 11, *a-d*). Можно отчетливо наблюдать узкую область градиента плотности газа на нижней границе области «перетяжки» пламени, которая также подвержена деформации по выше отмеченной причине. Преодолевая градиент плотности, ламинарная микроструя становится турбулентной, и далее, вниз по потоку, пламя горячей микроструи водорода приобретает турбулентный характер горения (см. рис. 10).

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи перпендикулярно вектору ускорения свободного падения (*g*)

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 12. Выходной диаметр круглого микросопла ($d = 500$ мкм), профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла параболический из-за отношения длины канала сопла (l) к диаметру

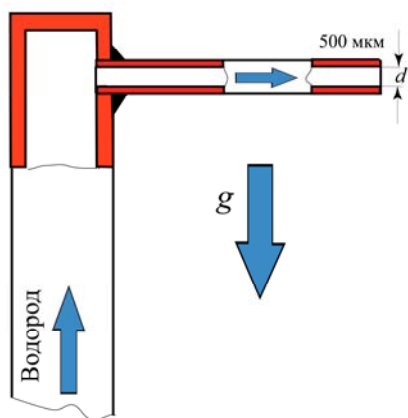


Рис. 12. Схема эксперимента

отверстия выходного сопла (d) $l/d = 140$ [7]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследовалось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру – как непосредственно процесс горения, так и картина, получаемая с помощью оптического теневого прибора (прибора Тёплера). Поток водорода задавался с помощью прецизионного расходомера MKS – Instruments (США) с точностью измерений $\pm 0,7\%$. Направление вектора скорости истечения водородной микроструи перпендикулярно вектору ускорения свободного падения – \vec{g} .

На рис. 13 представлены картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа. Можно наблюдать образование области «перетяжки» пламени в ближнем поле при диффузионном горении микроструи водорода и уменьшение ее пространственного размера с ростом скорости истечения струи (рис. 13, *e-i*). При малых скоростях истечения микроструи можно наблюдать характерную размытость верхней границы области «перетяжки» пламени (рис. 13, *a-d*). Для более детального понимания как данного феномена, так и вообще процесса развития диффузионного горения микроструи водорода в данных условиях при различной скорости истечения газа, были представлены их теневые картины (рис. 14). При малых скоростях истечения микроструи (рис. 14, *a-c*) нижняя половина границы области «перетяжки» пламени четко выделяется, в то время как ее верхняя граница размыта. По-видимому, из-за воздействия конвективного потока верхняя граница существенно сдвигается вверх от оси струи (см. рис. 14, *a*), пока постепенно, с ростом скорости истечения микроструи, не замкнет верхнюю половину границы области «перетяжки» пламени (рис. 14, *d*).

Можно выделить следующие особенности процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода, наблюдаемые в ситуации, представленной на рис. 14:

а) наличие области «перетяжки» пламени ($u = 408 \div 969$ м/с, см. рис. 14, *a-n*);

б) отрыв турбулентного пламени от среза сопла при наличии области «перетяжки» пламени и отсутствии горения турбулентной струи в районе между областью «перетяжки» пламени и оторвавшимся турбу-

лентным пламенем ($u = 816 \div 867$ м/с, см. рис. 14, *i-k*);

в) отсутствие горения турбулентной струи при наличии горения в области «перетяжки» пламени ($u = 908 \div 969$ м/с, см. рис. 14, *l-n*);

г) прекращение горения микроструи водорода ($u = 1\,020$ м/с, см. рис. 14, *o*).

На рис. 15 показаны теневые картины процесса развития области «перетяжки» пламени в зависимости от скорости истечения микроструи. Картины взяты из рис. 14, и для более детального рассмотрения они представлены в крупном масштабе.

