

УДК 544.452.42
DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-1-54-67

А. Г. Шмаков^{1,2}, **В. В. Вихорев**^{2,3}, **Г. Р. Грек**³, **В. В. Козлов**^{2,3}
Г. В. Козлов³, **Ю. А. Литвиненко**^{2,3}

¹ *Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

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

³ *Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, 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 ПРЯМОЛИНЕЙНОГО МИКРОСОПЛА *

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей горения круглой микроструи смеси водорода с кислородом. Рассмотрена ситуация истечения и горения микроструи смеси водород / кислород из прямолинейного микросопла с параболическим 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, что сферическая форма «области перетяжки пламени» трансформируется в узкую и вытянутую область ламинарного пламени цилиндрической формы, процесс утончения которой растет с ростом скорости истечения микроструи.

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

Введение

В работах [1–5] представлены результаты экспериментальных исследований режимов горения и структуры диффузионного пламени водорода, образующегося при истечении с высокой скоростью водорода в воздух через круглые отверстия различных диаметров. Найден диапазон скоростей истечения водородной струи и диаметров сопловых отверстий, при котором пламя разделяется

на две зоны – ламинарную и турбулентную. Зона с ламинарным течением является стабилизатором горения пламени в целом, а в зоне с турбулентным течением происходит интенсивное смешение основной части горючего с окислителем с последующим горением. Горение в этих двух зонах может происходить независимо друг от друга, но наиболее устойчивый режим наблюдается только при существовании пламени в зоне с ламинарным течением. Исследованная сис-

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

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

тема может представлять интерес с точки зрения организации эффективного перемешивания различных потоков и их подогрева. В таком режиме сгорает только небольшая часть водорода, а остальная смешивается с продуктами горения и воздухом, в результате чего температура такой смеси может варьироваться (путем подбора скорости потока и диаметра сопла) от близкой к начальной до температуры самовоспламенения водорода. Кроме того, такая система может служить своеобразным «реактором» для осуществления, например, в мягких и контролируемых условиях различных термолитических реакций, таких как синтез наночастиц металлов и оксидов металлов из летучих металлосодержащих прекурсоров, обработка углеводородного сырья и др. Такие системы также могут быть использованы для организации эффективного смешения топлива с воздухом и подогрева такой смеси в прямоточных реактивных двигателях.

В связи с этим важно изучить влияние газообразных добавок в поток водорода с различными химическими (инертные и реагирующие) и физическими (с разным молекулярными весами, теплопроводностью и диффузией) свойствами на режимы горения микроструй смесей водорода с другими газами при их истечении из круглых сопел в воздух. В работе [6] 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. Установлено, что область перетяжки пламени имеет сферическую форму, в ней идет процесс смешения ламинарной струи смеси с окружающим воздухом и их горение. При преодолении узкой области мощного градиента плотности на границе сферической области ламинарная микроструя и пламя мгновенно турбулизуются. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород / метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, сры-

ва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установлено, что все перечисленные стадии горения смеси водород / метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи (200÷500 м/с), чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода (600÷800 м/с). 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 или гелием, или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи струи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

В связи с этим интересно рассмотреть особенности горения микроструи смеси водорода не с инертными (гелий, азот) или горючим (углеводородный газ метан), как в описанной ситуации, а с хорошо известным окислителем (кислородом).

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований особенностей горения микроструи смеси водорода с кислородом в зависимости от скорости истечения микроструи и соотношения водород / кислород в смеси. Рассмотрено прямое круглое микросопло 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 $U_0 = Q/S$,

