

**В. В. Козлов^{1,2}, Г. Р. Грек¹, О. П. Коробейничев³
Ю. А. Литвиненко¹, А. Г. Шмаков³**

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 411, Новосибирск, 630090, Россия*

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

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

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

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА СРЕЗЕ МИКРОСОПЛА НА ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА *

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании влияния начальных условий на срезе микросопла на диффузионное горение водорода. Показано, что профиль скорости и наличие / отсутствие массива теплоемкого материала на срезе сопла существенно влияют на структуру пламени и сам процесс горения круглой микроструи водорода. Установлены диапазоны скоростей существования диффузионного горения круглой микроструи водорода, отрыва пламени и области «перетяжки» пламени для случая ударного профиля скорости на срезе сопла и двух случаев параболического профиля скорости с наличием и отсутствием массива теплоемкого материала на срезе сопла. Показаны зависимости размера области «перетяжки» пламени от скорости истечения микроструи для случая ударного профиля скорости на срезе сопла и двух случаев параболического профиля скорости с наличием и отсутствием массива теплоемкого материала на срезе сопла. Определены декременты уменьшения размера области «перетяжки» пламени с ростом скорости истечения микроструи для трех ситуаций изменений начальных условий на срезе сопла.

Ключевые слова: круглая микроструя водорода, диффузионное горение, область «перетяжки» пламени, профиль скорости, начальные условия.

Введение

Как известно [1–5], начальные условия, т. е. наличие ударного или параболического профиля скорости на срезе сопла, оказывают существенное влияние на структуру и характеристики развития как круглой, так и плоской макроструи. Наличие ударного профиля скорости на срезе сопла приводит

к так называемой неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, что связано с возникновением кольцевых вихрей и их взаимодействием с полосчатыми структурами. Данное взаимодействие возмущений приводит к деформации кольцевых вихрей с образованием азимутальных трехмерных вихревых структур типа Λ - и Ω -образных вихрей. Эволюция и разрушение данных вихревых структур да-

* Работа поддержана грантами РФФИ (№ 16-08-00425, 16-07-00946), грантом РНФ № 16-19-10330, Интеграционным грантом СО РАН № 24 и частично профинансирована грантом Президента РФ «Научные школы» (НШ-8788.2016.1).

лее вниз по потоку приводит к турбулизации течения, например, в круглой макроструе [1]. Следует заметить, что наличие ударного профиля скорости на срезе сопла связано с длиной канала сопла, а именно с коротким каналом сопла с удлинением $l/d \leq 10$. С ростом длины канала сопла профиль скорости на срезе сопла постепенно приобретает параболический характер ее распределения и при $l/d \geq 100$ профиль скорости становится полностью параболическим [1; 2]. Наличие параболического профиля скорости на срезе сопла кардинально меняет структуру и характеристики развития, например, круглой макроструи [1]. Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, непосредственно на выходе круглой макроструи из сопла исчезает, возникает область чисто ламинарного течения, без каких-либо кольцевых вихрей, протяженностью $l/d = 10$ [1]. Процесс турбулентного разрушения струи далее вниз по потоку связан с появлением характерного искажения поперечного сечения струи в виде характерных тангенциальных выбросов газа с периферии струи [3]. Показано, что в данной ситуации неустойчивость ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости может быть вызвана слабым поперечным потоком к струе [3].

С другой стороны, профиль скорости на срезе сопла, например, круглой микроструи, при диаметре выходного отверстия сопла $d \leq 1$ мм и удлинении канала сопла $l/d \geq 100$, т. е. при достаточно приемлемой длине сопла ($l \leq 100$ мм), практически всегда будет иметь параболический характер ее распределения. Все особенности структуры и характеристик развития круглой и плоской микроструй в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия представлены в работах [5–8].

Другой важный аспект исследований связан с процессом диффузионного горения круглой и плоской микроструи. Детальные картины структуры пламени и характеристик развития пламени при диффузионном горении пропана в круглой и плоской микроструе в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия представлены в работах [9–11]. Аналогичные результаты экспериментальных исследований диффузионного горения водорода в круглой и плоской мик-

роструе представлены в работах [12–14]. Однако сравнительного анализа результатов исследования диффузионного горения топлива в микроструе в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла не приведено. Причем под начальными условиями подразумеваются лишь профили скорости на срезе сопла, хотя могут быть и другие обстоятельства. Например, наличие на срезе сопла определенных особенностей – как конструктивных, так и других: скажем, различной скорости движения окружающего воздуха.

В связи с этим цель настоящих исследований состоит в экспериментальном изучении структуры и характеристик развития пламени при диффузионном горении водорода в круглой микроструе в зависимости от изменения начальных условий на срезе сопла и сравнении полученных результатов. Под начальными условиями следует понимать наличие как того или иного профиля скорости на срезе сопла, так и конструктивных особенностей на нем, а именно наличие или отсутствие окружающего выход сопла массива теплоемкого материала.

Ударный профиль скорости на срезе сопла микроструи

При истечении микроструи водорода из медной трубки диаметром 10 мм с толщиной стенки 0,8 мм через круглое отверстие диаметром 0,5 мм (рис. 1) на срезе выходного сопла формируется ударный профиль скорости с мощным градиентом скорости на периферии струи вблизи сопла и практически безградиентным течением в ядре струи (рис. 2).