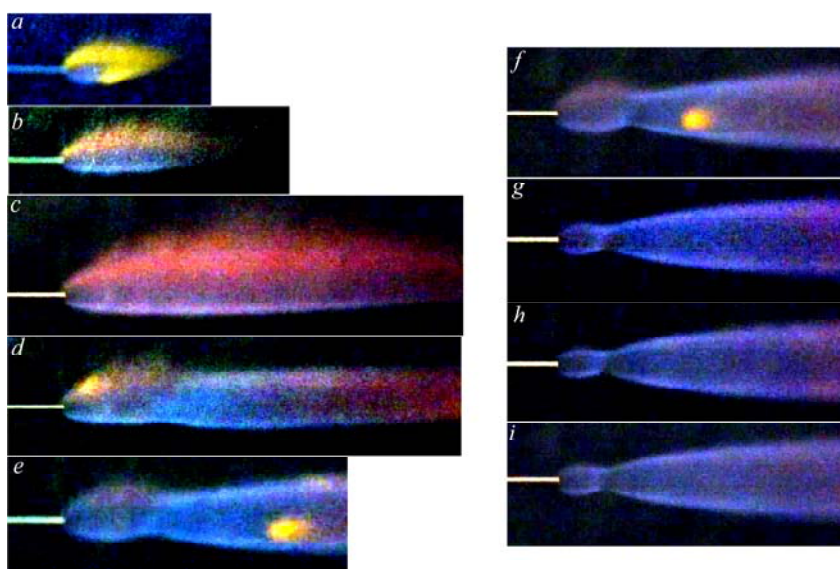


Рис. 13. Картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого сопла диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения газа (м/с): *a* – 51; *b* – 102; *c* – 204; *d* – 255; *e* – 357; *f* – 408; *g* – 510; *h* – 531; *i* – 561; образование «перетяжки» пламени

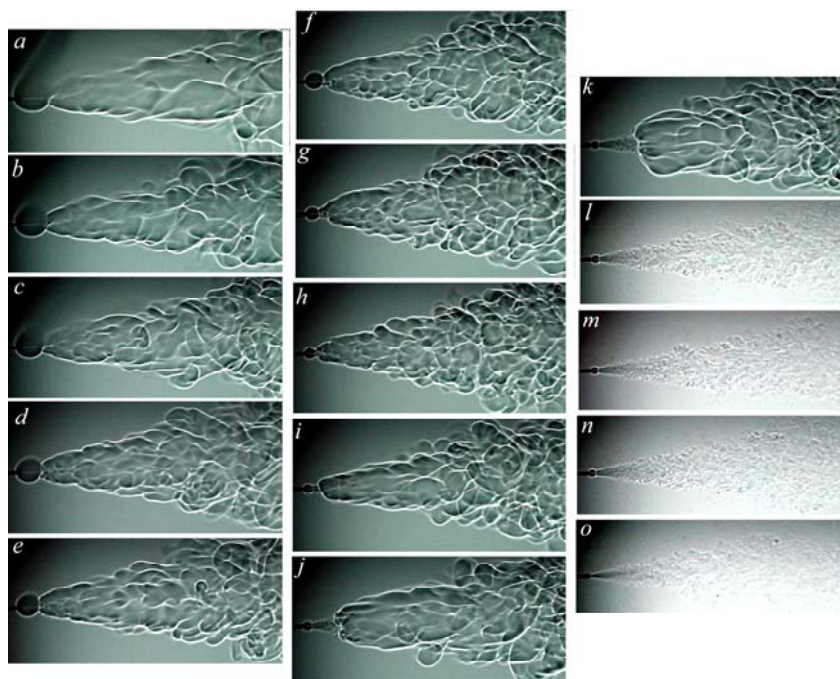


Рис. 14. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 408; *b* – 459; *c* – 510; *d* – 561; *e* – 612; *f* – 663; *g* – 714; *h* – 765; *i* – 816; *j* – 842; *k* – 867; *l* – 908; *m* – 918; *n* – 969; *o* – 1020; наличие области «перетяжки» пламени (*a-n*), турбулентная струя без горения и в отсутствие области «перетяжки» пламени (*o*)

