

В. В. Вихорев^{1,2}, **Г. Р. Грек**¹, **В. В. Козлов**^{1,2}, **Ю. А. Литвиненко**¹
М. В. Литвиненко^{1,2}, **А. Г. Шмаков**^{2,3}

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*

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

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

ГОРЕНИЕ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ СМЕСИ ВОДОРОДА С КИСЛОРОДОМ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО МИКРОСОПЛА *

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей горения круглой микроструи смеси водорода с кислородом при наличии криволинейного канала с вихрями Дина. Рассмотрена ситуация истечения и горения микроструи смеси водород / кислород из криволинейного микросопла с ударным профилем скорости на его срезе. Показано, что добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Обнаружено наличие сферической «области перетяжки пламени», деформируемой от воздействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца и уменьшающей свой размер с ростом скорости истечения микроструи. Показано, что область турбулентного пламени также подвержена искажению от воздействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца. Установлено, что диапазон горения круглой микроструи как чистого водорода, так и его смеси с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла, значительно шире диапазона горения круглой микроструи как чистого водорода, так и его смеси с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла.

Ключевые слова: круглая микроструя, горение смеси водород / кислород, «область перетяжки пламени», теневой метод исследования, теневые картины горения, криволинейное микросопло.

Введение

В работе [1] установлено, что наличие вихрей Дина видоизменяет начальный профиль скорости. Это приводит к возникновению первичной неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, характерной для ударного про-

филя скорости. Отмечено, что взаимодействие вихрей Дина с вихревой дорожкой Кельвина – Гельмгольца приводит к сложному вихреобразованию (омегаобразный вихрь). Процессы перемешивания при наличии криволинейного насадка изменяются, поэтому изучение диффузионного горения

* Работа профинансирована грантом РФФИ № 16-19-10330.

при использовании криволинейного канала является важной задачей. Замена горючего газа на другой существенно изменяет процесс диффузионного горения. Прежде чем исследовать диффузионное горение в криволинейном канале, необходимо было рассмотреть тот же процесс в случае прямого круглого сопла. В работах [2–6] представлены результаты экспериментальных исследований режимов горения и структуры диффузионного пламени водорода, образующегося при истечении его с высокой скоростью в воздух через круглые отверстия различных диаметров. Этот анализ позволил перейти к сравнению диффузионного горения водорода с использованием криволинейного насадка и без него [7].

Обнаружено наличие «области перетяжки пламени», как и в ситуациях горения микроструй водорода, истекающих из прямолинейных круглых и плоских микросопел.

Показано, что взаимодействие кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина приводит как к искажению самой области перетяжки пламени, так и к искривлению фронта градиента плотности между ламинарным горением водорода в области перетяжки пламени и его турбулентным горением.

Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать искажение области турбулентного пламени еще при наличии области перетяжки пламени. Показано, что позиция этого искажения находится в районе максимальной скорости в профиле скорости на срезе сопла, и данное искажение явно связано с воздействием вихрей Дина и кольцевых вихрей.

Все это может быть использовано в системах, связанных с эффективным перемешиванием топлива с окислителем, например в реактивных двигателях. Поэтому использование различных добавок в поток водорода и рассмотрение их влияния на режимы горения являются очень важными вопросами при изучении кинетических процессов.

В работе [8] представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного горения смесей водорода с метаном, а также с гелием или азотом в круглой микроструе. Показано, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с одним из газов – метаном, гелием или

азотом, связаны с образованием области перетяжки пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Обнаружено повышение устойчивости горения микроструи смеси водород/метан по сравнению с неустойчивым горением микроструи чистого метана, что говорит о возможности за счет добавок водорода расширить диапазон условий (скоростей потока газов) устойчивого турбулентного горения метана и других углеводородов. Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований особенностей горения микроструи смеси водорода с кислородом в зависимости от скорости истечения микроструи и долевого соотношения водород/кислород в смеси. Рассмотрено криволинейное микросопло с диаметром выходного отверстия ($d = 0,5$ мм).

Методика проведения экспериментов

Для изучения процесса горения смеси газов в круглой микроструе использовался метод видеозаписи на цифровую видеокамеру. Процесс горения фиксировался в виде его теневой картины с использованием методики Тёплера (шлирен-метод). На рис. 1 показана схема эксперимента.

Объемный расход Q (см³/с) каждого из газов (водород, кислород) устанавливался с помощью регуляторов объемного расхода газов (MKS Instruments, Inc., USA) с точностью $\pm 0,1$ см³/с. Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U_0 = Q/S$, где Q – суммарный объемный расход смеси газов, S – площадь поперечного сечения отверстия выхода микросопла. Для каждой скорости истечения микроструи исследовались характеристики ее развития в зависимости от изменения процентного соотношения долей водорода и кислорода в смеси. При этом сумма долей водорода и кислорода в смеси принималась за 100 %. На графиках, представленных ниже, доля кислорода в смеси газов водород/кислород показана в процентах (O_2 , %).