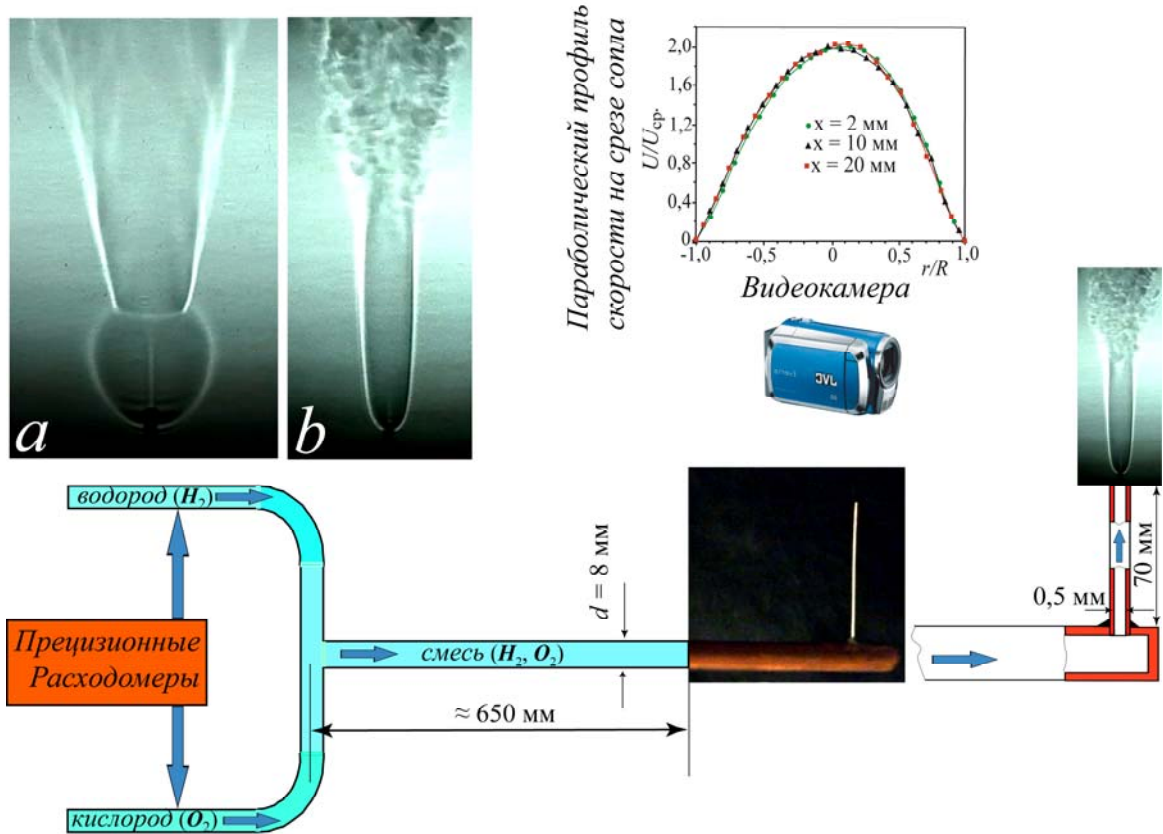


Рис. 1. Схема эксперимента и теневые картины пламени при горении чистого водорода (а) и его смеси с кислородом (b) в круглой микроструе

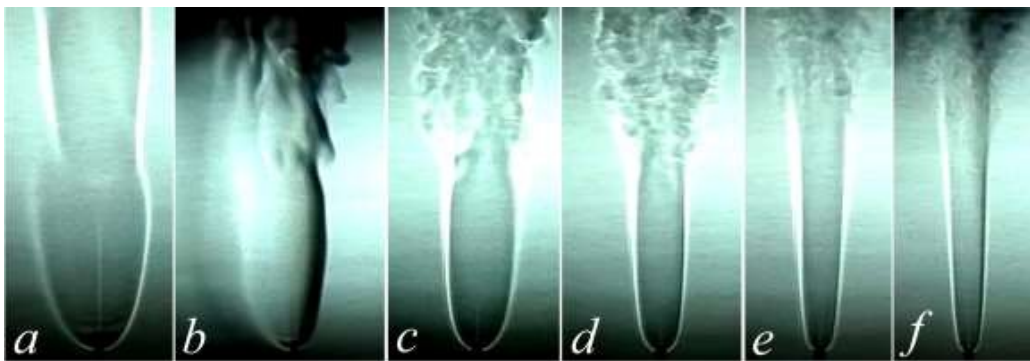


Рис. 2. Теневые картины горения чистого водорода (а) и его смеси с кислородом (b–f), истекающих со скоростью 306 м/с из круглой микросопла диаметром 0,5 мм. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: а – 0; b – 8; c – 17; d – 25; e – 33; f – 42, 50 (срыв пламени)

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, объемная доля кислорода в смеси газов водород / кислород показана в процентах (O_2 , %).