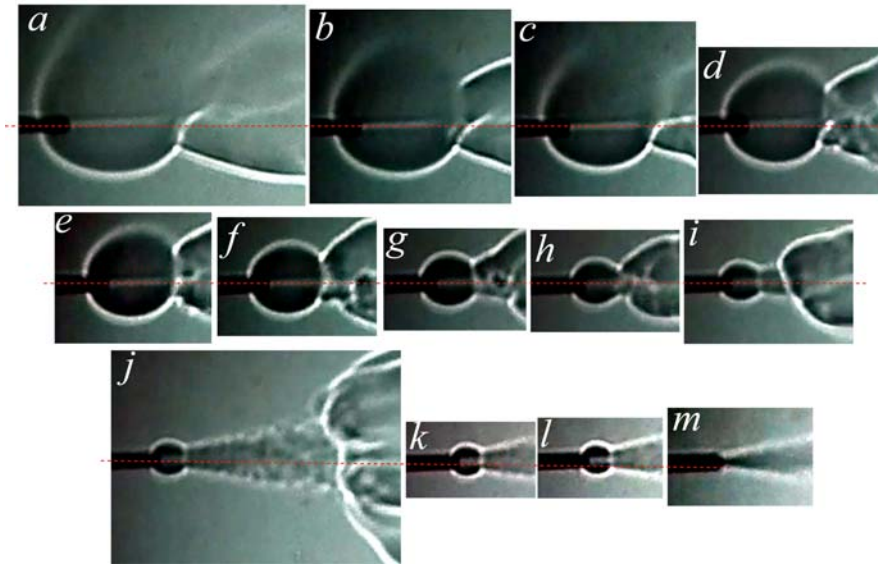


Рис. 15. Теневые картины развития области «перетяжки» пламени (картины взяты из рис. 14, но в большем масштабе) при различной скорости истечения струи (м/с): *a* – 408; *b* – 459; *c* – 510; *d* – 561; *e* – 612; *f* – 663; *g* – 714; *h* – 765; *i* – 816; *j* – 867; *k* – 918; *l* – 969; *m* – 1020; струя без области «перетяжки» пламени и без горения (*m*)

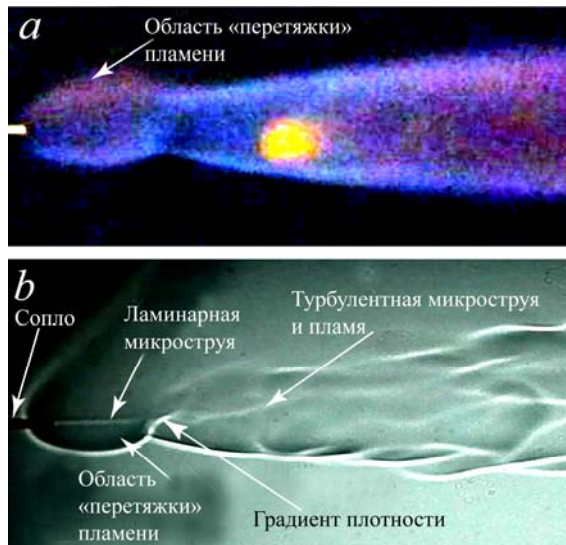


Рис. 16. Фотография (*a*) и теневая картина (*b*) горения микроструи водорода при скорости истечения струи 408 м/с

Видно, что области «перетяжки» пламени представляют собой замкнутые сферические области диффузионного горения ламинарной струи водорода в окружающем воздухе в ближнем поле микроструи. На рис. 15, *a–d* более четко, чем на рис. 14, виден процесс постепенного замыкания верхней границы области «перетяжки» пламени с ростом скорости истечения струи.

Разрыв узкой области градиента плотности газа (см. рис. 15, *a–d*), вызванный конвекцией потока, полностью восстанавливается при скорости струи $u = 612$ м/с (рис. 15, *e*) и далее вниз по потоку. Преодолевая градиент плотности, ламинарная микроструя становится турбулентной, и далее, вниз по потоку, пламя горячей микроструи водорода приобретает турбулентный характер.

На рис. 16 показаны для сравнения обычная фотография и теневая картина развития процесса диффузионного горения микроструи водорода в настоящих условиях. Хорошо видно, что теневая картина более информативна, чем обычная фотография.

Анализ результатов исследований

На рис. 17 показаны теневые картины процесса горения микроструи водорода для всех трех описанных ситуаций и на предельных скоростях истечения струи топлива, когда наблюдается отрыв пламени и прекращение горения микроструи.

Видны принципиальные отличия процесса горения микроструи водорода на его завершающем этапе для этих трех экспериментальных постановок. Отрыв пламени от среза сопла в ситуации, когда направленность вектора скорости истечения струи