Термоанемометрические измерения распределения средней (U) и пульсационной (u') составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла и скорости потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с показали наличие ударного профиля скорости при длине канала сопла $l/d \leq 1$ при $d = 1$ мм (см. рис. 2) [10]. В нашем случае $d = 0,5$ мм, однако, как мы полагаем, характеристики течения будут коррелировать с результатами их измерений, представленных в работе [10]. Как видно из графика, форма профиля скорости на срезе сопла ударная (U/U_0) с максимумом интенсивности пульсаций скорости ($u' \approx 0,4 \% U_0$) в областях максималь-

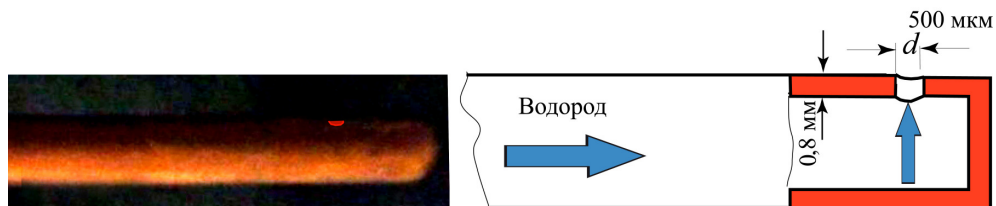


Рис. 1. Схема эксперимента

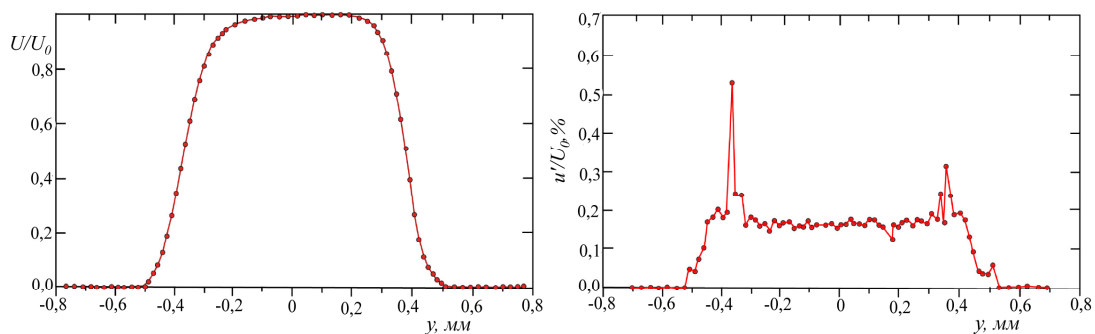


Рис. 2. Распределение средней U (слева) и пульсационной u' (справа) составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая короткого канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с, диаметр выходного отверстия на срезе круглого сопла $d = 1$ мм [10]

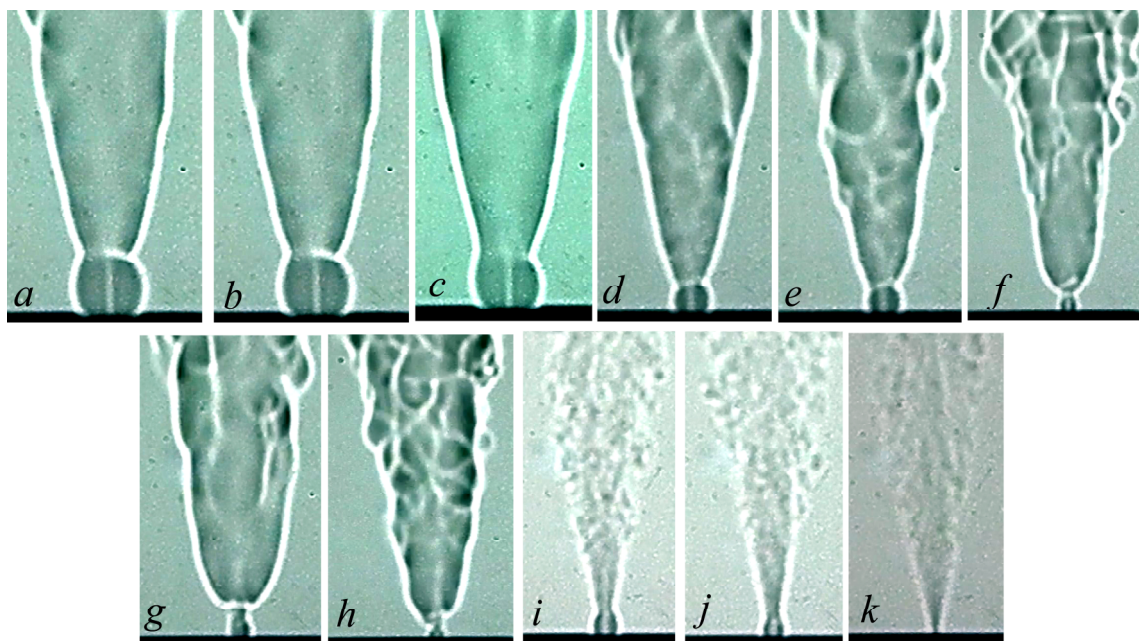


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (U_0 , м/с): $a - 357$; $b - 408$; $c - 459$; $d - 510$; $e - 561$; $f - 612$; $g - 663$; $h - 714$; $i - 750$; $j - 765$; $k - 765$, ударный профиль скорости на срезе сопла, присоединенное пламя

ного градиента скорости и минимумом интенсивности пульсаций скорости ($u' = 0,2\% U_0$) в области безградиентного ядра струи (см. рис. 2).

Теневые картины процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения из

сопла с ударным профилем скорости на его срезе показаны на рис. 3.

Видно, что в области «перетяжки» пламени наблюдается чисто ламинарная струя водорода, идет процесс горения смеси водород/воздух с ламинарным пламенем шарообразной формы. Детальное описание самого понятия области «перетяжки» пламени и характеристик ее развития представлено в работах [11; 14]. Преодолевая узкую область градиента плотности, ламинарная микроструя мгновенно становится турбулентной, и можно наблюдать процесс турбулентного смешения водорода и воздуха и турбулентного горения смеси, сопровождающееся турбулентным пламенем. С ростом скорости истечения микроструи размер области «перетяжки» пламени уменьшается и при $U_0 \approx 612$ м/с можно наблюдать отрыв турбулентного пламени при сохранении горения в области «перетяжки» пламени. При скорости истечения микроструи водорода $U_0 \approx 750$ м/с горение турбулентной струи прекращается, но горение в области «перетяжки» пламени сохраняется. Полное прекращение горения микроструи водорода можно наблюдать при скорости ее истечения $U_0 \approx 765$ м/с. При этом видно, что микроструя водорода, истекающая из сопла, имеет тур-

булентный характер течения непосредственно на выходе из сопла.

График изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии ударного профиля скорости на выходе струи из сопла представлен на рис. 4. Видно, что кривая зависимости имеет нелинейный характер, причем диапазон скорости, при котором микроструя водорода, истекающая из круглого сопла с ударным профилем скорости, на его срезе подвержена горению, достаточно узок ($U_0 \approx 357 \div 714$ м/с). Однако диапазон скорости, при котором сохраняется горение в области «перетяжки» пламени, несколько шире ($U_0 \approx 357 \div 765$ м/с). Более детальный анализ данных явлений и причин их появления будет представлен ниже.

Параболический профиль скорости на срезе сопла микроструи

Вариант А

(свободная трубочка без окружающего массива теплоемкого материала)

При истечении микроструи водорода из трубки длиной 60 мм диаметром выходного сопла 0,5 мм и толщиной стенки трубки

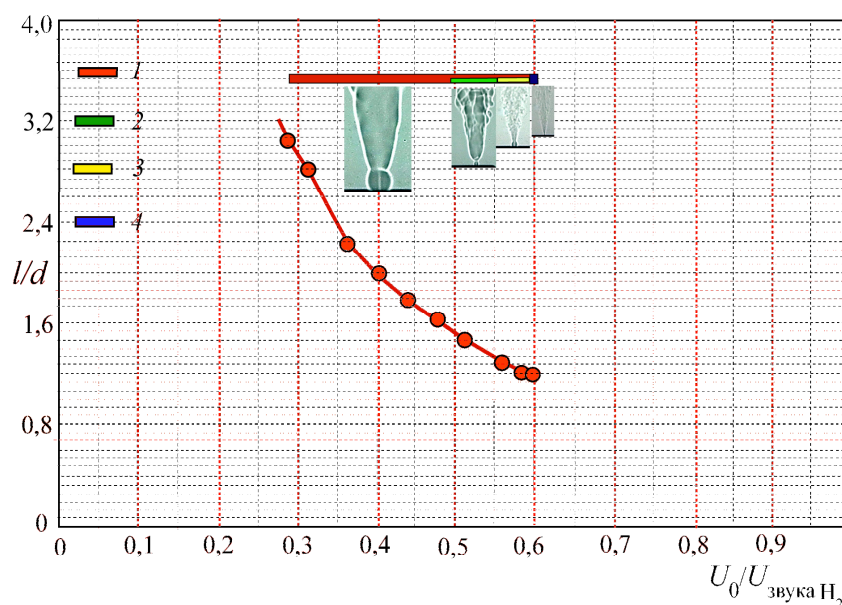


Рис. 4. График изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии ударного профиля скорости на выходе струи из сопла. Диапазоны скоростей истечения микроструи: 1 – наличие области «перетяжки» пламени, $U_{\text{струи}} \approx 357 \div 765$ м/с; 2 – отрыв пламени, $U_{\text{струи}} \approx 580 \div 730$ м/с; 3 – наличие горения в области «перетяжки» пламени и его отсутствие в турбулентной микроструе, $U_{\text{струи}} \approx 730 \div 760$ м/с; 4 – прекращение горения микроструи, $U = 765$ м/с

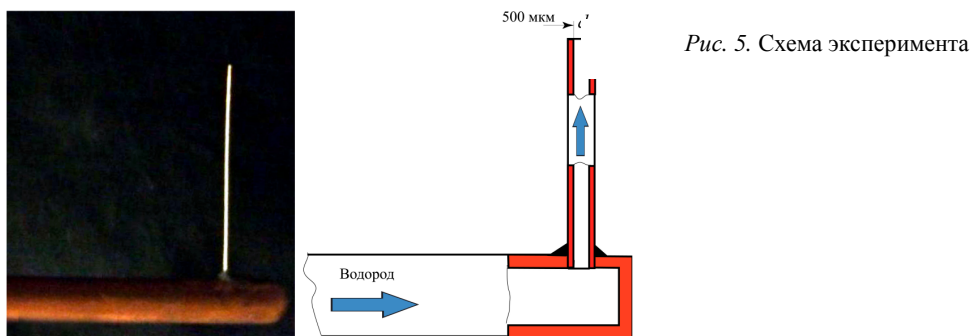


Рис. 5. Схема эксперимента

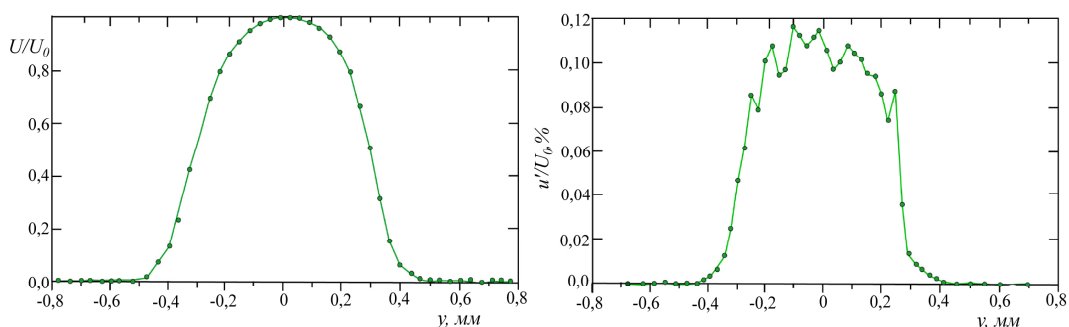


Рис. 6. Распределение средней U (слева) и пульсационной u' (справа) составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая длинного канала сопла ($l/d \approx 40$, где l – длина канала сопла, d – диаметр выходного отверстия сопла), скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с, диаметр выходного отверстия на срезе круглого сопла $d = 1$ мм [10]