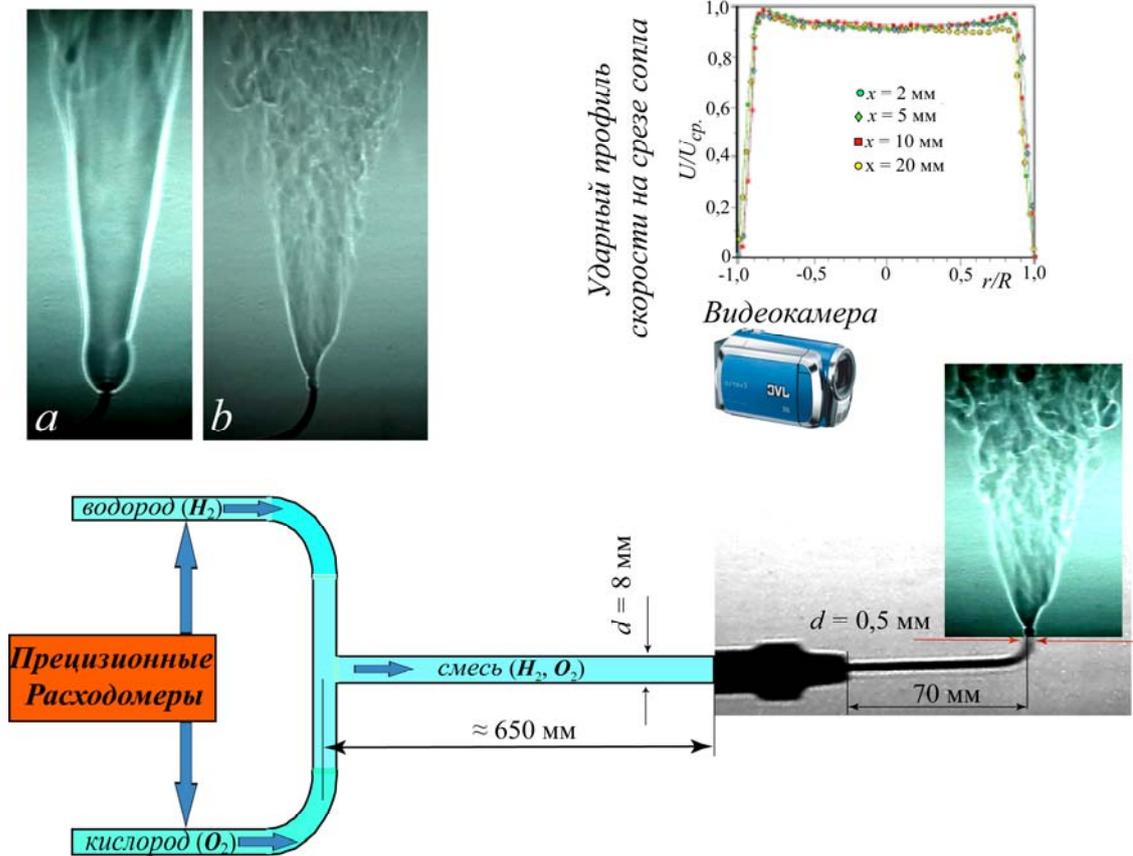


Рис. 1. Схема эксперимента и теневые картины пламени при горении чистого водорода (a) и его смеси с кислородом (b) в круглой микроструе, истекающей из криволинейного микросопла, с вихрями Дина

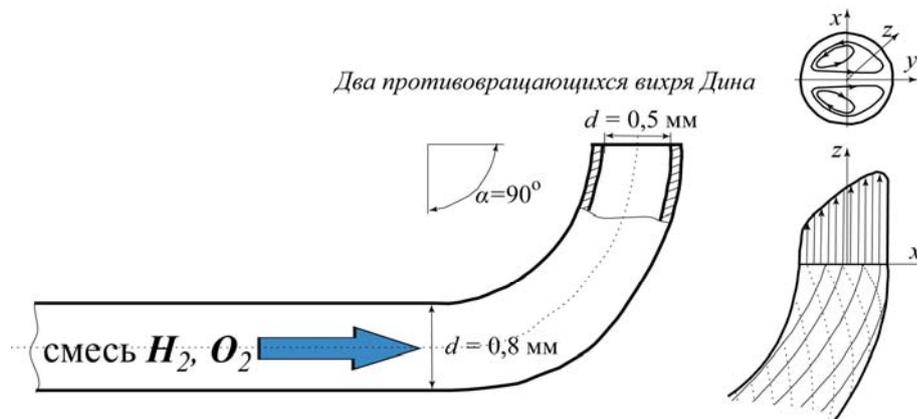


Рис. 2. Схема соплового аппарата для реализации горения микроструи водорода и его смеси с кислородом на выходе криволинейного канала с вихрями Дина [7]

Профиль скорости на срезе сопла имел ударную форму из-за короткого сопла и был измерен с помощью термоанемометра (рис. 2, см. также работы [9; 10]). На рис. 2 показаны чертеж криволинейного канала и схема образования вихрей Дина на выходе из криволинейного канала при исследовании диф-

фузионного горения микроструи ($d = 0,5 \text{ мм}$) чистого водорода и его смеси с кислородом. Как было отмечено ранее, на структуру и характеристики развития пламени при горении микроструи могут оказывать влияние два противовращающихся вихря Дина, кольцевые вихри Кельвина – Гельмгольца и

особенности горения смеси водорода с кислородом. Используя методику теневой съемки (метод Тёплера) и записывая процесс развития пламени при различной скорости истечения струи на цифровую видеокамеру, мы получили набор теневых картин.