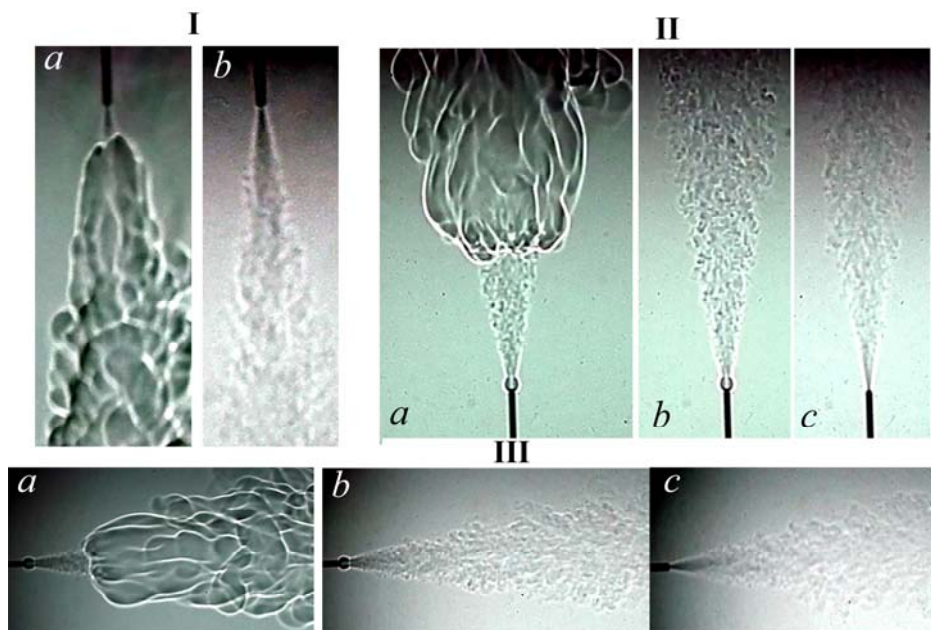


Рис. 17. Теневые картины отрыва пламени от среза сопла для различных пространственных направлений истечения микроструи водорода при ее диффузионном горении: I *a* – 918–1 097 м/с; *b* – 1 107 м/с; II *a* – 867 м/с; *b* – 969 м/с; *c* – 1 020 м/с; III *a* – 867 м/с; *b* – 908–969 м/с; *c* – 1 020 м/с; сопло: $d = 0,5$ мм, $l = 60$ мм

совпадает с направленностью вектора земной гравитации, происходит при исчезновении области «перетяжки» пламени (рис. 17, I). В то время как в двух других ситуациях область «перетяжки» пламени сохраняется как в случае отрыва пламени от среза сопла, так и в случае полного прекращения горения микроструи водорода (рис. 17, II, III). Следует также отметить, что полное прекращение горения микроструи водорода как в области «перетяжки» пламени, так и в области турбулентной струи, происходит при значительно большей скорости истечения струи (рис. 17, I, $u = 1\,107$ м/с), чем в двух других ситуациях (рис. 17, II, III, $u = 1\,020$ м/с).

Следует также отметить еще одну особенность в развитии круглой микроструи водорода и пламени при ее диффузионном горении. На рис. 18 показаны для сравнения две теневые картины круглой микроструи водорода без горения и с горением. Видно, что протяженность ламинарной области развития круглой микроструи водорода при ее горении увеличилась примерно в четыре раза по сравнению с протяженностью данной области в отсутствие горения струи. При этом область ламинарного смешения

микроструи водорода с окружающим воздухом (область «перетяжки» пламени) и ее горение четко отделено узкой областью градиента плотности газа от области горения турбулентной микроструи (рис. 18, *b*).

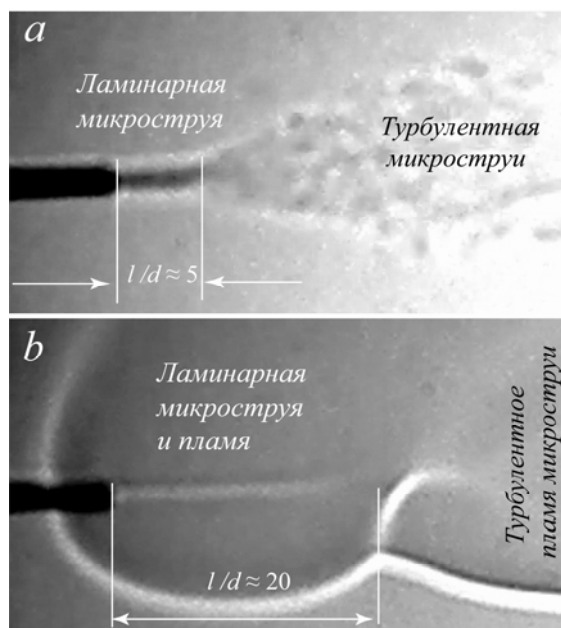


Рис. 18. Сравнение теневых картин развития круглой микроструи водорода без горения (*a*) и с горением (*b*), $d = 0,5$ мм, $u = 357$ м/с

