

Г. Р. Грек¹, М. В. Литвиненко^{1,2}, Г. В. Козлов¹, В. В. Вихорев^{1,2}

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

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

grek@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru

ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВЫХОДНОГО СОПЛА С УДАРНЫМ ПРОФИЛЕМ СКОРОСТИ НА ЕГО СРЕЗЕ *

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микросопла с ударным профилем скорости на его срезе, в зависимости от пространственной ориентации выходного сопла. Обнаружено, что в условиях направленности вектора скорости истечения микроструи обратной и перпендикулярной направленности вектора земной гравитации (g) основные характеристики развития пламени в зависимости от расхода (Q) газа (или скорости (U) истечения микроструи) достаточно близки друг к другу. К этим характеристикам относятся диапазоны наличия области перетяжки пламени, отрыва пламени при наличии этой области, диапазоны наличия области перетяжки пламени, но в отсутствие горения турбулентной части микроструи и моменты прекращения горения микроструи. Наоборот, в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающем с направлением вектора ускорения 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 этой области, полностью отсутствуют ситуации горения в области перетяжки пламени при наличии отрыва турбулентного пламени и прекращения горения турбулентной области микроструи, момент полного прекращения горения микроструи происходит при значительно большей скорости ее истечения.

Ключевые слова: водородная круглая микроструя, ударный профиль скорости на срезе сопла, 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 микроструй водорода. Обнаружено явление раздвоения пламени как круглой, так и плоской микроструи. Данное явление совпадало с поведением

пламени при горении круглой и плоской микроструй пропана в поперечном акустическом поле [2]. Кроме того, было обнаружено некое новое явление в поведении пламени (мы условно назвали его «перетяжкой» на участке выхода струи из сопла). Характеристики перетяжки сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсив-

* Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00946 и грантом Президента РФ (НШ 8788.2016.1).

ности 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 было уделено исследованию характеристик развития области 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, полученных в работе [3]. Во всех этих 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 мм, а при горении плоской микроструи водорода в зависимости от удлинения (отношения длины сопла к его ширине) равным 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, заканчивающихся 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 их исследований 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 больший эффект «плавучести») была отличительным свойством, во-первых, более раннего разрушения ламинарной топливной струи и, во-вторых, наименьшего расстояния между поверхностью пламени и топливной струей, хотя индивидуальные вклады этих двух факторов не были разделены [6]. Эффекты «плавучести» были более явными при более низких числах Рейнольдса и навели авторов работы на мысль, что переходное пламя в условиях микрогравитации может стать ламинарным.

Особенности механизма диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла с параболическим профилем скорости на его срезе, в зависимости от направленности вектора скорости микроструи относительно направленности вектора ускорения свободного падения (\bar{g}) представлены в работе [7]. Показано, что если в ситуации диффузионного горения круглой микроструи водорода, направление вектора скорости истечения которой противоположно (1) или перпендикулярно (2) направлению вектора ускорения свободного падения, кривые зависимости $l/d = f(U)$ практически совпадают, то в ситуации направленности вектора скорости истечения струи, совпадающей с направлением вектора ускорения свободного падения (3), кривая зависимости $l/d = f(U)$ резко отличается от двух предыдущих случаев. 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 и вектора скорости истечения струи, что мо-

жет приводить к растяжению области перетяжки пламени. Обнаружены значительные изменения в диаграмме зависимости процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода от скорости истечения струи, чисел Рейнольдса и Фруда для ситуации (3). Во-первых, диапазон продолжительности существования области перетяжки пламени 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*. Наконец, позиция полного прекращения горения микроструи резко отличается от соответствующего параметра 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 (\vec{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).

Цель настоящей работы состоит в экспериментальных исследованиях особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микросопла с ударным профилем скорости на его срезе, в зависимости от пространственной ориентации выходного отверстия микросопла. Другими словами, различной ориентации вектора скорости истечения круглой микро-

струи водорода относительно направления вектора ускорения силы тяжести земли (\vec{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, обратном направлению вектора ускорения свободного падения (\vec{g})

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Выходной диаметр круглого микросопла составлял $d = 0,5$ мм, профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла имел ударный характер (рис. 2) из-за отношения длины канала сопла к диаметру отверстия выходного сопла, равного 3,6 [8]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследовалось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру как при непосредственной съемке процесса горения, так и при записи процесса горения, получаемого 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 теневых картинах (рис. 3) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от расхода (Q , см³/с) водорода, т. е. скорости истечения микроструи. Отчетливо видно,

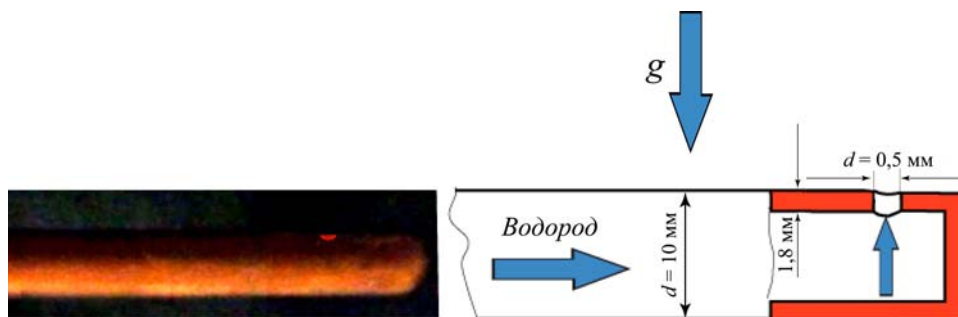


Рис. 1. Фотография установки (слева) и схема эксперимента (справа)