Результаты экспериментальных исследований

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 510$ м/с

На рис. 3 показаны теневые картины диффузионного горения круглой микроструи с вихрями Дина смеси водород / кислород (H_2/O_2) в процентном соотношении ($a-e$) при скорости истечения микроструи $U_0 = 510$ м/с. При данной скорости истечения микроструи можно наблюдать чисто ламинарный характер развития как микроструи, так и пламени. С ростом доли кислорода в смеси длина и ширина ламинарной области пламени уменьшаются до момента возникновения турбулентного горения микроструи

с наличием турбулентного пламени (рис. 3, d, e). В данной ситуации ламинарная область пламени приобретает характерную цилиндрическую форму. Следует отметить, что температура горения смеси при доле кислорода в смеси $O_2 = 50\%$ достигает величины более $1000^\circ C$ (см. рис. 3, f).

Горение микроструи чистого водорода и смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 842, 893$ и 995 м/с

На рис. 4 показаны теневые картины диффузионного горения круглой микроструи чистого водорода (a) и его смеси с кислородом (O_2) при нарастании доли кислорода в ней ($b-g$) для различных скоростей истечения микроструи.

Видно, что с ростом скорости истечения микроструи (более 700 м/с) реализуется классический сценарий горения с наличием сферической области перетяжки пламени, уменьшением ее размера и спецификой турбулентного горения в области турбулентного пламени. Эта специфика связана с тем,

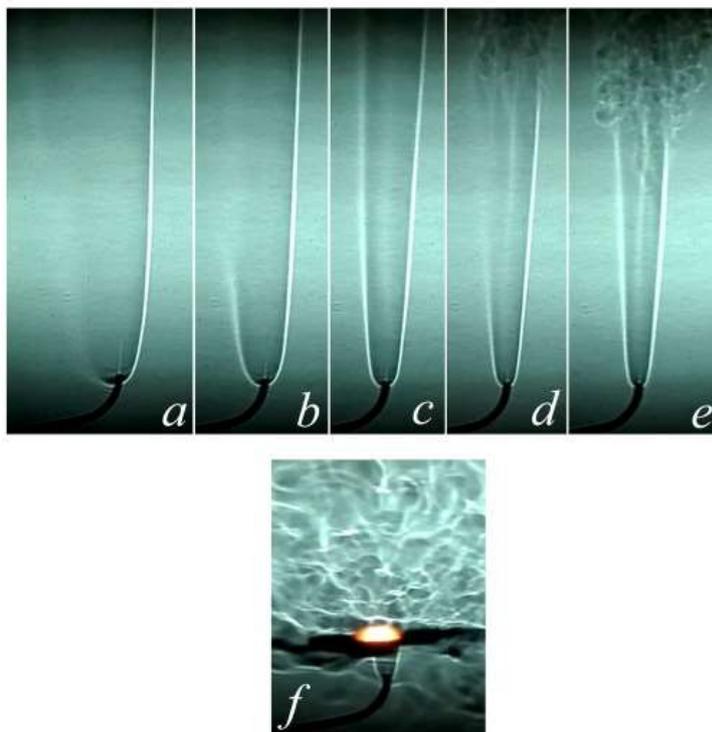


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из круглого микросопла диаметром $0,5$ мм, при наличии вихрей Дина ($U_0 = 510$ м/с). Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: $a - 10$; $b - 20$; $c - 30$; $d - 40$; $e - 50$, $f - 50$ (нагрев линейки из нержавеющей стали)

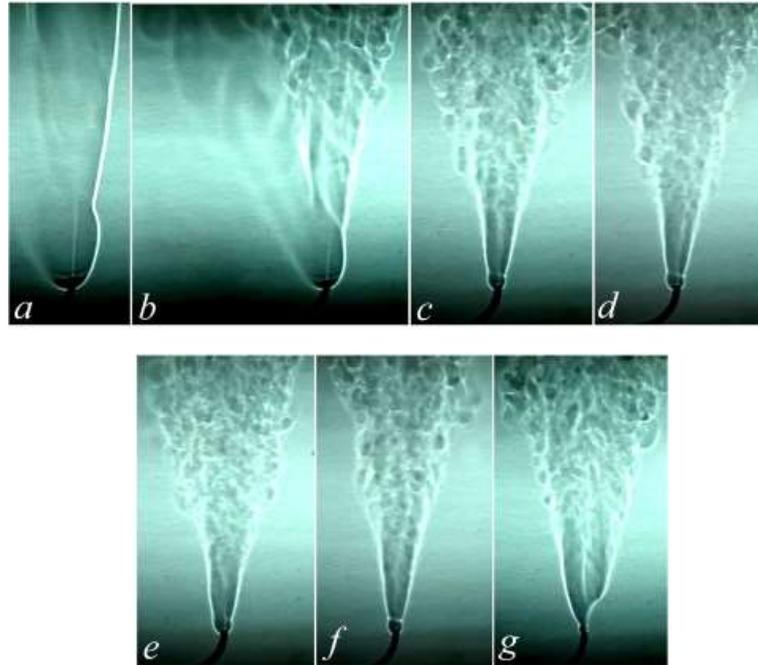


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения микроструи чистого водорода (a) и его смеси с кислородом (b–g) при различной скорости ее истечения (U_0 , м/с): a – 765; b–e – 842; f – 893; g – 995. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: a – 0; b – 9; c – 12; d – 15; e – 18; f – 9; g – 8 (срыв пламени)