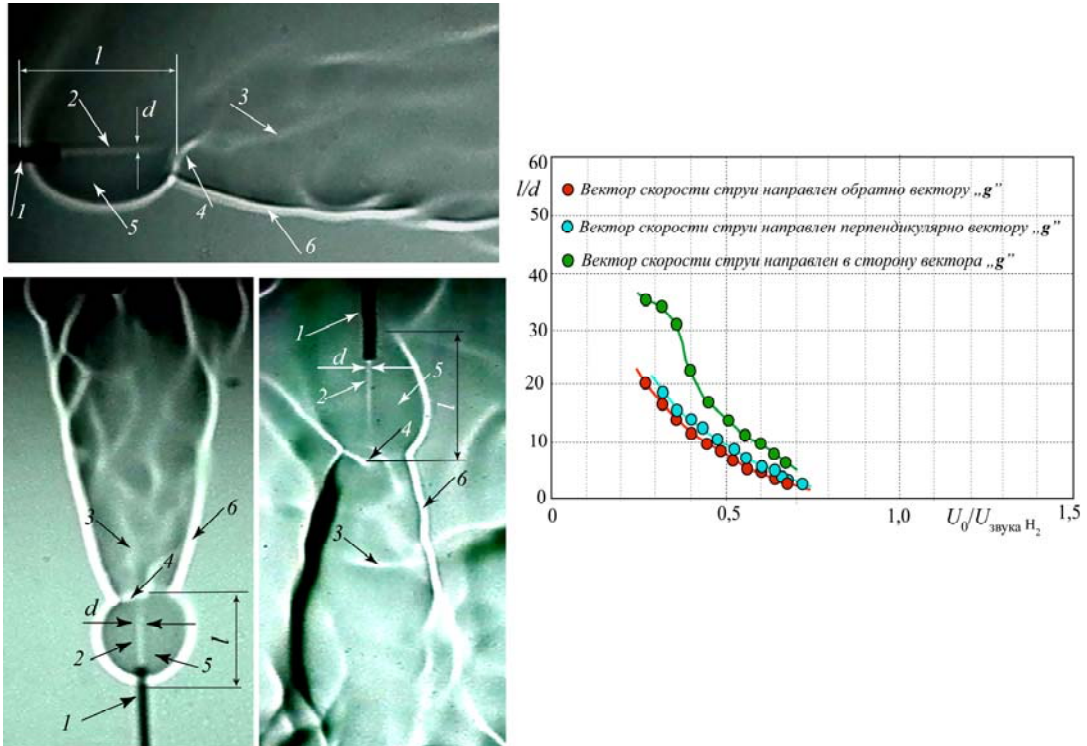


Рис. 19. Теневые картины области «перетяжки» пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода. Графики зависимостей размера области «перетяжки» пламени при диффузионном горении микроструи водорода (сопло: $d = 0,5$ мм) от направления и скорости ее истечения (справа)

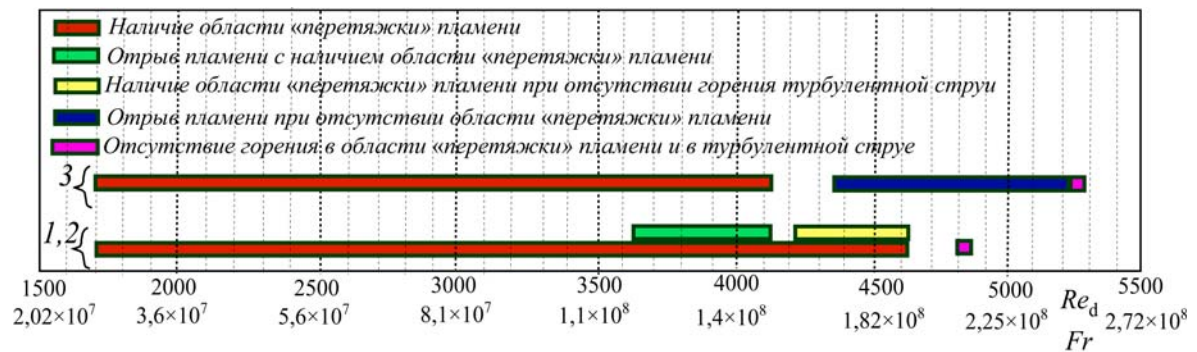


Рис. 20. Диаграммы поведения пламени в зависимости от чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) для различных пространственных направлений истечения микроструи водорода при ее диффузионном горении: направление вектора скорости истечения струи относительно направления вектора земной гравитации противоположное (1), перпендикулярное (2) и совпадающее (3), $d = 0,5$ мм, $l = 60$ мм

На рис. 19 показаны теневые картины области «перетяжки» пламени и графики зависимостей размера области «перетяжки» пламени при диффузионном горении микроструи водорода от направления и скорости ее истечения. Хорошо видно, что если в ситуации диффузионного горения круглой микроструи водорода, направление вектора