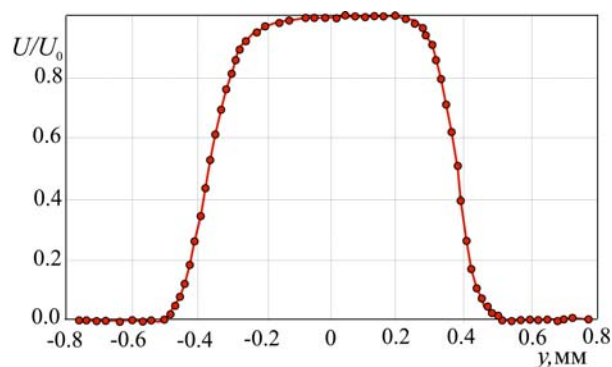


Рис. 2. Распределение средней (U) составляющей продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая короткой длины канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с, диаметр выходного отверстия на срезе круглого сопла $d = 1$ мм [8]

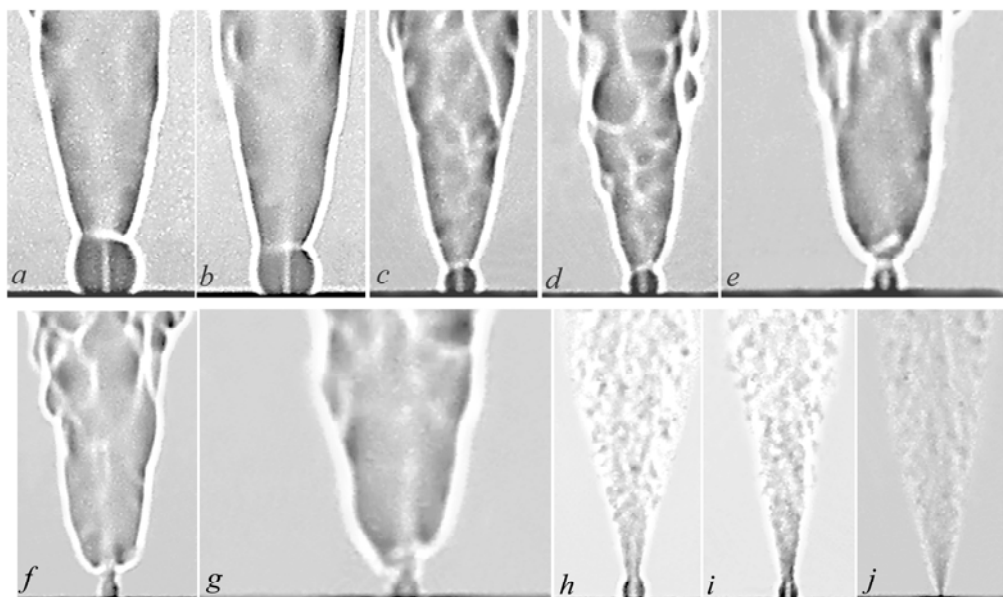


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 0,5 мм, при различном расходе газа (Q , см³/с): $a - 70$; $b - 80$; $c - 100$; $d - 110$; $e - 120$; $f - 130$; $g - 140$; $h - 147$; $i - 150$; $j - 155$

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 расходе газа 120 см³/с и более, пламя в турбулентной области струи скачкообразно отделяется от области перетяжки пламени, оставляя часть турбулентной области струи в промежутке между турбулентным пламенем и областью перетяжки пламени без горения. При этом в области перетяжки пламени процесс ламинарного смешения струи с окружающим

воздухом, а также горение смеси продолжается (рис. 3, e, g).

При расходе газа 140 и выше (см. рис. 3, h, i) можно наблюдать процесс горения в области перетяжки пламени и отсутствие горения турбулентной области микроструи водорода. Горение в области перетяжки пламени прекращается при расходе газа 155 (см. рис. 3, j), при этом можно наблюдать процесс развития микроструи водорода в отсутствие горения. На теневых картинах (рис. 4) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от расхода (Q , см³/с) водо-

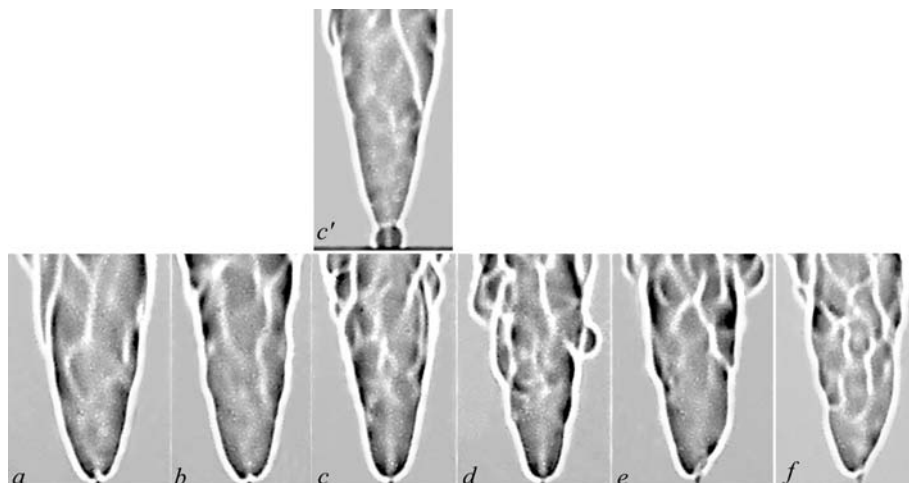


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 0,5 мм, при различном расходе газа (Q , см³/с): a – 90; b – 100; c , c' – 110; d – 120; e – 130; f – 140, в ситуации поджигания микроструи сверху и реализации приподнятого пламени в отсутствие области перетяжки пламени. Состояние горения неустойчиво и при малейшем возмущении либо поджигании снизу мгновенно возникает область перетяжки пламени (см. теневую картину c')