Профиль скорости на срезе сопла имел параболическую форму из-за отношения длины канала сопла ($l = 70 \text{ мм}$) к диаметру отверстия выходного сопла ($d = 0,5 \text{ мм}$) $l/d = 140$ [7] и был измерен с помощью термоанемометра. Более детально схема экспери-

мента и результаты измерений распределения средней (U_0) и пульсационной (u') составляющих скорости на срезе сопла представлены на рис. 6 в работе [8].

Результаты экспериментальных исследований

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 306$ м/с

На рис. 2 показаны теневые картины диффузионного горения круглой микроструи чистого водорода (a) и его смеси с кислородом (O_2) при нарастании доли кислорода в ней ($b-f$) для скорости истечения микроструи $U_0 = 306$ м/с. Видно, что развитие пламени в ситуации горения микроструи чистого водорода (H_2) связано с возникновением области перетяжки пламени, характеристики развития которой с ростом скорости истечения струи были детально представлены ранее в работах [1–5]. Совершенно иная ситуация складывается при горении микроструи в смеси водорода с кислородом (H_2/O_2). Можно наблюдать, что с ростом доли кислорода в смеси меняются форма и размеры области перетяжки пламени. Форма этой области из сферической становится цилиндрической, удлиняется и сжимается с ростом доли кислорода в смеси. Микроструя

и пламя в области перетяжки пламени имеют ламинарный характер развития, пока после преодоления узкой области градиента плотности газа они не становятся турбулентными. Срыв пламени, т. е. прекращение горения смеси газов, происходит при доле кислорода в смеси $O_2 = 50$ %.

На рис. 3 показаны график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d) от роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси. Видно, как с ростом доли кислорода в смеси растет размер (длина) области перетяжки пламени. Данный факт контрастирует, например, с фактом уменьшения размера области перетяжки пламени с ростом скорости истечения микроструи при горении чистого водорода [1–5], хотя в данном случае зависимость связана не со скоростью истечения микроструи, а с изменением доли кислорода в смеси газов.

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 357$ 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 ($b-g$) при скорости истечения микроструи $U_0 = 357$ м/с. Видно, что развитие пламени в ситуации горения микроструи чистого водорода (H_2) связано с возникновением сферической области перетяжки

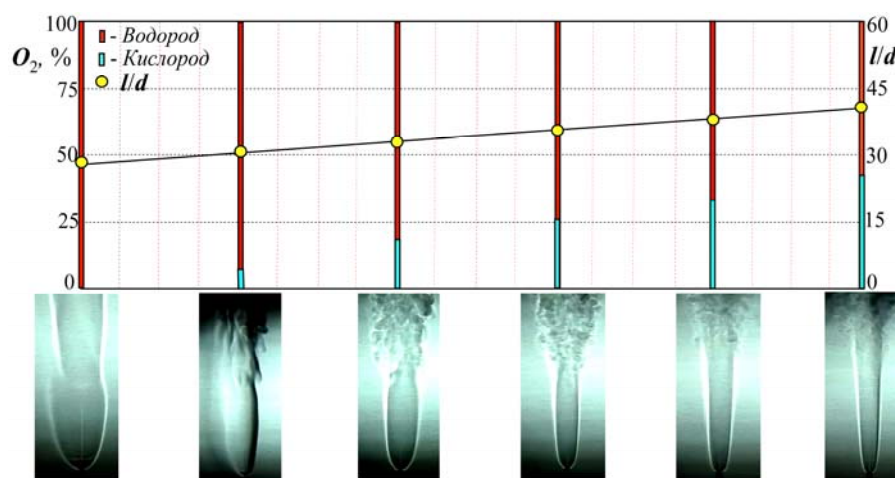


Рис. 3. График изменения размера (l/d) и формы (от сферической к цилиндрической) области перетяжки пламени в зависимости от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи ($U_0 = 306$ м/с) и теневые картины процесса горения