скорости истечения которой противоположно или перпендикулярно направлению вектора ускорения свободного падения (g), кривые зависимости $l/d = f(U)$ практически совпадают, то в ситуации совпадения направленности вектора скорости истечения струи с направлением вектора ускорения свободного падения (g), кривая зависимости

$l/d = f(U)$ резко отличается от предыдущего случая. Во-первых, кривая лежит значительно выше, что указывает на больший размер области «перетяжки» пламени. Во-вторых, при малых скоростях истечения струи этот размер почти в два раза превышает размер области «перетяжки» пламени для двух других ситуаций, что, по-видимому, может быть связано с воздействием однозначной направленности вектора ускорения свободного падения (g) и вектора скорости истечения струи, что может приводить к растяжению области «перетяжки» пламени.

На рис. 20 показаны диаграммы зависимости поведения пламени от чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) для различных пространственных направлений истечения микроструи водорода при ее диффузионном горении.

Видно (см. рис. 20), что диаграммы зависимости процессов диффузионного горения круглой микроструи водорода от скорости истечения струи (U) и чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) для ситуаций (1, 2) практически совпадают. Это касается диапазонов продолжительности существования области «перетяжки» пламени ($Re \approx 1\,700 \div 4\,600$), области отрыва с наличием области «перетяжки» пламени ($Re \approx 3\,650 \div 4\,100$), области наличия «перетяжки» пламени при отсутствии горения турбулентной части струи ($Re \approx 4\,220 \div 4\,600$) и, наконец, позиции полного прекращения горения микроструи ($Re \approx 4\,860$).

Можно наблюдать значительные изменения в диаграмме зависимости процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода от скорости истечения струи (U), чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) для ситуации (3). Во-первых, диапазон продолжительности существования области «перетяжки» пламени ($Re \approx 1\,700 \div 4\,100$) заметно уменьшился. Во-вторых, полностью исчезла область отрыва с наличием области «перетяжки» пламени и область наличия «перетяжки» пламени при отсутствии горения турбулентной части струи, зато появилась новая область со значительным диапазоном существования – *область отрыва пламени от среза сопла при отсутствии области «перетяжки» пламени* ($Re \approx 4\,350 \div 5\,200$). Наконец, позиция полного прекращения горения микроструи ($Re \approx 5\,270$) резко отли-

чается от соответствующего параметра ($Re \approx 4\,860$) для случаев (1, 2).

Таким образом, есть предположение, что все особенности и различия в процессе диффузионного горения круглой микроструи водорода в ситуации, когда вектор скорости ее истечения совпадает с вектором ускорения свободного падения (g), связаны именно с воздействием данного фактора. Действие этого фактора двояко: с одной стороны, можно наблюдать воздействие конвекции на структуру пламени, с другой – видны значительные изменения в характере самого процесса горения (3) по сравнению с ситуациями (1, 2).

Анализ результатов исследований воздействия плавучести на переходное диффузионное водородное пламя в работе [6]

В работе [6], как было отмечено, исследован эффект плавучести на переходное диффузионное водородное пламя. Результаты исследований показали существенное влияние эффекта плавучести в ближнем поле структуры пламени и его переходе от ламинарного к турбулентному горению. Полученные авторами работы данные привели их к выводу, что в условиях микрогравитации переходное пламя может становиться полностью ламинарным. В условиях земной гравитации авторами работы [6] показано, что протяженность области перехода (в наших исследованиях она обозначена как область «перетяжки» пламени) зависит от чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) (рис. 21).

Результаты, представленные на рис. 21, предполагают, что число Re струи – единственный действующий параметр. Однако изменение в Re также изменяет плавучесть, или число Fr . В данном случае число Fr растет в 2 раза (от $9,70 \cdot 10^7$ до $1,90 \cdot 10^8$), поскольку Re изменилось от 1 500 до 2 100. Хотя плавучестью часто пренебрегают при такой величине Fr , вероятно, что поведение перехода, наблюдаемое на рис. 21 является объединенным эффектом изменений чисел Re и Fr .

На рис. 22 число Fr струи, изменилось более чем на три порядка: от $1,25 \cdot 10^8$ до $1,81 \cdot 10^5$.