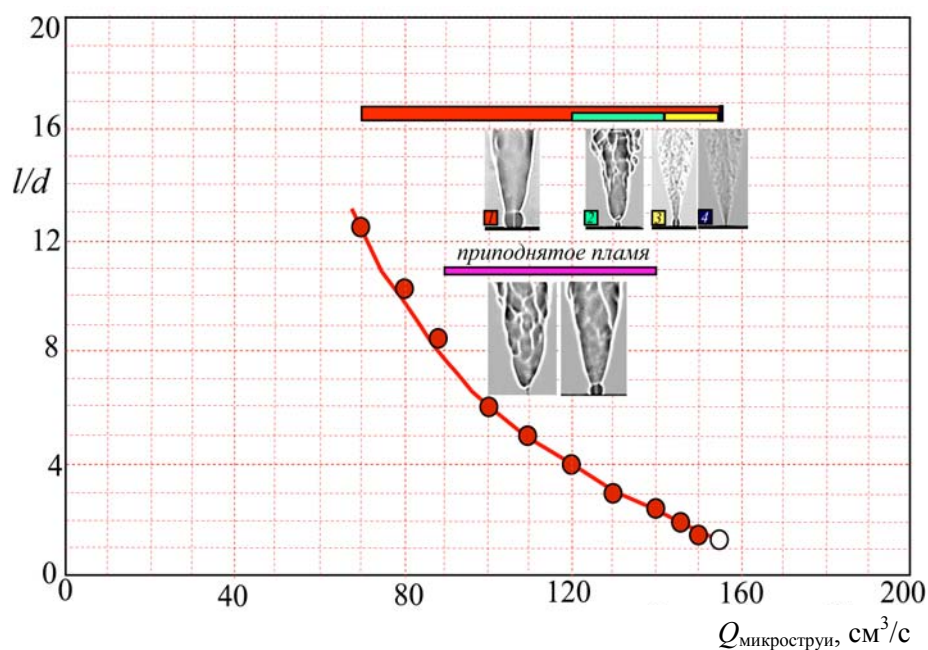


Рис. 5. График зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа: 1 – наличие области перетяжки пламени; 2 – область отрыва пламени; 3 – наличие области перетяжки пламени в отсутствие горения турбулентной части микроструи; 4 – прекращение горения микроструи. Диапазон неустойчивого горения микроструи водорода в ситуации ее поджигания сверху

рода, т. е. скорости истечения микроструи, при ее воспламенении *сверху*. Отчетливо видно, что исчезла область перетяжки пламени, и можно наблюдать так называемое приподнятое пламя. Следует отметить, что состояние процесса горения с приподнятым

пламенем является неустойчивым, и при малейшем возмущении либо воспламенении микроструи *снизу* мгновенно возникает область перетяжки пламени (рис. 4, c').

График изменения размера области перетяжки пламени (l/d) с ростом расхода газа

(Q), а также диаграммы состояний пламени в ситуации приподнятого или присоединенного пламени представлены на рис. 5.

Видно, что размер области перетяжки пламени (l/d) с ростом расхода газа (Q) уменьшается: диапазон наличия области перетяжки пламени находится в пределах $Q = 70 \div 150 \text{ см}^3/\text{с}$, отрыв пламени $Q \approx 120 \div 140 \text{ см}^3/\text{с}$, наличие области перетяжки пламени при отсутствии горения турбулентной части микроструи $Q \approx 140 \div 155 \text{ см}^3/\text{с}$ и прекращение горения микроструи $Q \approx 155 \text{ см}^3/\text{с}$. Диапазон существования приподнятого пламени $Q \approx 90 \div 140 \text{ см}^3/\text{с}$.

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения микроструи, перпендикулярном направлению вектора ускорения свободного падения (\vec{g})

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6. Выходной диаметр круглого микросопла составлял $d = 0,5 \text{ мм}$, профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла имел ударный характер (см. рис. 2) из-за отношения длины канала сопла к диаметру отверстия выходного сопла, равного 3,6 [8]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследовалось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру как при непосредственной съемке процесса горения, так и при записи процесса горения, получаемого 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. 6, направление вектора скорости истечения водородной микроструи перпендикулярно направлению вектора ускорения силы тяжести земли \vec{g} .

На теневых картинах (рис. 7) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости от расхода (Q , $\text{см}^3/\text{с}$) водорода, т. е. скорости истечения микроструи. Отчетливо видно, что в области перетяжки пламени струя водорода и пламя, ее окружающее, чисто ламинарные, затем можно наблюдать узкую область градиента плотности, проходя кото-

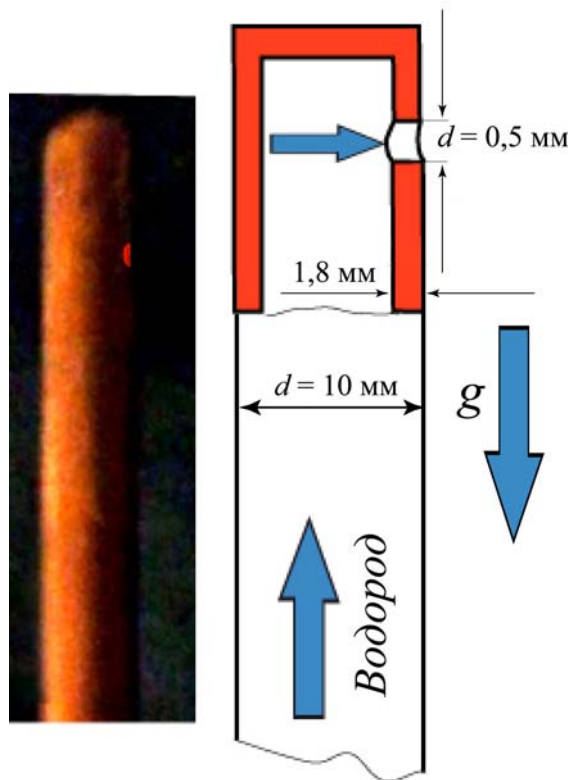


Рис. 6. Фотография установки (слева) и схема эксперимента (справа)

рую как струя, так и пламя становятся турбулентными. При расходе газа $110 \text{ см}^3/\text{с}$ и более (рис. 7, *e-h*) пламя в турбулентной области струи скачкообразно отделяется от области перетяжки пламени, оставляя часть турбулентной области струи в промежутке между турбулентным пламенем и областью перетяжки пламени без горения. При этом в области перетяжки пламени процесс ламинарного смешения струи с окружающим воздухом, а также горение смеси продолжается (см. рис. 7, *e-h*). При расходе газа $140 \text{ см}^3/\text{с}$ и выше (см. рис. 7, *i*) можно наблюдать прекращение горения микроструи водорода.