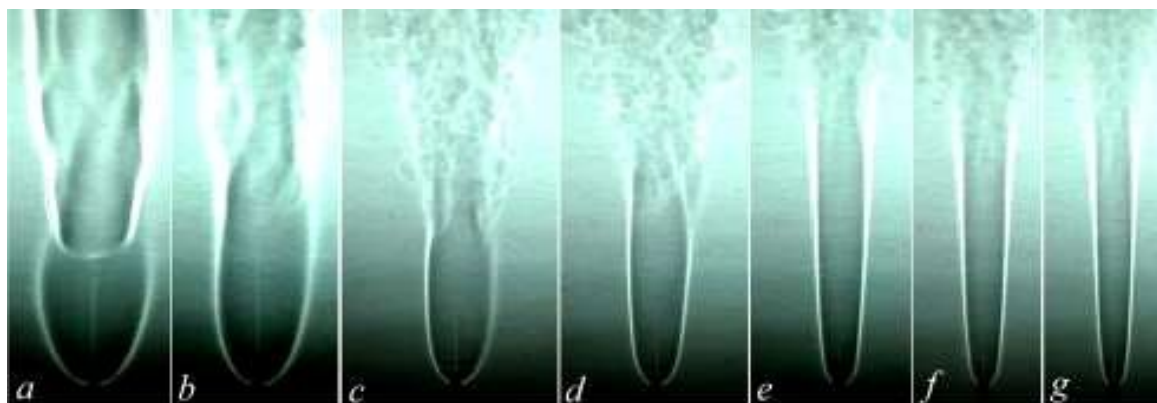


Рис. 4. Теневые картины горения чистого водорода (а) и его смеси с кислородом (b–g), истекающих со скоростью 357 м/с из круглого микросопла диаметром 0,5 мм. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: а – 0; b – 7; c – 14; d – 22; e – 29; f – 36; g – 43 (срыв пламени)

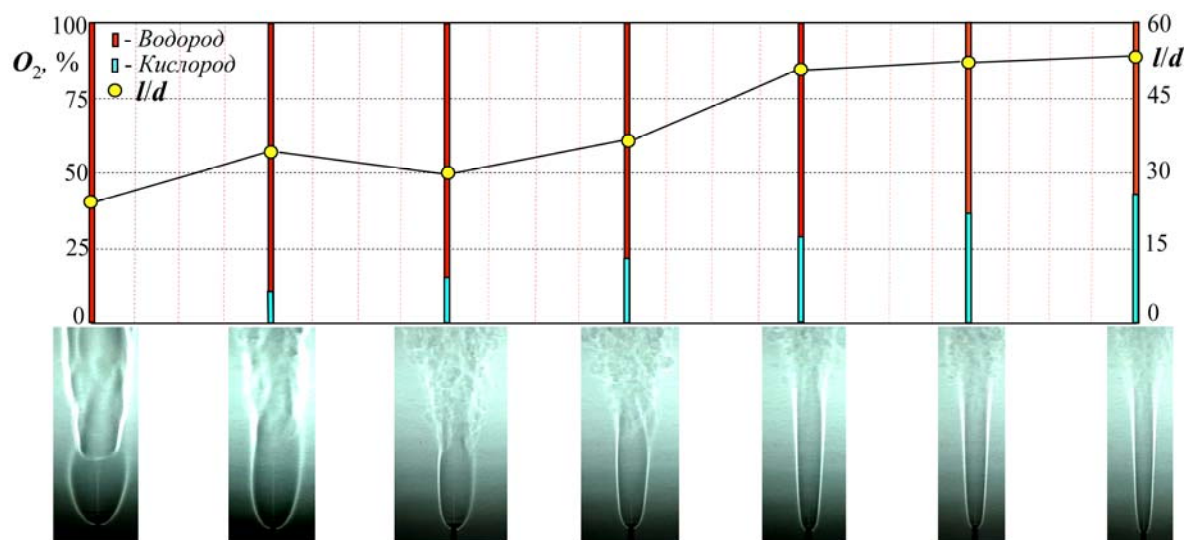


Рис. 5. График зависимости изменения размера (l/d) и формы (от сферической к цилиндрической) области перетяжки пламени в зависимости от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи ($U_0 = 357$ м/с) и теневые картины процесса горения