Авторы работы [6] пишут, что «для горелки с большим диаметром отверстия вы-

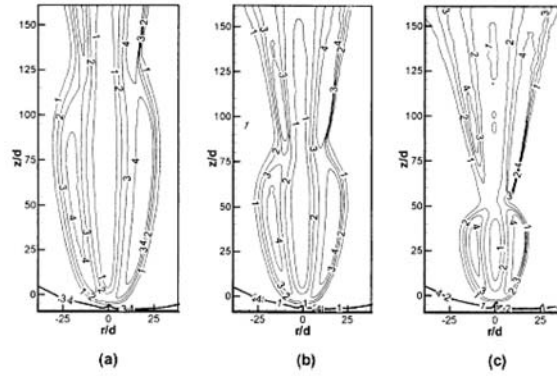


Рис. 21. Воздействие числа Рейнольдса на область перехода ($d = 0,31$ мм, $P = 1,0$ атм.): $a - Re = 1\,500$, $Fr = 9,75 \cdot 10^7$; $b - Re = 1\,700$, $Fr = 1,25 \cdot 10^8$; $c - Re = 2\,100$, $Fr = 1,9 \cdot 10^8$ (взято из работы [6])

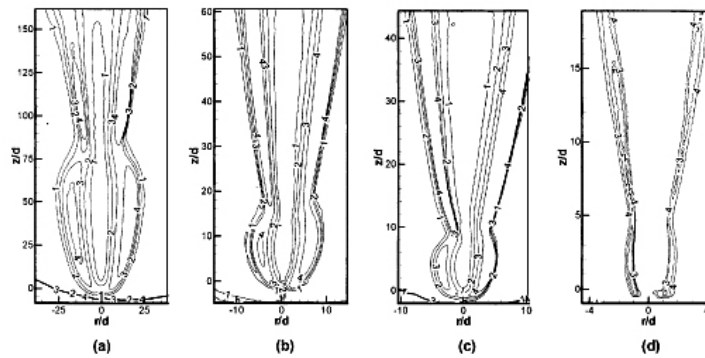


Рис. 22. Воздействие диаметра горелки на область перехода ($P = 1$ атм., $Re = 1\,700$): $a - d = 0,31$ мм, $Fr = 1,25 \cdot 10^8$; $b - d = 0,58$ мм, $Fr = 1,77 \cdot 10^7$; $c - d = 1,190$ мм, $Fr = 2,10 \cdot 10^9$; $d - d = 2,69$ мм, $Fr = 1,81 \cdot 10^5$ (взято из работы [6])

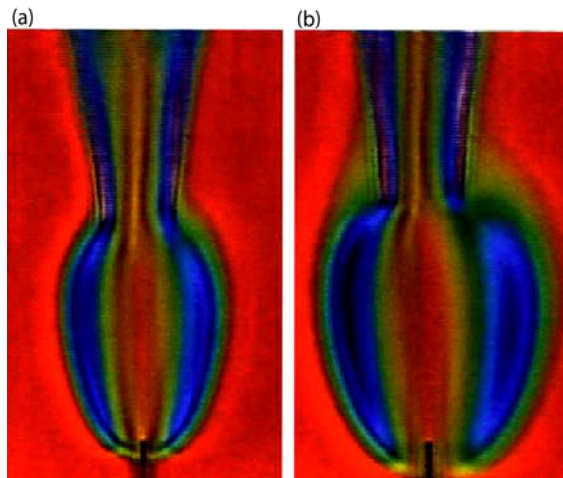


Рис. 23. Цветные теневые картины пламени ($d = 0,31$ мм, $Re = 1\,500$): $a -$ земная гравитация, $Fr = 9,70 \cdot 10^7$; $b -$ микрогравитация, $Fr = 9,70 \cdot 10^{11}$ (взято из работы [6])

ходного сопла, пламя скудное, потому что Fr является маленьким и, следовательно, плавучее ускорение существенно. Напротив, горелка с меньшим диаметром отверстия выходного сопла, т. е. с большим числом Fr , создает более широкое ламинарное пламя. Подобные эффекты плавучести наблюдались в ламинарном диффузионном пламени при горении водорода в условиях экспериментов на установках свободного падения (в условиях кратковременной микрогравитации), что доказывает применимость использования изменения диаметра горелки для изменения плавучести или числа Fr в условиях земной гравитации. Протяженность области перехода увеличивается с ростом числа Fr струи, обозначая воздействие плавучести на переход пламени. Два фактора

могут объяснить изменение протяженности области перехода, связанные с плавучестью. Во-первых, ускорение плавучести горячих продуктов при низком числе Fr струи дестабилизирует пламя ламинарной топливной струи, приводя к его раннему разрушению, т. е. турбулизации пламени. Наоборот, разрушение струи топлива задерживается в неплавучей окружающей среде при большом числе Fr пламени струи».