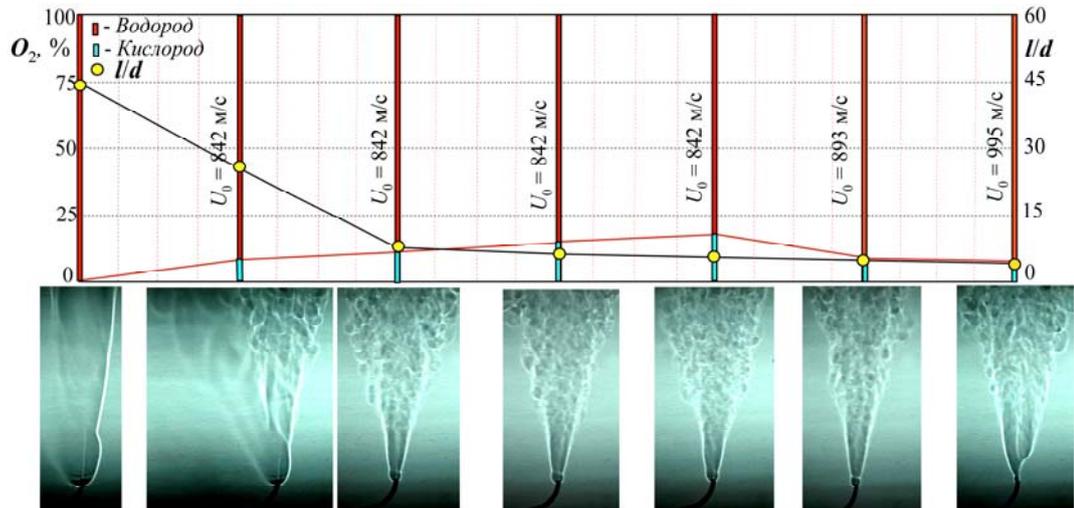


Рис. 5. График зависимости изменения размера (l/d) области перетяжки пламени от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи ($U_0 = 842, 893$ и 995 м/с) и теневые картины процесса горения

что процесс турбулизации пламени носит не взрывной характер, как в случае горения чистого водорода при преодолении микроструей градиента плотности газа, а постепенный, переходный характер с наличием протяженной области ламинарно-турбулентного перехода в ситуации горения смеси газов (см. рис. 4, c–g).

На рис. 5 показан график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d) от

роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси.

Можно наблюдать (см. рис. 5) сначала резкое уменьшение размера области перетяжки пламени с ростом доли кислорода в смеси даже при одной скорости истечения микроструи. Однако далее, с ростом доли кислорода в смеси, размер (l/d) области перетяжки пламени уменьшается очень слабо и даже в ситуации роста скорости истечения

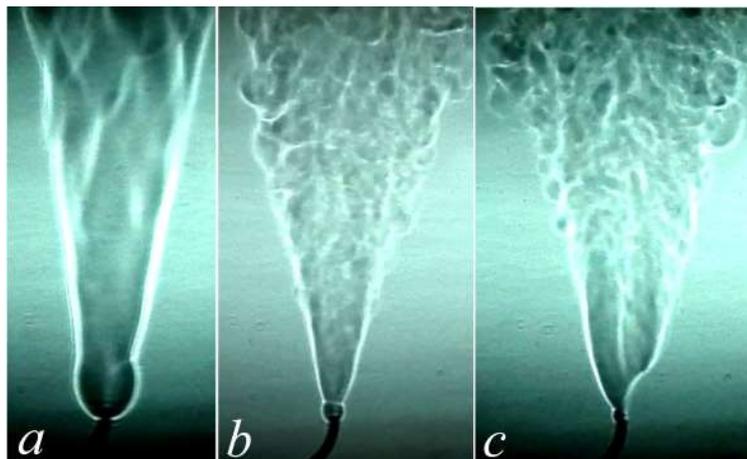


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения микроструи чистого водорода ($a - U_0 = 918$ м/с) и смеси водорода с кислородом ($b, c - U_0 = 995$ м/с, доля кислорода в смеси $O_2 = 8\%$), истекающих из круглого микросопла диаметром 0,5 мм при наличии вихрей Дина

микроструи при уменьшении доли кислорода в смеси. Здесь следует также отметить, что при скорости истечения микроструи $U_0 = 995$ м/с наблюдались срыв пламени (т. е. прекращение горения микроструи) и характерное искажение формы пламени вблизи области перетяжки пламени, по-видимому, из-за воздействия вихрей Дина.

Более наглядно картины горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом при наличии вихрей Дина представлены на теневых картинах рис. 6, 7. Видно, что в отличие от ситуации, описанной в работе [11], при скорости истечения микроструи водорода и его смеси с кислородом, превышающей 700 м/с, процесс ее горения сопровождается наличием сферической области перетяжки пламени и отсутствием ее трансформации от сферической формы к цилиндрической. Однако при скорости истечения микроструи менее 700 м/с процесс горения смеси с кислородом идентичен показанному на рис. 3 и описанному в работе [11], что демонстрирует наличие узкой вытянутой формы ламинарного пламени.