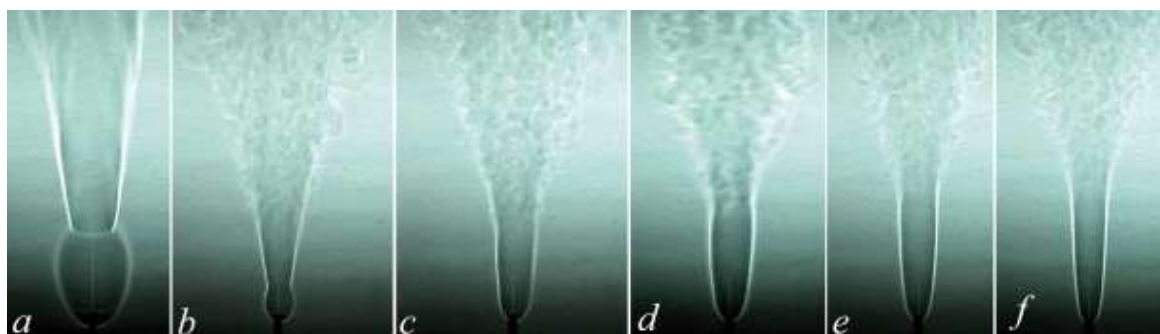


Рис. 6. Теневые картины горения чистого водорода (а) и его смеси с кислородом (b–f), истекающих со скоростью 459 м/с из круглого микросопла диаметром 0,5 мм. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: а – 0; b – 11; c – 17; d – 22; e – 28; f – 33 (срыв пламени)

пламени, как и в предыдущем случае. Совершенно иная ситуация при горении микроструи в смеси водорода с кислородом

(H_2/O_2). Можно наблюдать, как и в предыдущем случае, что с ростом доли кислорода в смеси меняются форма и размеры области

перетяжки пламени. Форма этой области из сферической трансформируется в цилиндрическую, удлиняется и сжимается с ростом доли кислорода в смеси. Микроструя и пламя в области перетяжки пламени имеют ламинарный характер развития, пока после преодоления узкой области градиента плотности газа они не становятся турбулентными. Однако в отличие от предыдущего случая срыв пламени, т. е. прекращение горения смеси газов, происходит при доле кислорода в смеси $O_2 = 43\%$, т. е. при чуть меньшей ее величине, чем в предыдущей ситуации.

На рис. 5 показаны график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d) от роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси. Видно, как с ростом доли кислорода в смеси растет размер (длина) области перетяжки пламени, как и в предыдущей ситуации. Хотя тенденция и сохраняется, но можно наблюдать и определенный разброс значений, по-видимому, из-за определенной нестационарности процесса горения.

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 459$ м/с

На рис. 6 показаны теневые картины диффузионного горения круглой микроструи чистого водорода (*a*) и его смеси с кислородом (O_2) при нарастании доли кислорода в ней

(*b-f*) для скорости истечения микроструи $U_0 = 459$ м/с.

Видно, что развитие пламени в ситуации горения микроструи чистого водорода (H_2) связано с возникновением области перетяжки пламени, как и в предыдущих случаях. Совершенно иная ситуация возникает при горении микроструи в смеси водорода с кислородом (H_2/O_2). Можно наблюдать, как и в предыдущих случаях, что с ростом доли кислорода в смеси меняются форма и размеры области перетяжки пламени. Форма этой области из сферической трансформируется в цилиндрическую, удлиняется и сжимается с ростом доли кислорода в смеси. Однако отметим следующий факт. Сферическая форма области перетяжки пламени (см. рис. 6, *b*) сохраняется, но резко уменьшается ее размер по сравнению с ситуацией горения чистого водорода (см. рис. 6, *a*). По-видимому, это связано с ростом скорости истечения микроструи, что предполагается обсудить далее. Микроструя и пламя в области перетяжки пламени имеют ламинарный характер развития, пока после преодоления узкой области градиента плотности газа они не становятся турбулентными. Однако срыв пламени, т. е. прекращение горения смеси газов, происходит при доле кислорода в ней ($O_2 = 33\%$), т. е. при еще меньшей ее величине в смеси, чем в предыдущих ситуациях.

На рис. 7 показаны график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d)