Оба пламени на рис. 23 показывают отчетливый внутренний сдвиг для области перехода, отделяя ближнее поле ламинарного пламени от турбулентного пламени вниз по течению. Переход пламени в условиях земной гравитации и микрогравитации был вызван неустойчивостью топливной струи, потому что топливная струя была ламинарной на выходе из сопла. В области ламинарного ближнего поля теневая граница шире при микрогравитации (см. рис. 23, *b*) по сравнению с условиями земной гравитации (см. рис. 23, *a*). Эти наблюдения ясно демонстрируют важность эффекта плавучести в пламени при большом числе Fr струи. На рис. 23 продемонстрировано значимое увеличение протяженности области перехода при микрогравитации. Результаты исследований навели авторов работы [6] на мысль, что отсутствие сил плавучести ламинаризирует топливную струю и, таким образом, задерживает ее разрушение и переход пламени в режим турбулентного горения.

Авторы работы [6] исследовали воздействие сил плавучести на переходное диффузионное водородное пламя в условиях земной гравитации и микрогравитации. При этом направленность вектора скорости истечения микроструи была обратной направленности вектора ускорения свободного падения. В настоящих исследованиях изучались особенности диффузионного горения микроструи водорода в зависимости от изменений направленности вектора скорости истечения струи относительно вектора ускорения свободного падения в условиях земной гравитации. Показано, что основные выводы работы [6] коррелируют с результатами исследований, полученных в данной работе. Однако с учетом эффекта плавучести можно отметить результаты исследований, полученные в ситуации, когда вектор скорости истечения микроструи совпадает с направлением вектора ускорения свободного падения. В данном случае наблюдались

значительные изменения в поведении пламени, а именно: изменение зависимости протяженности области «перетяжки» пламени от скорости истечения струи (см. рис. 19) и резкое отличие диаграммы поведения пламени в зависимости от чисел Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr) (рис. 20). Можно предположить, что данные изменения связаны с воздействием однозначной направленности векторов скорости истечения струи и ускорения свободного падения, или, другими словами, с плавучестью.

Список литературы

1. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейников О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения водорода в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.
2. Козлов В. В., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Коробейников О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Структура пламени при горении пропана в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // ДАН. 2014. Т. 459, № 5 С. 562–566.
3. 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. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.
4. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
5. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейников О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.
6. Agrawal A. K., Albers B. W., Alamar Kh. N. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas – jet diffusion flames // Combustion Science and Technology. 2005. Vol. 177. No. 2. P. 305–322.

Г. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М.,
Литвиненко Ю. А. Влияние начальных ус-
ловий на срезе сопла на структуру круглой

струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008.
Т. 15, № 1. С. 59–73.

Материал поступил в редколлегию 17.10.2015

**G. R. Grek¹, V. V. Kozlov^{1,3}, O. P. Korobeinichev²
Yu. A. Litvinenko^{1,3}, A. G. Shmakov²**

¹ *Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

³ *Institute of Chemical Kinetics and Combustion of SB RAS
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*kozlov@itam.nsc.ru, grek@itam.nsc.ru, korobein@kinetics.nsc.ru
litur@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru*

FEATURES OF THE DIFFUSION COMBUSTION OF HYDROGEN MICROJET AT VARIOUS SPATIAL ORIENTATION OF THE NOZZLE EXIT

The purpose of the given work will consist in the experimental studies of features diffusion combustion of a hydrogen round microjet depending on spatial orientation of the nozzle exit. It is revealed, that a hydrogen round microjet at diffusion combustion in conditions of a jet velocity vector orientation towards terrestrial gravitation vector «g» (opposite or perpendicular) the basic characteristics of the flame evolution depending on a jet velocity are practically coincided. To these characteristics concern such as ranges of the «bottleneck» flame area presence, flame detachment at presence of the «bottleneck» flame area, presence of the «bottleneck» flame area, but absence of a turbulent jet combustion and finally ending of the microjet combustion. On the contrary, in situation of the hydrogen round microjet diffusion combustion in conditions of a jet velocity vector orientation towards terrestrial gravitation vector «g» (orientability – like) the basic characteristics of the flame evolution depending on a jet velocity are sharply differed from two previous cases. The range of existence of the «bottleneck» flame area is reduced, flame detachment occurs in absence of the «bottleneck» flame area and finally ending of the microjet combustion occurs at the much greater jet velocity.

Keywords: hydrogen round microjet, diffusion combustion, «bottleneck» flame area, schlieren method, shadow patterns.