Обсуждение и анализ результатов экспериментов

На рис. 8. представлен график зависимости процесса горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом в процентном соотношении друг с другом для

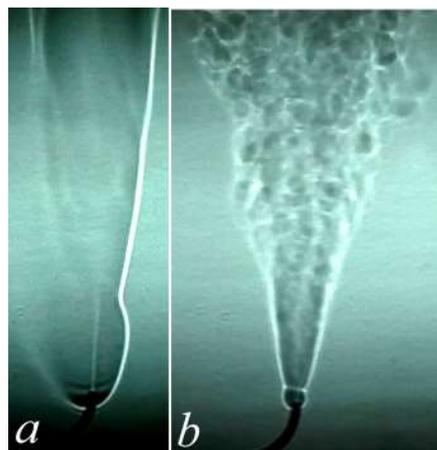


Рис. 7. Теневые картины диффузионного горения микроструи чистого водорода ($a - U_0 = 765$ м/с) и смеси водорода с кислородом ($b - U_0 = 893$ м/с, доля кислорода в смеси $O_2 = 9\%$), истекающих из круглого микросопла диаметром 0,5 мм, при наличии вихрей Дина

различных скоростей истечения микроструи (U_0 , м/с). Видно, что зависимость линейная, и срыв пламени, т. е. прекращение горения микроструи, происходит при снижении объемной доли кислорода (O_2 , %) в смеси при увеличении скорости истечения микроструи. Еще более наглядно этот процесс представлен на рис. 9.

Диффузионное горение микроструи чистого водорода, истекающей из прямолинейного микросопла с ударным профилем скорости на его срезе (I), сопровождается рядом последовательных стадий (см. рис. 9).

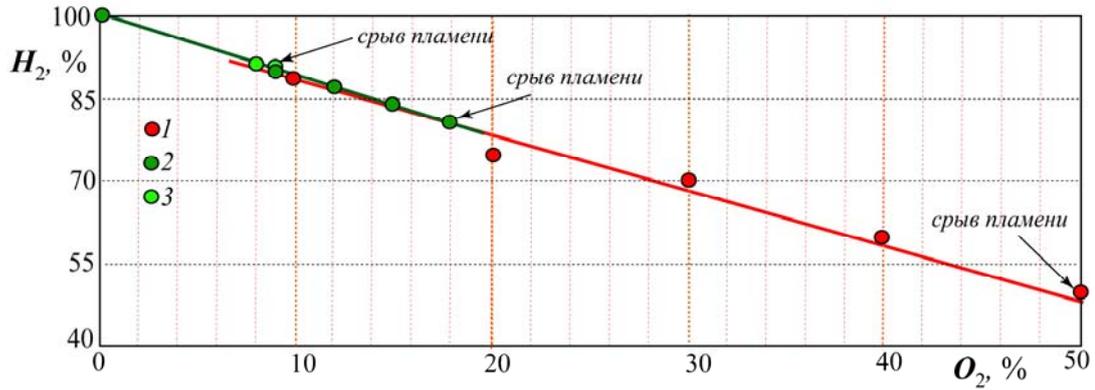


Рис. 8. График зависимости процесса горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом (в процентном соотношении друг с другом) для различных скоростей истечения микроструи, истекающей из криволинейного микросопла с ударным профилем скорости на срезе микросопла и наличием вихрей Дина (U_0 , м/с): 1 – 510; 2 – 765, 842; 3 – 893, 995.

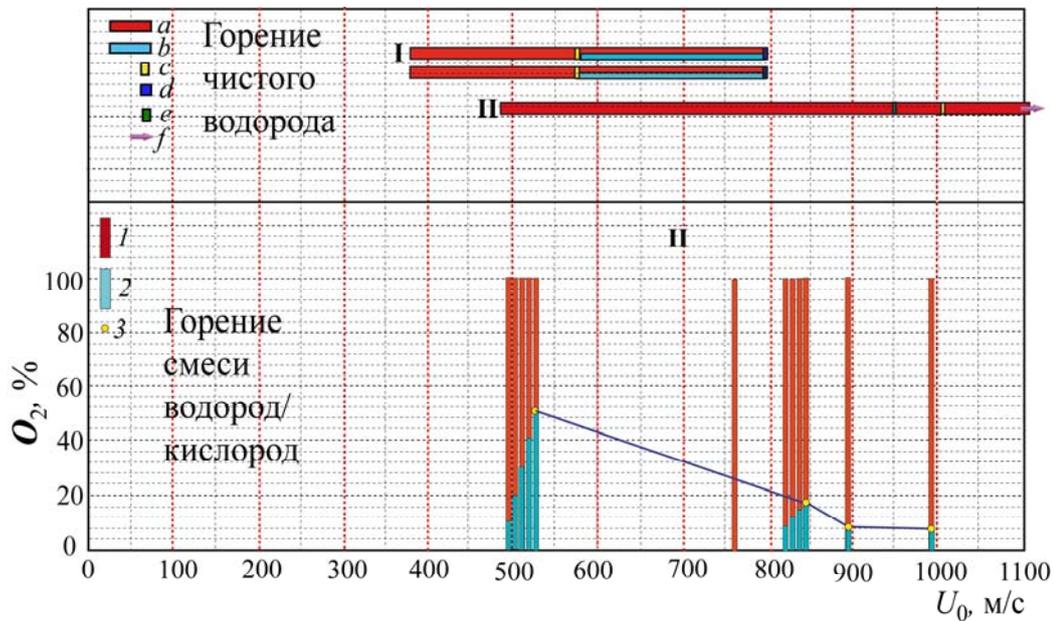


Рис. 9. Диаграммы зависимости диффузионного горения чистого водорода, истекающего из круглого отверстия $d = 0,5$ мм прямолинейного (I) и криволинейного (II) микросопла с ударным профилем скорости на его срезе, от скорости истечения микроструи: a – диапазон горения; b – отрыв турбулентного пламени при наличии горения в области перетяжки пламени; c – момент начала отрыва пламени; d – прекращение горения микроструи; e – момент исчезновения области перетяжки пламени; f – выход на сверхзвуковое горение оторвавшегося пламени микроструи.