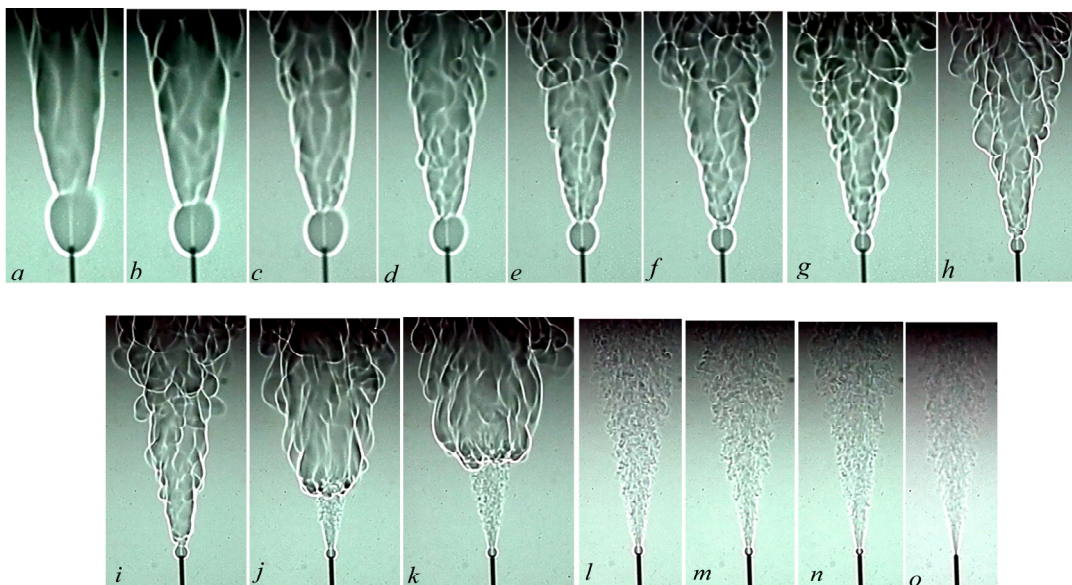


Рис. 7. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (U_0 , м/с): $a - 357$; $b - 408$; $c - 459$; $d - 510$; $e - 561$; $f - 612$; $g - 663$; $h - 714$; $i - 765$; $k - 867$; $l - 887$; $m - 918$; $n - 969$; $o - 1\ 020$, параболический профиль скорости на срезе сопла, присоединенное пламя

0,3 мм (рис. 5) на срезе выходного сопла формируется параболический профиль скорости ($l/d = 120$).

Термоанемометрические измерения распределения средней (U) и пульсационной (u') составляющих продольной компоненты

скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла и скорости потока на оси струи $U_0 = 4$ м/с показали наличие параболического профиля скорости по причине удлинения канала сопла ($l/d = 120$, где l – длина канала сопла, d – диаметр выходного отверстия сопла) при $d = 1$ мм (рис. 6) [10]. В нашем случае $d = 0,5$ мм, однако, как мы полагаем, характеристики течения будут коррелировать с результатами их измерений, представленных в работе [10].

Как видно из графика, форма профиля скорости на срезе сопла параболическая (U/U_0) с максимумом интенсивности пульсаций скорости ($u' \approx 0,1 \% U_0$) на оси струи для случая удлиненного канала сопла (см. рис. 6). Данные результаты измерений коррелируют с данными измерений профилей средней и пульсационной составляющих скорости для круглых микроструй [1–3].

Теневые картины процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода с параболическим профилем скорости на срезе сопла в зависимости от скорости ее истечения показаны на рис. 7.

Видно, что в области «перетяжки» пламени наблюдается чисто ламинарная струя водорода, идет процесс горения смеси водород/воздух с ламинарным пламенем шарооб-

разной формы. Преодолевая узкую область градиента плотности, ламинарная микроструя мгновенно становится турбулентной, и можно наблюдать процесс турбулентного смешения водорода и воздуха и турбулентного горения смеси с турбулентным пламенем. С ростом скорости истечения микроструи размер области «перетяжки» пламени уменьшается, и при $U_0 \approx 765$ м/с можно наблюдать отрыв турбулентного пламени при сохранении горения в области «перетяжки». При скорости истечения микроструи водорода $U_0 \approx 887$ м/с горение турбулентной струи прекращается, но горение в области «перетяжки» пламени сохраняется. Полное прекращение горения микроструи водорода можно наблюдать при скорости истечения микроструи водорода $U_0 \approx 1\,020$ м/с. При этом видно, что истекающая из сопла микроструя водорода имеет турбулентный характер течения непосредственно на выходе из сопла.

График зависимости изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии параболического профиля скорости на выходе струи из сопла представлен на рис. 8. Видно, что кривая зависимости имеет нелинейный характер, причем диапазон скорости, при котором микроструя водорода,