График изменения размера области перетяжки пламени (l/d) с ростом расхода газа (Q), а также диаграмма состояний пламени в ситуации присоединенного пламени представлены на рис. 8. Видно, что размер области перетяжки пламени с ростом расхода газа уменьшается, диапазон наличия области перетяжки пламени находится в пределах $Q = 70 \div 140 \text{ см}^3/\text{с}$, отрыв пламени $Q \approx 110 \div 140 \text{ см}^3/\text{с}$ и прекращение горения микроструи $Q \approx 140 \text{ см}^3/\text{с}$.

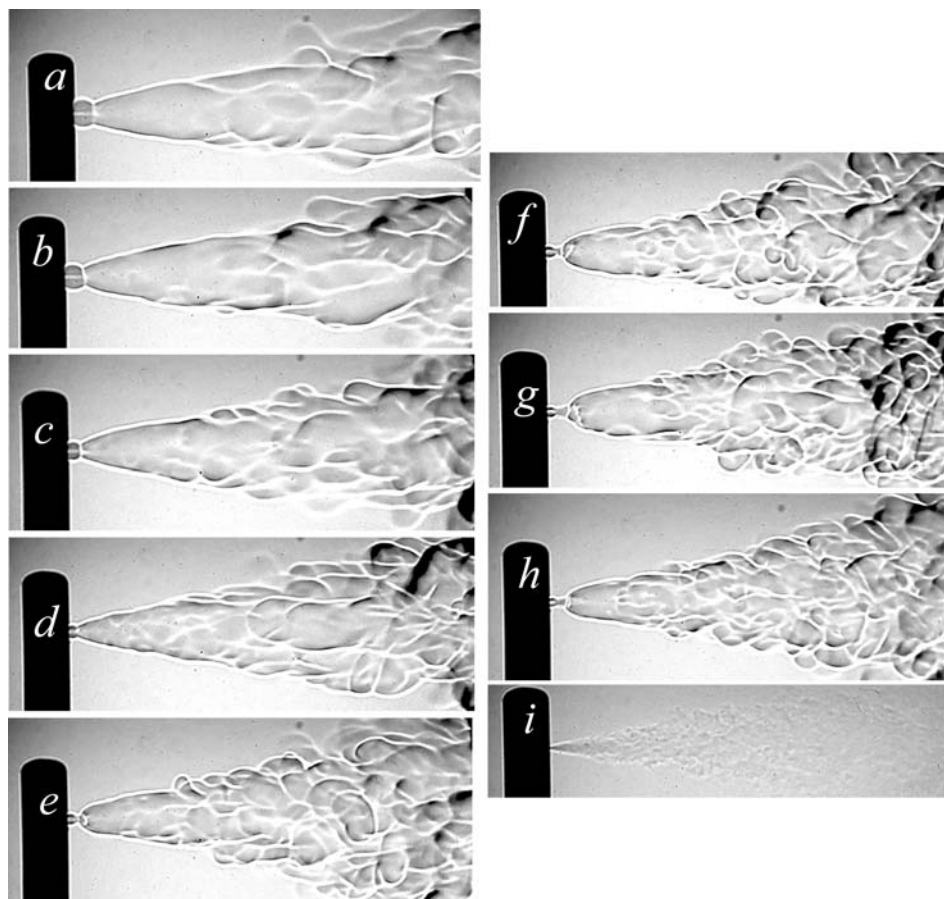


Рис. 7. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 0,5 мм, при различном расходе газа (Q , $\text{см}^3/\text{с}$): $a - 70$; $b - 80$; $c - 90$; $d - 100$; $e - 110$; $f - 120$; $g - 130$; $h - 137$; $i - 140$; образование области перетяжки пламени ($a-h$), отрыв пламени при наличии области перетяжки пламени ($e-h$), прекращение горения микроструи (i)

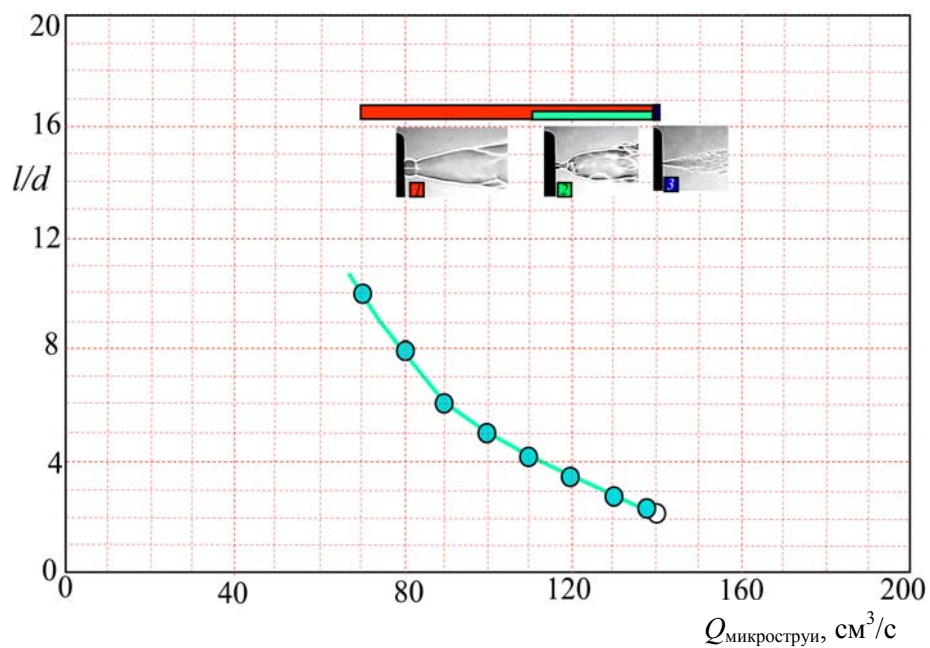


Рис. 8. График зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа: 1 – наличие области перетяжки пламени; 2 – отрыв пламени при наличии области перетяжки пламени; 3 – прекращение горения микроструи