Диаграммы зависимости горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из круглого отверстия $d = 0,5$ мм криволинейного (II) микросопла с ударным профилем скорости на его срезе, от скорости истечения микроструи: 1 – доля водорода в %; 2 – доля кислорода в %; 3 – прекращение горения микроструи

Эти стадии включают: горение в области перетяжки пламени и турбулентной области, прекращение горения в турбулентной области микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени и прекращение горения микроструи. Следует также отметить сокращение диапазона го-

рения по сравнению с аналогичным параметром горения микроструи чистого водорода, истекающей из микросопла с параболическим профилем скорости на его срезе (см. работу [11]). С другой стороны, можно наблюдать значительный рост диапазона диффузионного горения микроструи чисто-

го водорода, вплоть до сверхзвуковых скоростей, истекающей из криволинейного канала, с наличием вихрей Дина (II). Можно также отметить и одну особенность данного сценария горения: отрыв пламени, сопровождаемый как исчезновением горения в области перетяжки пламени, так и исчезновением самой области перетяжки пламени (см. работу [7]). Видно также (см. рис. 9), что с ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Данный факт коррелирует с выводом работы [11].

Рассмотрим процесс горения микроструи смеси водород / кислород в зависимости от скорости истечения микроструи и соотношения долей горючего и окислителя в их смеси. При скорости истечения микроструи $U_0 = 510$ м/с процесс горения связан с образованием структуры пламени в форме узкого вытянутого цилиндра с наличием в нем ламинарной струи и ламинарного пламени. С ростом доли кислорода в смеси данная форма пламени все более сжимается и вытягивается, пока не наступает стадия турбулизации микроструи и пламени (см. рис. 3). Срыв пламени, т. е. прекращение горения микроструи, наступает при доле кислорода $O_2 = 50\%$ в смеси газов. С ростом скорости истечения микроструи происходит кардинальное изменение структуры пламени. Возникает область перетяжки пламени, размер которой резко уменьшается с ростом скорости истечения микроструи, и можно наблюдать искажение формы турбулентного пламени, характерное при горении микроструи как чистого водорода, так и его смеси с кислородом. Данный факт связан с воздействием и взаимодействием вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина [7]. Срыв пламени (прекращение горения микроструи) на больших скоростях истечения микроструи происходит при значительно меньшей доле кислорода в смеси ($O_2 \approx 8-9\%$), чем в ситуации малой скорости ее истечения ($O_2 = 50\%$).

Рассмотрим другие важные особенности горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из криволинейного канала, с ударным профилем скорости на срезе выходного микросопла при наличии вихрей Дина. На рис. 10 показана теневая картина деформации области перетяжки пламени, вызванная взаимодействием вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина.

Видно (см. рис. 10), что область перетяжки пламени искажилась под углом примерно 14° по отношению к торцу микросопла. На рис. 11, *a* показана теневая картина деформации пламени турбулентной области горения микроструи и области перетяжки пламени, вызванная взаимодействием вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина. На рис. 11, *b* показана теневая картина отсутствия деформации пламени при горении микроструи чистого водорода, истекающей из прямолинейного микросопла с параболическим профилем скорости на его срезе. Можно наблюдать характерное искажение турбулентного пламени и области перетяжки пламени, вызванное взаимодействием вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина на рис. 11, *a* и ее отсутствие в ситуации, представленной на 11*b*.

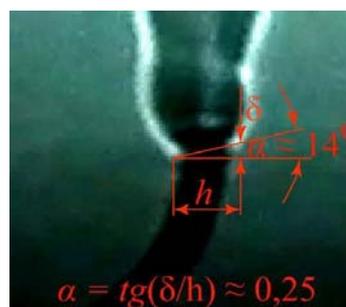


Рис. 10. Теневая картина диффузионного горения микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из круглого микросопла диаметром 0,5 мм, при наличии вихрей Дина (искажение размера и формы области перетяжки пламени – δ , угол перегиба – $\alpha \approx 14^\circ$)

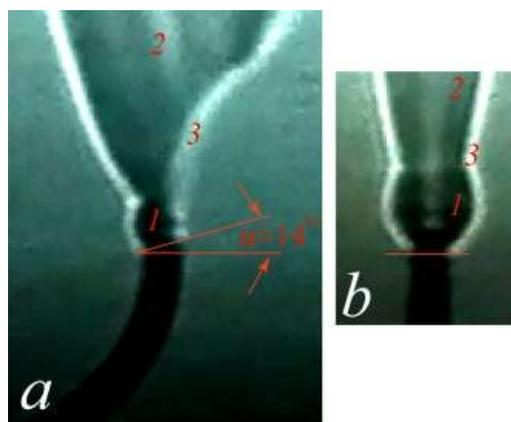


Рис. 11. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из криволинейного (*a*) и прямолинейного (*b*) круглого микросопла диаметром 0,5 мм при наличии (*a*) и отсутствии (*b*) вихрей Дина: 1 – область перетяжки пламени; 2 – турбулентное пламя; 3 – узкая область фронта диффузионного горения. $U_0 = 918, 995(a), 663(b)$ м/с