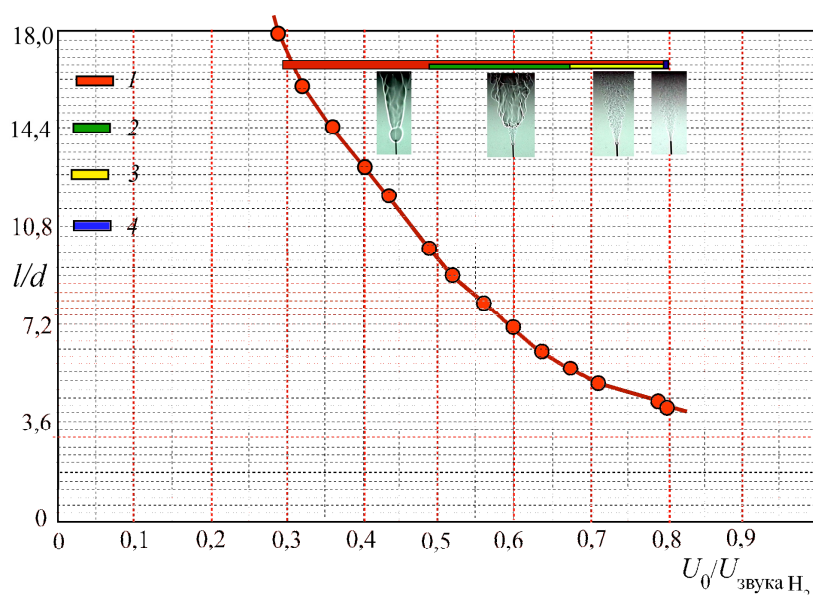


Рис. 8. График изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии параболического профиля скорости на выходе струи из сопла. Диапазоны скоростей истечения микроструи: 1 – наличие области «перетяжки» пламени, $U_{\text{струи}} \approx 357\text{--}1\,000$ м/с; 2 – отрыв пламени, $U_{\text{струи}} \approx 700\text{--}870$ м/с; 3 – наличие горения в области «перетяжки» пламени и его отсутствие в турбулентной микроструе, $U_{\text{струи}} \approx 870\text{--}970$ м/с; 4 – прекращение горения микроструи, $U = 1\,020$ м/с

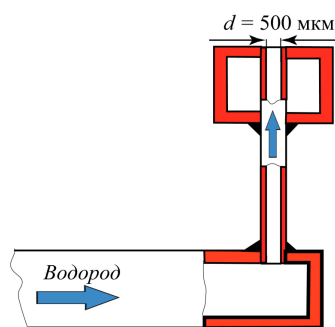
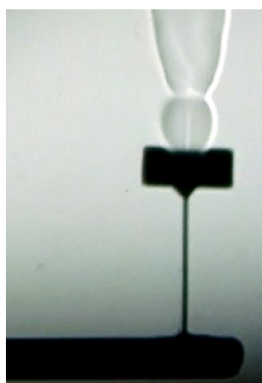


Рис. 9. Схема эксперимента

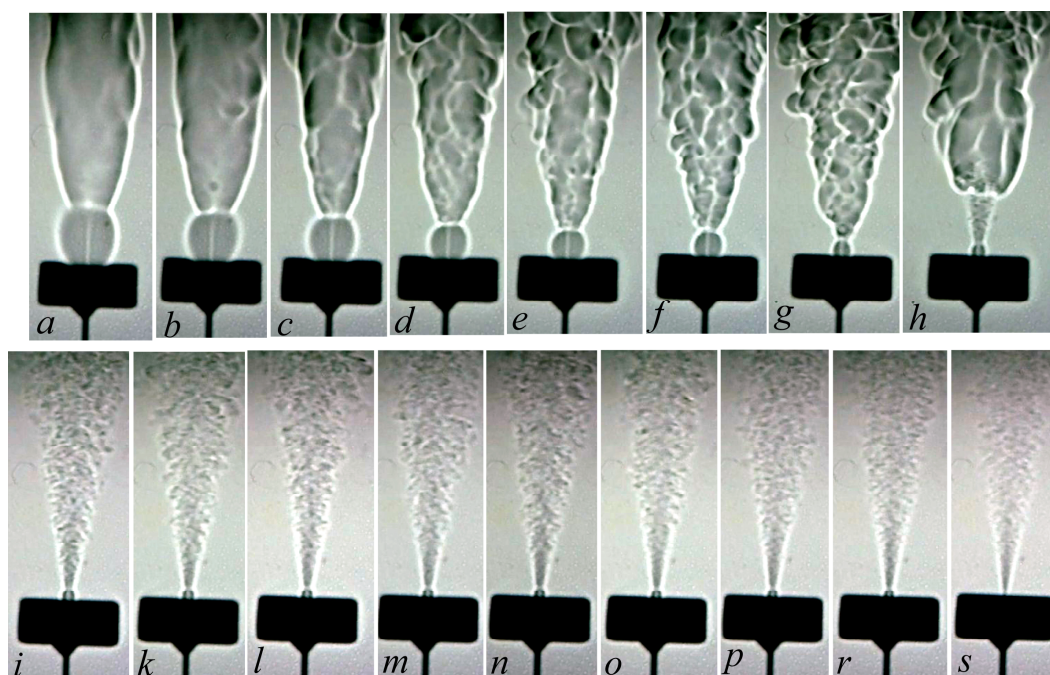


Рис. 10. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (U_0 , м/с): $a - 357$; $b - 408$; $c - 459$; $d - 510$; $e - 561$; $f - 612$; $g - 714$; $h - 765$; $i - 867$; $k - 918$; $l - 969$; $m - 1\ 020$; $n - 1\ 071$; $o - 1\ 122$; $p - 1\ 173$; $r - 1\ 224$; $s - 1\ 253$, параболический профиль скорости на срезе сопла, присоединенное пламя

истекающая из круглого сопла с параболическим профилем скорости на его срезе, подвержена горению, значительно шире, чем в предыдущем случае ($U_0 \approx 357 \div 867$ м/с). Диапазон скорости, при котором сохраняется горение в области «перетяжки» пламени, еще более широкий ($U_0 \approx 357 \div 969$ м/с). Детальный анализ данных явлений и причин их появления будет представлен ниже.

Вариант В

(трубочка, окруженная массивом теплоемкого материала)

При истечении микроструи водорода из трубки длиной 60 мм с диаметром выходно-

го сопла 0,5 мм, выход которой обрамлен участком медной трубки диаметром 10 мм, как и в ситуации с ударным профилем скорости на срезе сопла, описанной выше. Однако в данном случае на выходе микроструи из сопла формируется параболический профиль скорости по причине большой длины канала сопла ($l/d = 120$) (см. рис. 9).