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения микроструи, совпадающем с направлением вектора ускорения свободного падения (\vec{g})

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 9. Выходной диаметр круглого микросопла составлял $d = 0,5$ мм, профиль средней скорости на выходе микроструи из сопла имел ударный характер (см. рис. 2) из-за отношения длины канала сопла к диаметру отверстия выходного сопла, равного 3,6 [8]. Диффузионное горение водорода в круглой микроструе исследова-

лось при различных скоростях истечения струи и записывалось на цифровую видеокамеру как при непосредственной съемке процесса горения, так и при записи процесса горения, получаемого 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. 9, направление вектора скорости истечения водородной микроструи совпадает с направлением вектора ускорения силы тяжести земли \vec{g} .

На теневых картинах (рис. 10) представлен процесс развития микроструи водорода и пламени при ее горении в зависимости

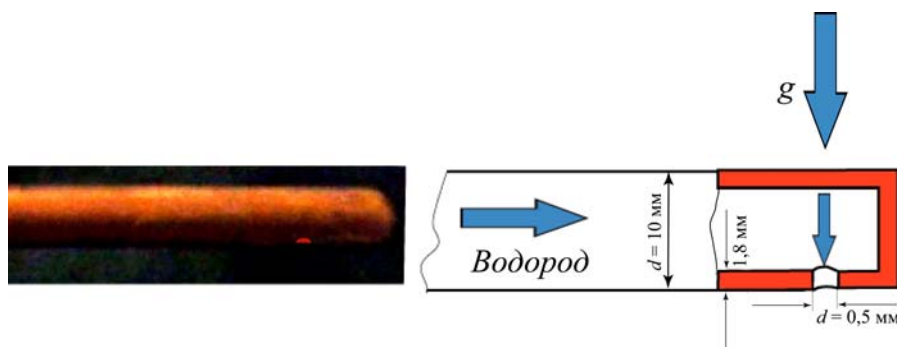


Рис. 9. Фотография установки (слева) и схема эксперимента (справа)

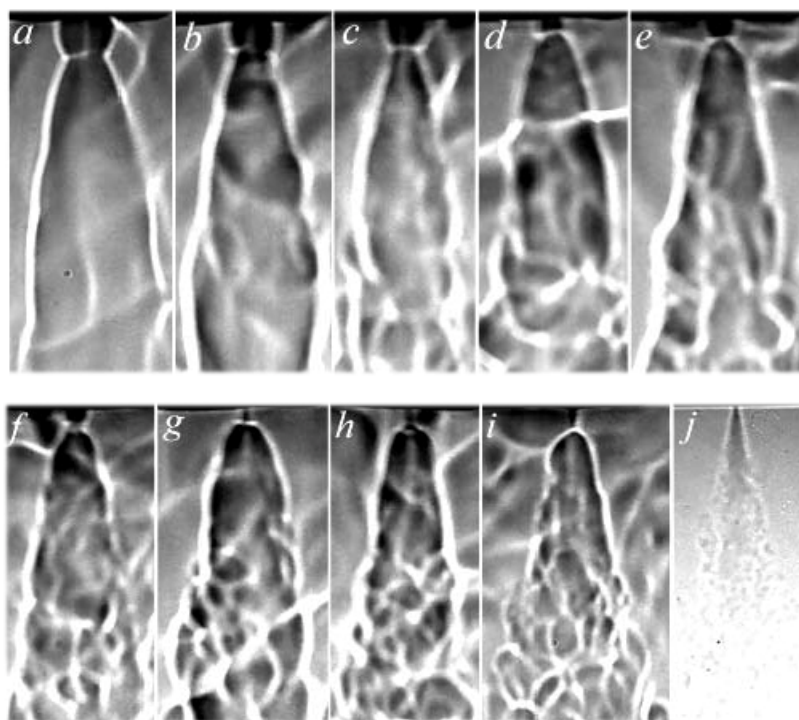


Рис. 10. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из круглого отверстия диаметром 0,5 мм, при различном расходе газа (Q , см³/с): $a - 70$; $b - 80$; $c - 90$; $d - 100$; $e - 110$; $f - 120$; $g - 130$; $h - 150$; $i - 180$; $j - 190$; образование области перетяжки пламени ($a-f$), отрыв пламени в отсутствие области перетяжки пламени ($g-i$), прекращение горения микроструи (j)