Основные особенности процесса горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из прямолинейного микросопла, в зависимости от скорости истечения и соотношения долей водорода и кислорода в смеси были детально обсуждены и проанализированы в работе [11]. В заключительном разделе работы проведем сравнение основных особенностей процесса горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из прямолинейного и криволинейного микросопел, частично представленных на объединенном графике рис. 12.

Максимум скорости истечения микроструи, при которой ее горение прекращается, значительно выше в ситуации горения в ней чистого водорода ($U_0 \geq 1000$ м/с) (I), чем в случае горения смеси водород / кислород ($U_0 \approx 700$ м/с) (I) при наличии параболического профиля скорости на срезе сопла. С другой стороны, с ростом скорости истечения микроструи смеси водород / кислород срыв пламени, т. е. прекращение горения микроструи, происходит при снижении доли кислорода в смеси (I).

Несколько иная ситуация в случае горения микроструи, истекающей из криволи-

нейного сопла с ударным профилем скорости на его срезе. Диапазон скорости, в котором горение микроструи продолжается, значительно шире, как в случае горения чистого водорода ($U_0 \geq 1000$ м/с и выходом на сверхзвуковое горение), так и его смеси ($U_0 \approx 1000$ м/с). Однако зависимость прекращения горения смеси от снижения доли кислорода в ней коррелирует с выводами предыдущей ситуации. Следует также отметить различия в структуре пламени при горении микроструи чистого водорода и его смеси.

Процесс диффузионного горения микроструи чистого водорода, истекающей из микросопла как с ударным (II), так и параболическим (I) профилем скорости на его срезе, сопровождался наличием сферической области перетяжки пламени, уменьшением ее размера с ростом скорости микроструи, отрывом турбулентного пламени от области перетяжки пламени с сохранением горения в ней, отсутствием горения в турбулентной области микроструи с продолжающимся горением в области перетяжки пламени и, наконец, прекращением горения микроструи.

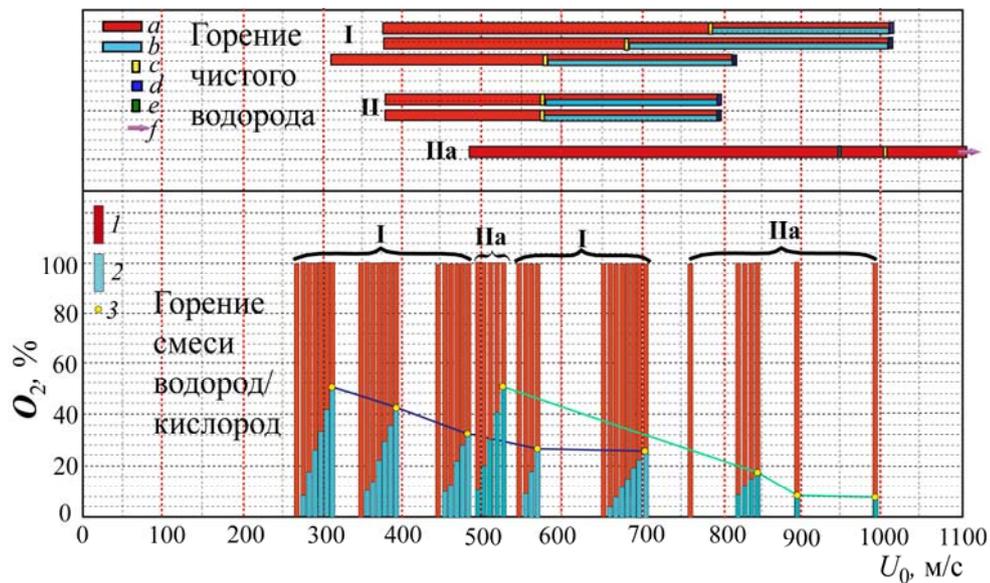


Рис. 12. Диаграммы зависимости диффузионного горения чистого водорода, истекающего из круглого отверстия $d = 0,5$ мм прямолинейного микросопла с параболическим (I) и ударным (II) профилем скорости на срезе сопла и из криволинейного микросопла ($d = 0,5$ мм) с ударным профилем скорости на срезе сопла и наличием вихрей Дина (IIa), в зависимости от скорости истечения микроструи: *a* – диапазон горения; *b* – отрыв турбулентного пламени при наличии горения в области перетяжки пламени; *c* – момент начала отрыва пламени; *d* – прекращение горения микроструи; *e* – момент исчезновения области перетяжки пламени; *f* – выход на сверхзвуковое горение оторвавшегося пламени микроструи.