Теневые картины процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода с параболическим профилем скорости, но при наличии массива теплоемкого материала, на срезе сопла в зависимости от скорости ее истечения показаны на рис. 10.

Видно, что в области «перетяжки» пламени наблюдается чисто ламинарная струя

водорода, идет процесс горения смеси водород/воздух с ламинарным пламенем шарообразной формы. Преодолевая узкую область градиента плотности, ламинарная микроструя мгновенно становится турбулентной, и можно наблюдать процесс турбулентного смешения водорода и воздуха и турбулентного горения смеси, сопровождающегося турбулентным пламенем. С ростом скорости истечения микроструи размер области «перетяжки» пламени уменьшается, и при $U_0 \approx 714$ м/с можно наблюдать отрыв турбулентного пламени при сохранении горения в области «перетяжки». При скорости истечения микроструи водорода $U_0 \approx 867$ м/с горение турбулентной струи прекращается, но горение в области «перетяжки» пламени сохраняется. Полное прекращение горения микроструи водорода можно наблюдать при скорости истечения микроструи водорода $U_0 \approx 1253$ м/с. При этом видно, что истекающая из сопла микроструя водорода имеет турбулентный характер течения непосредственно на выходе из сопла.

График изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии

параболического профиля скорости на выходе струи из сопла представлен на рис. 11.

Видно, что кривая зависимости имеет нелинейный характер, причем диапазон скорости, при котором микроструя водорода, истекающая из круглого сопла с параболическим профилем скорости на его срезе, подвержена горению, несколько шире, чем в первом случае, но уже, чем в предыдущем случае ($U_0 \approx 357 \div 765$ м/с). Однако диапазон скорости, при котором сохраняется горение в области «перетяжки» пламени, значительно шире, чем в двух предыдущих случаях ($U_0 \approx 357 \div 1224$ м/с). Более детальный анализ данных явлений и причин их появления будет представлен ниже.

Анализ и обсуждение результатов исследований

На рис. 12 представлено сравнение графиков зависимости размера области «перетяжки» пламени (l/d) при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (U/U_0) и изменения начальных условий на срезе сопла: параболического (1, 2) или ударного (3)

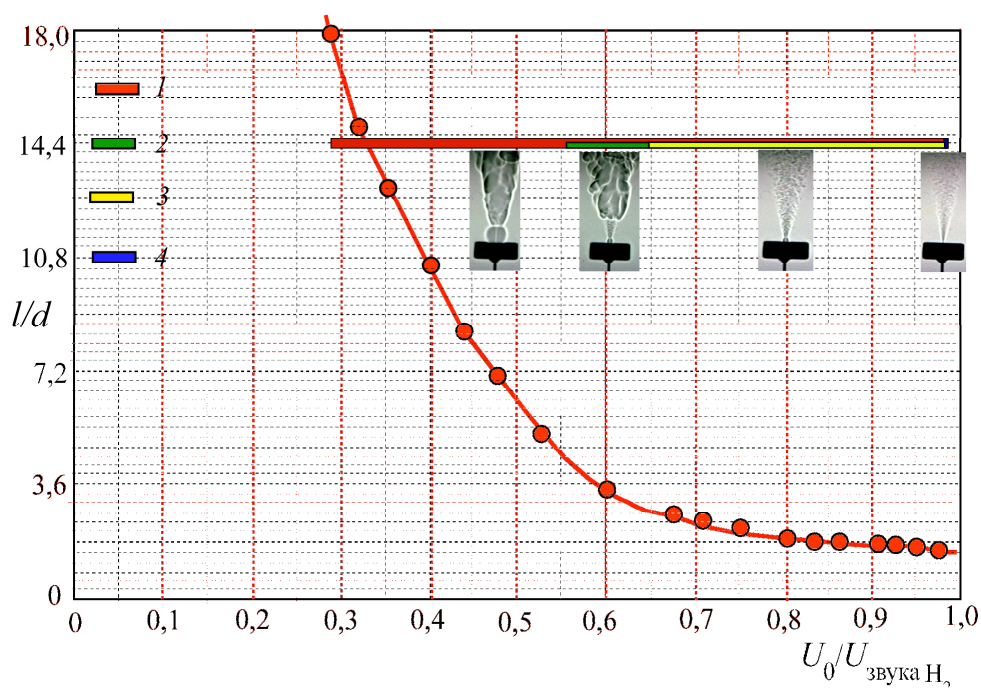


Рис. 11. График изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения микроструи (U/U_0) при наличии параболического профиля скорости на выходе струи из сопла. Диапазоны скоростей истечения микроструи: 1 – наличие области «перетяжки» пламени, $U_{\text{струи}} \approx 357 \div 1224$ м/с; 2 – отрыв пламени, $U_{\text{струи}} \approx 714 \div 800$ м/с; 3 – наличие горения в области «перетяжки» пламени и его отсутствие в турбулентной микроструе, $U_{\text{струи}} \approx 800 \div 1224$ м/с; 4 – прекращение горения микроструи, $U = 1253$ м/с