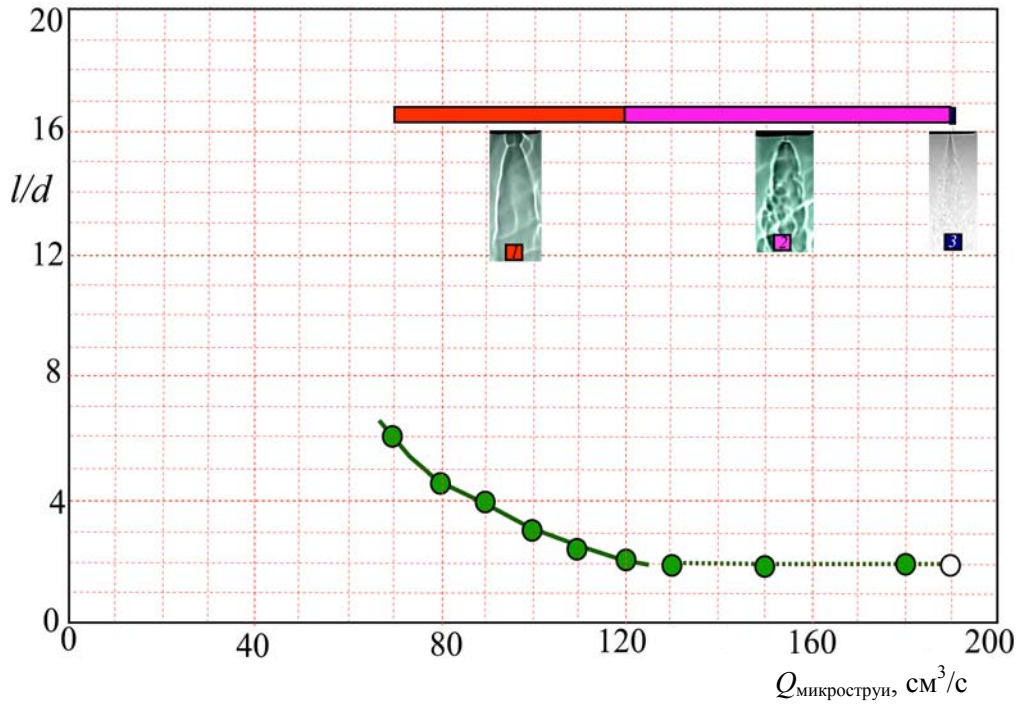


Рис. 11. График зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа: 1 – наличие области перетяжки пламени; 2 – отсутствие области перетяжки пламени, приподнятое пламя, 3 – прекращение горения микроструи

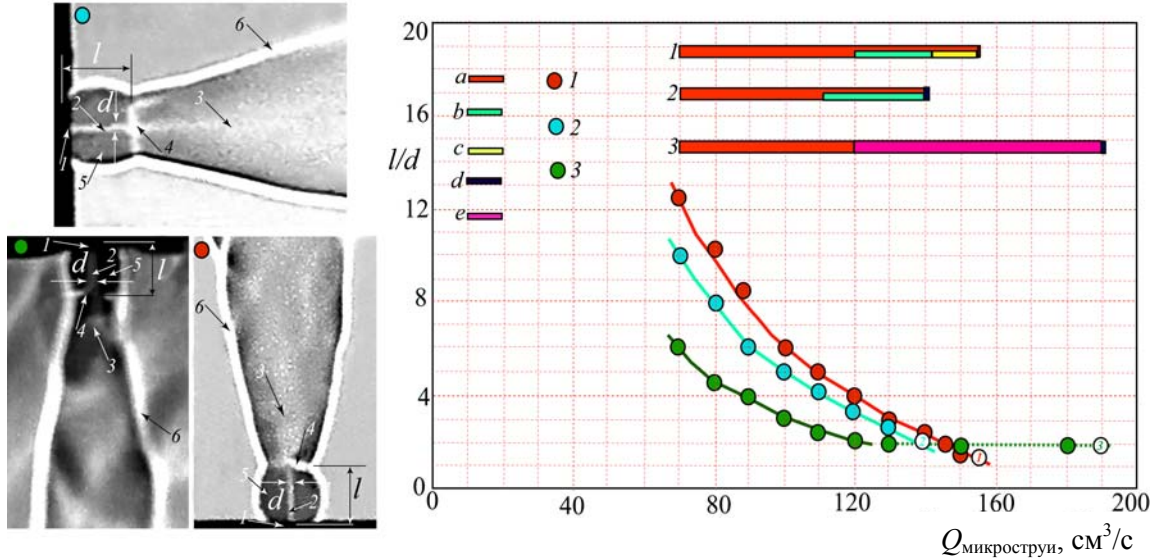


Рис. 12. Теневые картины области перетяжки пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода.

График зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа и направления вектора скорости истечения водорода относительно g (вектора ускорения свободного падения g) (справа): 1 – против g ; 2 – перпендикулярно g ; 3 – в направлении g .

Диаграммы процесса диффузионного горения микроструи водорода: a – наличие области перетяжки пламени; b – отрыв пламени при наличии области перетяжки пламени; c – прекращение горения турбулентной области микроструи при наличии области перетяжки пламени; d – прекращение горения микроструи; e – отрыв пламени при отсутствии области перетяжки пламени (приподнятое пламя)

от расхода (Q , см³/с) водорода, т. е. скорости истечения микроструи. Следует отметить, что в отличие от случая (I) в данной ситуации, когда направлении вектора скорости истечения струи совпадает с вектором ускорения свободного падения (g), можно наблюдать ряд особенностей в развитии пламени при горении струи водорода (см. рис. 10). Во-первых, теневые картины затенены конвективными потоками, слегка искажающими картины горения, особенно при малых скоростях истечения струи. Во-вторых, область перетяжки пламени сохраняется при меньшем расходе газа ($Q \approx 120$ см³/с), чем в предыдущей ситуации ($Q \approx 150$ см³/с). Отрыв пламени от среза сопла в отсутствие области перетяжки пламени лежит в диапазоне расхода водорода $Q \approx 130\div 180$ см³/с, и при расходе $Q \approx 190$ см³/с горение микроструи прекращается. В то время как в предыдущей ситуации отрыв пламени при сохранении области перетяжки пламени лежит в диапазоне расхода водорода $Q \approx 120\div 140$ см³/с, наличие области перетяжки пламени в отсутствие горения турбулентной части микроструи при $Q \approx 145\div 150$ см³/с и прекращение горения микроструи при $Q \approx 155$ см³/с. Можно высказать предположение, что все эти отличия связаны с влиянием противоположной направленности вектора скорости истечения струи относительно вектора ускорения силы тяжести земли \vec{g} .