Диаграммы зависимости горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из прямолинейного I (криволинейного IIa) микросопла с параболическим I (ударным IIa) профилем скорости на срезе сопла при различной скорости ее истечения: 1 – доля водорода; 2 – доля кислорода

Напротив, горение микроструи смеси водород / кислород сопровождается трансформацией сферической формы области перетяжки пламени в узкую вытянутую область ламинарной микроструи и пламени цилиндрической формы (I). С ростом скорости истечения микроструи эта область все более сжимается и растягивается, пока не начнет турбулизоваться. Данное наблюдение коррелирует с фактом, который наблюдался при диффузионном горении микроструи чистого водорода, истекающей из круглого микросопла диаметром выходного отверстия менее 100 мкм. Пламя также имело узкую вытянутую цилиндрическую форму. Учитывая узконаправленность такого пламени и высокую температуру в нем (более 1 000 °С), оно может быть использовано в различных горелочных устройствах для локального нагрева различных объектов.

Рассмотрим различия в структуре пламени при горении микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом, истекающей из круглого криволинейного микросопла, с наличием вихрей Дина в микроструе (IIa). Горение микроструи чистого водорода сопровождается образованием области перетяжки пламени, ее исчезновением и отрывом пламени от среза сопла с переходом на сверхзвуковое горение с ростом скорости истечения микроструи (IIa). При этом можно наблюдать искажение как области перетяжки пламени, так и оторвавшегося пламени от воздействия процесса взаимодействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца.

В случае горения микроструи смеси водород / кислород при скорости ее истечения ($U_0 \approx 700$ м/с) также возникает сферическая область перетяжки пламени, и ее форма, как и форма турбулентной области пламени, подвержена деформации от воздействия процесса взаимодействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца. Однако при скорости ее истечения ($U_0 = 510$ м/с) можно было наблюдать отсутствие области перетяжки пламени, и форма пламени имела узкую вытянутую цилиндрическую форму.

Таким образом, можно сформулировать следующие основные выводы работы, касающиеся горения круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла с вихрями Дина.

Выводы

1. Добавление кислорода приводит к снижению диапазона скоростей существования горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода.

2. С ростом скорости истечения микроструи прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода в смеси.

3. Обнаружено наличие сферической области перетяжки пламени, деформирующейся от воздействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца и уменьшающей свой размер с ростом скорости истечения микроструи.

4. Показано, что область турбулентного пламени также подвержена искажению от воздействия вихрей Дина и Кельвина – Гельмгольца.

5. Установлено, что диапазон горения круглой микроструи как чистого водорода, так и его смеси с кислородом, истекающей из криволинейного микросопла, значительно шире диапазона горения круглой микроструи как чистого водорода, так и его смеси с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла.

Список литературы

1. Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Вихорев В. В. Термоанемометрические исследования круглой струи, сформированной в криволинейном канале // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 1. С. 23–32.

2. 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. НГУ. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.

3. 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. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.

4. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоско-

ростной микроструи водорода // Авиадвигатели XXI века: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. М., 2015.

5. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.

6. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // ДАН. 2016. Т. 470, № 2. С. 166–171.

7. Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Диффузионное горение круглой струи водорода, истекающей из криволинейного канала с вихрями Дина // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 74–84.

8. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 2. С. 56–76.

9. 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.

10. Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A. Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet // International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier, 2017. Vol. 42. Iss. 24. P. 15913–15924.

11. Шмаков А. Г., Вихорев В. В., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Горение круглой микроструи смеси водорода с кислородом, истекающей из прямолинейного микросопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 54–67.

Материал поступил в редколлегию 16.01.2018

V. V. Vikhorev^{1,2}, G. R. Grek¹, V. V. Kozlov^{1,2}, Yu. A. Litvinenko^{1,2}
M. V. Litvinenko^{1,2}, A. G. Shmakov^{2,3}

¹ Khristianovich 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

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

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

COMBUSTION OF THE ROUND MICROJET OF HYDROGEN WITH OXYGEN MIXTURE EFFLUX FROM THE CURVED MICRONOZZLE

The purpose of this work consists in experimental study of combustion features of the round microjet premixed hydrogen with oxygen. Situation of the microjet efflux and combustion of hydrogen/oxygen mixture from a curved micronozzle with a top-hat mean velocity profile at the nozzle exit is considered.

It is shown that addition of oxygen leads to decrease in velocity range of existence of a microjet combustion in comparison with similar parameter at diffusion combustion of a pure hydrogen. It is found that with growth of a microjet velocity efflux, the combustion termination of its is connected with reduction of an oxygen part in mixture. Existence of spherical «bottleneck flame region» is revealed. Its region deformed under influence of the Dean and Kelvin – Helmholtz vortices. «Bot-

tleneck flame region» size is reduced with growth of a microjet velocity efflux. It is shown that the area of a turbulent flame is also is subjected to distortion from influence of the Dean and Kelvin – Helmholtz vortices. It is found that the range of the round microjet combustion both pure hydrogen, and its mixture with oxygen efflux from a curved micronozzle is much wider than the range of the round microjet combustion both pure hydrogen, and its mixture with oxygen efflux from a linear micronozzle.

Keywords: round microjet, hydrogen / oxygen mixture combustion, «bottleneck flame region», shadow method of a research, combustion shadow patterns, curved micronozzle.

For citation:

Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A., Litvinenko M. V., Shmakov A. G. Combustion of the Round Microjet of Hydrogen with Oxygen Mixture Efflux from the Curved Micronozzle. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 68–79. (In Russ.)

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-1-68-79