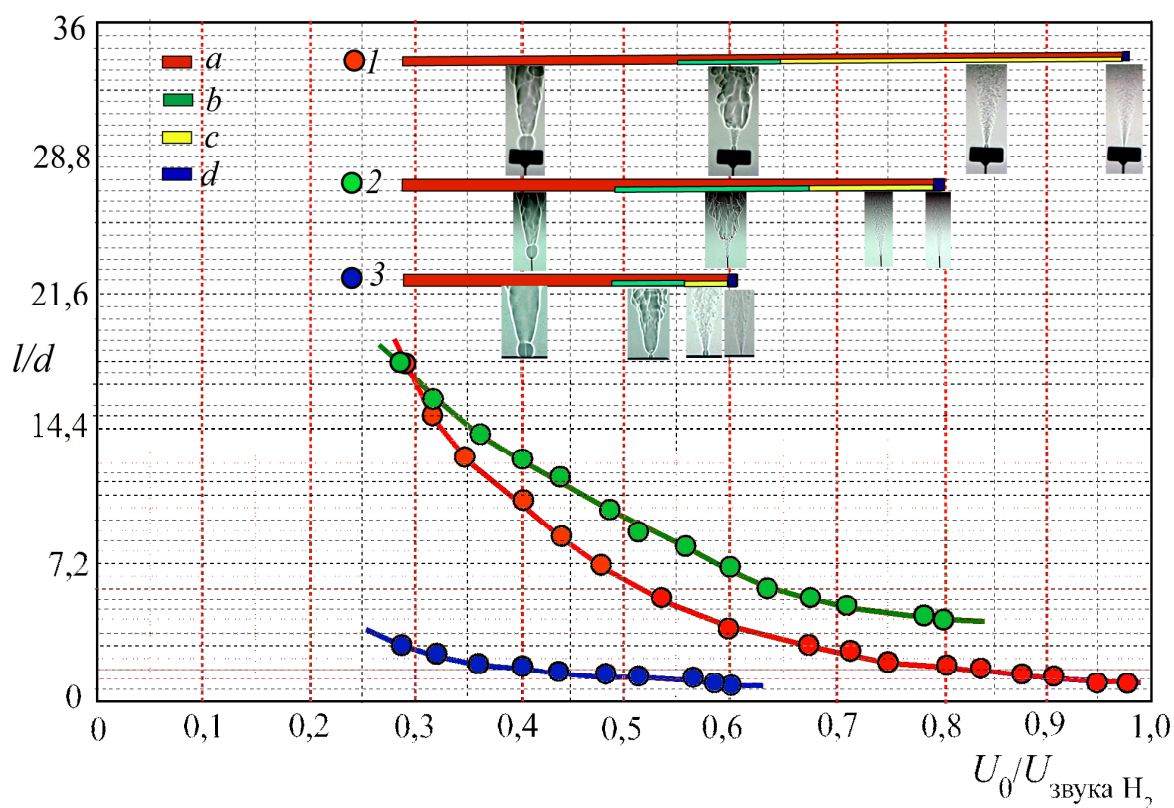


Рис. 12. Сравнение графиков изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (U/U_0), изменения начальных условий на срезе сопла: параболического (1, 2) или ударного (3) профиля скорости, а также конструктивных особенностей самого соплового аппарата. Диапазоны скоростей истечения микроструи: a – наличие области «перетяжки» пламени; b – отрыв пламени; c – наличие горения в области «перетяжки» пламени и его отсутствие в турбулентной микроструе; d – прекращение горения микроструи

профиля скорости, а также конструктивных особенностей самого соплового аппарата: наличия на срезе сопла массива теплоемкого материала (1, 3) и его отсутствия (2). Видно, что в случае ударного профиля скорости на срезе сопла и наличия массива теплоемкого материала (3), диапазон изменения скорости существования области «перетяжки» пламени в процессе горения как всей микроструи (a), так и только в области «перетяжки» (c), наименьший по сравнению с двумя другими случаями (1, 2).

В ситуациях параболического профиля скорости на срезе сопла (1, 2) диапазон изменения скорости существования области «перетяжки» пламени в процессе горения как всей микроструи (a), так и только в области «перетяжки» пламени (c) наибольший в случае наличия массива теплоемкого материала на срезе сопла (1). Вероятно, связано это прежде всего с особенностью профи-

ля скорости и, главным образом, с наличием массива теплоемкого материала на срезе сопла. В процессе горения микроструи водорода массив теплоемкого материала (отрезок медной трубки) сильно нагревается, а затем, при отсутствии горения турбулентной области микроструи ($1c$), медленно остывает, поддерживая горение в области «перетяжки» пламени в широком диапазоне изменения скорости истечения микроструи ($1c$). Возникает вопрос: почему этого не наблюдается в ситуации горения микроструи, истекающей из сопла с ударным профилем скорости на срезе сопла и таким же наличием массива теплоемкого материала (3с)? Можно лишь предположить, что это связано, прежде всего, с особенностью профиля скорости, однако это предположение требует дополнительных исследований, особенно изучения температурных условий. С другой стороны, в ситуации наличия параболиче-

ского профиля скорости на срезе сопла и отсутствия массива теплоемкого материала (2) диапазон изменения скорости существования области «перетяжки» пламени в процессе горения как всей микроструи (а), так и только в области «перетяжки» пламени (с) значительно уже, чем в ситуации (1) из-за низкой теплоемкости тонкостенной (толщина стенки 0,3 мм) трубочки соплового аппарата. Также следует обратить внимание на скорость движения окружающего воздуха вблизи границ пламени и в области ламинарного пламени, и в области с высокой турбулентностью.

Следует отметить еще одну особенность, наблюдаемую в ситуации (1с). Горение в области «перетяжки» пламени представляет собой своеобразный «реактор», процесс горения в котором является источником возгорания турбулентной области струи при малейшем ее возмущении (акустическом, механическом либо ином). Рассмотрим ситуацию горения микроструи водорода с параболическим профилем скорости на срезе сопла и отсутствием массива теплоемкого материала (2). Видно, что в данном случае можно наблюдать наибольший диапазон изменения скорости истечения микроструи в ситуации отрыва турбулентного пламени от среза сопла (2b) по сравнению с двумя другими случаями (1b, 3b). По-видимому, здесь основную роль играет наличие параболического профиля скорости на срезе сопла и отсутствие массива теплоемкого материала (2b), так как в двух других ситуациях (1b, 3b), где этот диапазон практически одинаков, основную роль играет наличие массива теплоемкого материала, а не особенность профиля скорости на срезе сопла.