График изменения размера области перетяжки пламени (l/d) с ростом расхода газа (Q), а также диаграмма состояний пламени в ситуации присоединенного пламени представлены на рис. 11. Как видно из графика, размер области перетяжки пламени с ростом расхода газа уменьшается, диапазон наличия области перетяжки пламени находится в пределах $Q = 70\div 120$ см³/с, отрыв пламени в отсутствие области перетяжки пламени $Q \approx 120\div 190$ см³/с и прекращение горения микроструи $Q \approx 190$ см³/с. Если в ситуации (I) можно наблюдать наличие области перетяжки пламени как в ситуации отрыва пламени, так и в отсутствие горения турбулентной области микроструи, то в данном случае отрыв пламени сопровождается исчезновением области перетяжки пламени, т. е. можно наблюдать так называемое приподнятое пламя, и диапазон его существования значительно шире ($Q \approx 120\div 190$ см³/с),

чем диапазон явлений, наблюдаемых в ситуации (I) ($Q \approx 120\div 150$ см³/с).

Сравнение всех трех ситуаций диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из микросопла диаметром $d = 0,5$ мм с ударным профилем скорости на его срезе, представлено на рис. 12. 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 $l/d = f(U)$ достаточно близки друг к другу, то в ситуации совпадения направленности вектора скорости истечения струи с направлением вектора ускорения свободного падения (g), кривая зависимости $l/d = f(U)$ имеет значительно большее отклонение от двух предыдущих случаев. Во-первых, кривая лежит значительно ниже, что указывает на меньший размер области перетяжки пламени. Во-вторых, при малых скоростях истечения струи этот размер почти в два раза меньше размера области перетяжки пламени для двух других ситуаций. Данное наблюдение, по-видимому, может быть связано с воздействием однозначной направленности вектора ускорения свободного падения (g) и вектора скорости истечения струи, что может приводить как к уменьшению размера области перетяжки пламени, так и к ее полному исчезновению в достаточно широком диапазоне расхода газа – до $Q \approx 190$ см³/с (см. рис. 12).

Анализ диффузионного горения водорода в круглой микроструе с ударным и параболическим профилем скорости на срезе микросопла в зависимости от его пространственной ориентации относительно направления вектора ускорения свободного падения (g)

На рис. 13 представлены кривые зависимости размера области перетяжки пламени от расхода газа (или скорости его истечения) при диффузионном горении микроструи водорода в ситуации его истечения из микросопла с ударным и параболическим профилями скорости на его срезе. Рассмотрены все три варианта пространственной

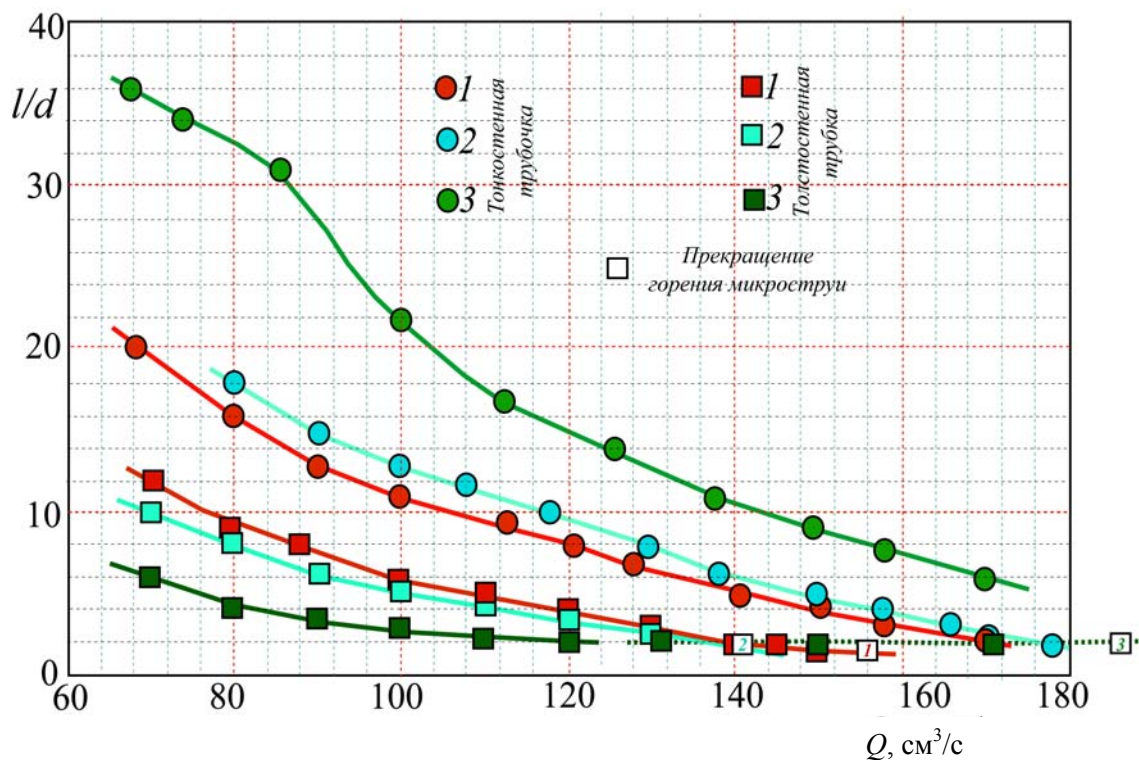


Рис. 13. Сравнение графиков зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа и направления вектора скорости истечения водорода относительно g (вектора ускорения свободного падения) для ситуаций параболического (тонкостенная трубочка [7]) и ударного (толстостенная трубка) профилей скорости на выходе микроструи из сопла: 1 – против g ; 2 – перпендикулярно g ; 3 – в направлении g

ориентации выходного отверстия микросопла относительно направления вектора ускорения свободного падения (g).