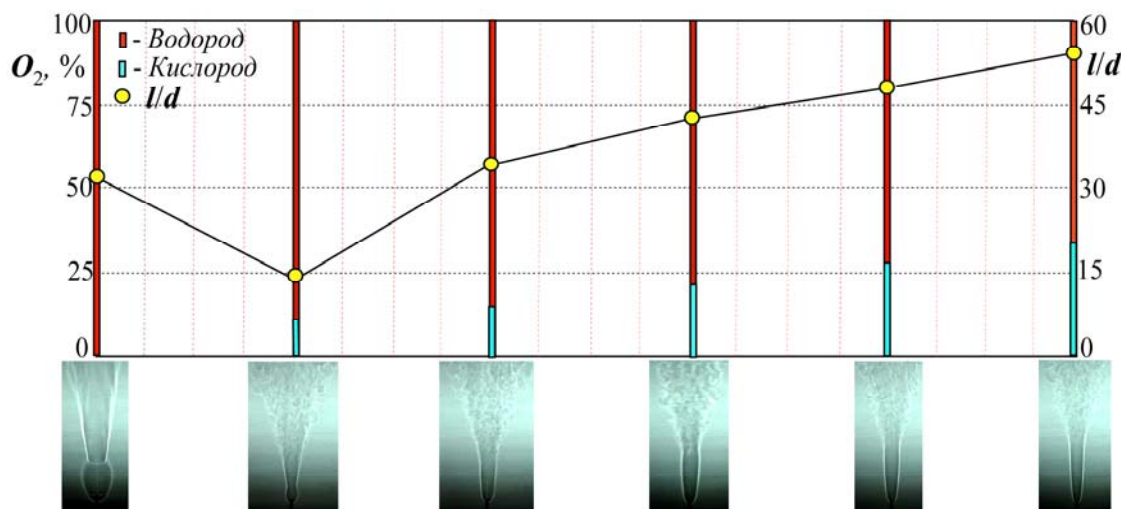


Рис. 7. График изменения размера (l/d) и формы (от сферической к цилиндрической) области перетяжки пламени в зависимости от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи $U_0 = 459$ м/с и теневые картины процесса горения

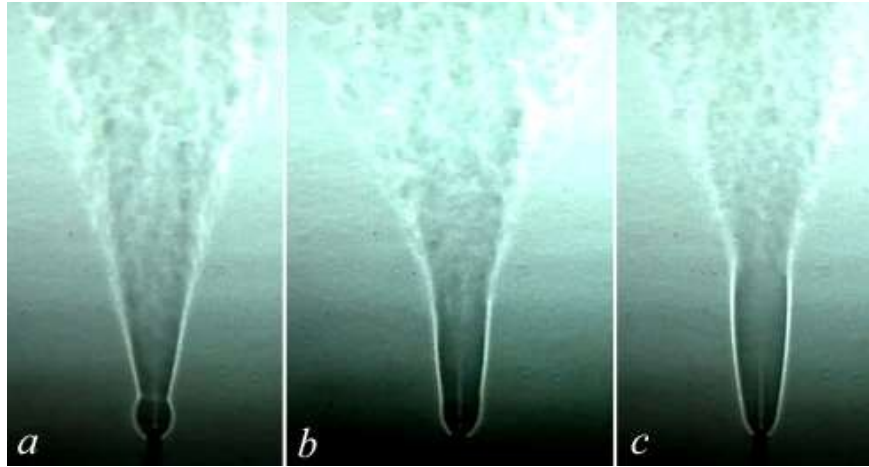


Рис. 8. Теневые картины горения смеси водорода с кислородом (а–с), истекающей со скоростью 561 м/с из круглого микропла диаметром 0,5 мм. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: а – 9; б – 18; с – 27 (срыв пламени)