Можно отметить другую особенность горения микроструи водорода в данных обстоятельствах. Если размер области «перетяжки» пламени ($l/d = 18$) в ситуациях (1, 2) практически одинаков, то в ситуации (3) он в шесть раз меньше ($l/d = 3$). По-видимому, это связано с особенностью профиля скорости на срезе сопла (ударного или параболического). С ростом скорости истечения микроструи размер области «перетяжки» пламени (l/d) уменьшается. Кривые декремента уменьшения размера области «перетяжки» (l/d) демонстрируют наименьший декремент ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,106$, $\alpha = 6^\circ$) в случае (3), ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,74$, $\alpha \approx 36^\circ$) в случае (2) и ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,85$, $\alpha \approx 40^\circ$) в случае (1).

Таким образом, наименьший декремент уменьшения размера области «перетяжки» пламени (l/d) с ростом скорости истечения струи оказался в случае ударного профиля скорости на срезе сопла и при наличии массива теплоемкого материала (3).

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований по влиянию начальных условий на срезе круглого микросопла на диффузионное горение водорода можно сделать следующие выводы.

- Профиль скорости и наличие / отсутствие массива теплоемкого материала на срезе сопла оказывают существенное влияние на структуру пламени и сам процесс горения микроструи водорода.

- Наличие ударного профиля скорости на срезе сопла приводит к сужению диапазона скоростей существования диффузионного горения круглой микроструи водорода, отрыва пламени и области «перетяжки» пламени по сравнению с ситуациями параболического профиля скорости на срезе сопла.

- Диапазон скоростей существования диффузионного горения круглой микроструи водорода и области «перетяжки» пламени при горении круглой микроструи водорода с параболическим профилем скорости и массивом теплоемкого материала на срезе сопла (1) максимальный по сравнению с ситуациями (2, 3) по причине наличия как параболического профиля скорости и малой теплоемкости выходного сопла (2), так и ударного профиля скорости и большой теплоемкости окружающего выход сопла материала (3).

- В ситуации (1) область «перетяжки» пламени, при отсутствии горения турбулентной области микроструи, существует в наиболее широком диапазоне скоростей истечения микроструи и является своеобразным реактором, способным воспламенить турбулентную область микроструи при малейшем ее возмущении.

- Размер ($l/d = 3$) области «перетяжки» пламени в ситуации ударного профиля скорости на срезе сопла в шесть раз меньше, чем в ситуациях параболического профиля скорости на срезе сопла ($l/d = 18$).

- С ростом скорости истечения микроструи размер области «перетяжки» пламени

(l/d) уменьшается для всех трех исследованных ситуаций.

• Обнаружено, что декременты уменьшения размера области «перетяжки» пламени (l/d) демонстрируют наименьший декремент ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,106$, $\alpha = 6^\circ$) в случае ударного профиля скорости на срезе сопла (3) и значительно более сильные декременты ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,74$, $\alpha \approx 36^\circ$) и ($\text{tg}(l/d/\Delta U) = 0,85$, $\alpha \approx 40^\circ$) в случаях параболического профиля скорости на срезе сопла (2, 1) соответственно.

Список литературы

1. Козлов Г. 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.
2. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 25–37.
3. Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // Вестн. Новосибир. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 1. С. 14–24.
4. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Физические аспекты развития дозвуковых струйных течений // Успехи механики сплошных сред: Сб. науч. тр. к 70-летию академика В. А. Левина. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 331–351.
5. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В. Дозвуковая круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // ДАН. 2011. Т. 436, № 1. С. 1–7.
6. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Kozlov G. V., Litvinenko M. V. Round and plane jets in a transverse acoustic field // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20. No. 3. P. 272–289.
7. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие / Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 208 с. + доп. материал в электронном виде, включающем презентации и видеоролики на CD-диске. ISBN 978-5-4437-0062-5.
8. Kozlov V. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Litvinenko Yu. A. Stability of the Subsonic Jet Flows // JFCMV. 2013. Vol. 3. Iss. 1. P. 94–101.
9. Kozlov V. V., Grek G. R., Katasonov M. M., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Stability of Subsonic Microjet Flows and Combustion // JFCMV. 2013. Vol. 3. Iss. 1. P. 108–111.
10. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 98–119.
11. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев 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.
12. Козлов В. В., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Коробейничев 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.
13. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A. Visualization of Conventional and Combusting Subsonic Jet Instabilities. Dordrecht: Springerbook, 2015. 127 с. + доп. материал в электронном виде, включающем презентации и видеоролики. ISBN 978-3-319-26957-3, Book DOI 10.1007/978-3-319-26958-0.
14. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев 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.

V. V. Kozlov^{1,2}, G. R. Grek¹, O. P. Korobeinichev³
Yu. A. Litvinenko¹, A. G. Shmakov³

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

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

³ Institute of Chemical Kinetics and Combustion, 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

INFLUENCE OF INITIAL CONDITIONS AT THE MICRO NOZZLE EXIT ON HYDROGEN DIFFUSION COMBUSTION

The purpose of the given work will consist in an experimental study of influence of initial conditions at the micro nozzle exit on hydrogen diffusion combustion. It is shown, that the mean velocity profile and presence/absence of a heatcapacious material at the nozzle exit play an essential role on a flame structure and process of a round hydrogen microjet combustion. Velocity ranges of existence of a round hydrogen microjet diffusion combustion, flame separation and «bottleneck flame» region for a case of a top – hat mean velocity profile at the nozzle and two cases of a parabolic mean velocity profile with presence/absence of a heatcapacious material at the nozzle exit are found. Dependences of the «bottleneck flame» region size from a hydrogen microjet efflux velocity for case of a top – hat mean velocity profile at the nozzle and two cases of a parabolic mean velocity profile with presence/absence of a heatcapacious material at the nozzle exit are shown. Decrements of reduction of the «bottleneck flame» region size with growth of the hydrogen microjet efflux velocity for three situations of changes of initial conditions at the nozzle exit are determined.

Keywords: round hydrogen microjet, diffusion combustion, «bottleneck flame» region, mean velocity profile, initial conditions.