Из графиков видно, что в обеих ситуациях с ростом расхода газа размер область перетяжки пламени уменьшается. Однако в ситуации параболического профиля скорости на срезе сопла (тонкостенная трубочка [7]) размер области перетяжки пламени значительно больше, чем в ситуации ударного профиля скорости на срезе сопла (толстостенная трубка в настоящем эксперименте). Обнаружена принципиальная разница зависимостей l/d и $f(Q)$ для ситуации ударного и параболического профиля скорости, связанная с их инверсией. Если в первой ситуации размер области перетяжки пламени уменьшается в направлении вектора скорости истечения микроструи (против вектора g , перпендикулярно вектору g и совпадает с вектором g), то во второй ситуации все наоборот (совпадает с вектором g , перпендикулярно вектору g и против вектора g). Можно наблюдать и определенное совпадение зависимостей l/d и $f(Q)$ для

ситуаций ударного и параболического профиля скорости. Зависимости l/d и $f(Q)$ в ситуации направленности вектора скорости истечения микроструи против и перпендикулярно направлению вектора g достаточно близки друг к другу, т. е. практически совпадают. Однако в ситуации направленности вектора скорости истечения микроструи, совпадающей с направлением вектора g , зависимости l/d и $f(Q)$ резко отклоняются от двух предыдущих ситуаций, а особенно в ситуации параболического профиля скорости на срезе сопла. Можно высказать предположение, что все наблюдаемые особенности и различия при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от пространственной ориентации выходного отверстия микросопла связаны с различным профилем скорости на срезе сопла (ударным и параболическим). Кроме того, нельзя пренебрегать другой особенностью диффузионного горения круглой микроструи водорода, связанной с температурным фактором. Нагрев микросопла в ситуации присоединенного пламени,

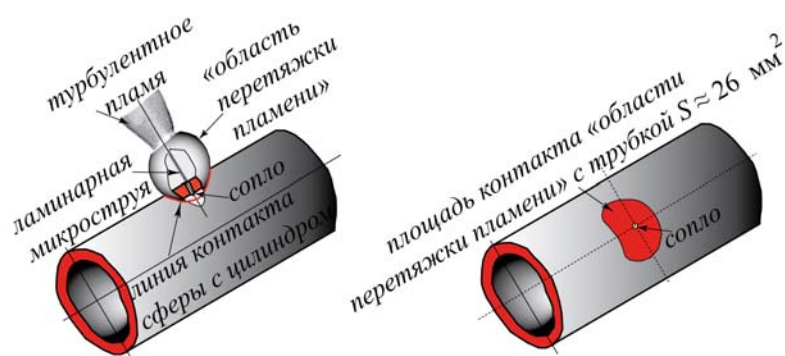


Рис. 14. Картина диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микро-сопла с ударным профилем скорости на его срезе (слева) и эскиз площади контакта ($S \approx 26 \text{ мм}^2$) области перетяжки пламени с толстостенной трубкой диаметром 10 мм (справа)



Рис. 15. Картина диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микро-сопла с параболическим профилем скорости на его срезе (слева) и эскиз площади контакта ($S \approx 8 \text{ мм}^2$) области перетяжки пламени с тонкостенной трубкой диаметром 0,6 мм (справа) [7]

когда область перетяжки пламени охватывает или «сидит» на нем, может оказывать существенное влияние как на структуру пламени, так и на сам процесс диффузионного горения микроструи водорода.

На рис. 14 представлена картина диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микро-сопла с ударным профилем скорости на его срезе и эскиз площади контакта ($S \approx 26 \text{ мм}^2$) области перетяжки пламени с толстостенной трубкой диаметром 10 мм. На рис. 15 представлена картина диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из микро-сопла с параболическим профилем скорости на его срезе и эскиз площади контакта ($S \approx 8 \text{ мм}^2$) области перетяжки пламени с тонкостенной трубкой диаметром 0,6 мм [7]. Видно, что площадь контакта области перетяжки пламени с соплом, т. е. возможности его нагрева, почти в три раза больше в ситуации ударного профиля скорости на его срезе. В данном случае очевидно, что мик-

росопло может нагреться быстрее и достичь более высокой температуры, чем в ситуации параболического профиля скорости на его срезе. Также необходимо учитывать и теплоемкость материала микросопел и связанную с этим возможность быстрого (или медленного) их охлаждения. Естественно, теплоемкость толстостенной трубки значительно выше, чем тонкостенной, тем более, что обе они металлические. Таким образом, наряду с влиянием профиля скорости на процесс диффузионного горения круглой микроструи водорода и структуры его пламени существенное влияние на эти процессы может оказывать и температурный фактор.

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 акусти-

ческом 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 микроструи 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. Структу-

ра присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из шелевого сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.

6. Agrawal A. K., Albers B. W., Alammar K. N. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas – jet diffusion flames // Combustion Science and Technology. 2005 Vol. 177. No. 2. P. 305–322.

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

8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.

Материал поступил в редколлегию 21.01.2017

G. R. Grek¹, M. V. Litvinenko^{1,2}, G. V. Kozlov¹, V. V. Vikhorev^{1,2}

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

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

grek@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru

FEATURES OF THE DIFFUSION COMBUSTION OF HYDROGEN MICROJET AT VARIOUS SPATIAL ORIENTATION OF THE NOZZLE EXIT WITH TOP – HAT MEAN VELOCITY PROFILE AT THE NOZZLE EXIT

The purpose of the given work will consist in the experimental studies of features diffusion combustion of a hydrogen round microjet, effusing from micronozzle with top – hat mean velocity profile at the nozzle exit, depending on spatial orientation of the nozzle exit. It is revealed, that 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 gas consumption (Q) (or jet velocity U) are rather close to each other. To these characteristics concern such as ranges of the «bottleneck flame area» presence, flame separation 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 separation occurs in absence of the «bottleneck flame area», there is no situation of the «bottleneck flame area» combustion at turbulent flame separation and there is no situation of the «bottleneck flame area» combustion at burn termination of the turbulent part of a microjet and finally ending of the microjet combustion occurs at the much greater jet velocity.

Keywords: hydrogen round microjet with top – hat mean velocity profile at the nozzle exit, diffusion combustion, «bottleneck flame area», schlieren method, shadow patterns.