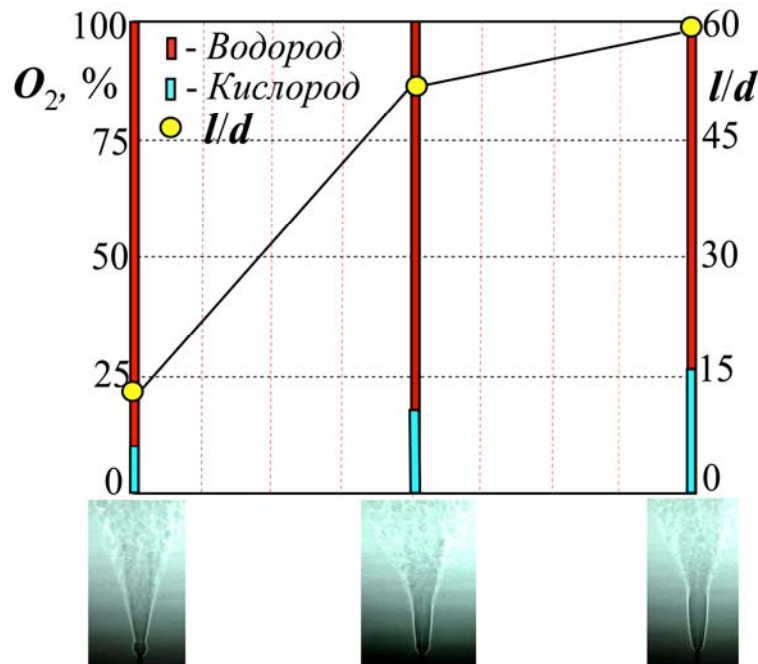


Рис. 9. График изменения размера (l/d) и формы (от сферической к цилиндрической) области перетяжки пламени в зависимости от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи $U_0 = 561$ м/с и теневые картины процесса горения

от роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси. Видно, как с ростом доли кислорода в смеси растет размер (длина) области перетяжки пламени, как и в предыдущих ситуациях. Хотя тенденция и сохраняется, но можно наблюдать провал в зависимости $l/d = f(O_2)$ в случае сохранения сферической формы области перетяжки пламени: резкое уменьшение в размере в случае относительно небольшой добавки доли кислорода в смесь ($O_2 = 11\%$).

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 561$ м/с

На рис. 8 показаны теневые картины горения круглой микроструи смеси водорода с кислородом (O_2) при нарастании доли кислорода в ней (а–с) для скорости истечения микроструи $U_0 = 561$ м/с. Видно, что развитие пламени в ситуации горения микроструи смеси водорода с кислородом, при малой доли кислорода $O_2 = 9\%$, связано с наличием

ем области перетяжки пламени, как и в предыдущем случае. Далее, с ростом доли кислорода в смеси, можно наблюдать, как и в предыдущих случаях, изменение формы и размера области перетяжки пламени. Форма этой области из сферической трансформируется в цилиндрическую, удлиняется и сжимается с ростом доли кислорода в смеси.

На рис. 9 показаны график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d) от роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси. Видно, как с ростом доли кислорода в смеси растет размер (длина) области перетяжки пламени, как и в предыдущих ситуациях. Срыв пламени, т. е. прекращение горения смеси газов, происходит при доле кислорода в смеси $O_2 = 27\%$.

Горение микроструи смеси водорода (H_2) с кислородом (O_2) при скорости истечения микроструи $U_0 = 663$ м/с

На рис. 10 показаны теневые картины горения круглой микроструи смеси водорода с кислородом (O_2) при нарастании доли кислорода в ней ($a-g$) для скорости истечения микроструи $U_0 = 663$ м/с.

Видно (см. рис. 10), что развитие пламени в ситуации горения микроструи смеси водорода с кислородом связано с возникновением области перетяжки пламени, как и в предыдущих случаях. Однако в данной ситуации «область перетяжки пламени сохраняет свою сферическую форму и уменьшается в размере с ростом доли кислорода в смеси вплоть до $O_2 = 15\%$. Лишь далее, с ростом доли кислорода в смеси, форма этой области из сферической трансформируется

в цилиндрическую, удлиняется и сжимается с ростом доли кислорода в смеси. Таким образом, с ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать трансформацию формы области перетяжки пламени от сферической к цилиндрической. Причем размер этой области уменьшается (сферическая форма), и растет (цилиндрическая форма) с ростом доли кислорода в смеси и скорости истечения микроструи. Наглядно данный процесс представлен на рис. 11: показаны график зависимости размера области перетяжки пламени (l/d) от роста доли кислорода в смеси, а также диаграммы нарастания доли кислорода в смеси.

Видно (см. рис. 11), как с ростом доли кислорода в смеси уменьшается размер области перетяжки пламени сферической формы и растет размер (длина) области перетяжки пламени цилиндрической формы. Срыв пламени, т. е. прекращение горения смеси газов, происходит при доле кислорода в смеси $O_2 = 27\%$.

Обсуждение и анализ результатов экспериментов

На рис. 12 представлен график зависимости процесса горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом от их долевого соотношения в процессе для различных скоростей истечения микроструи (U_0 , м/с). Видно, что зависимость линейная. Срыв пламени, т. е. прекращение горения микроструи, происходит при уменьшении доли кислорода в смеси и соответственно при увеличении доли водорода в смеси, в ситуации роста скорости ее истечения.

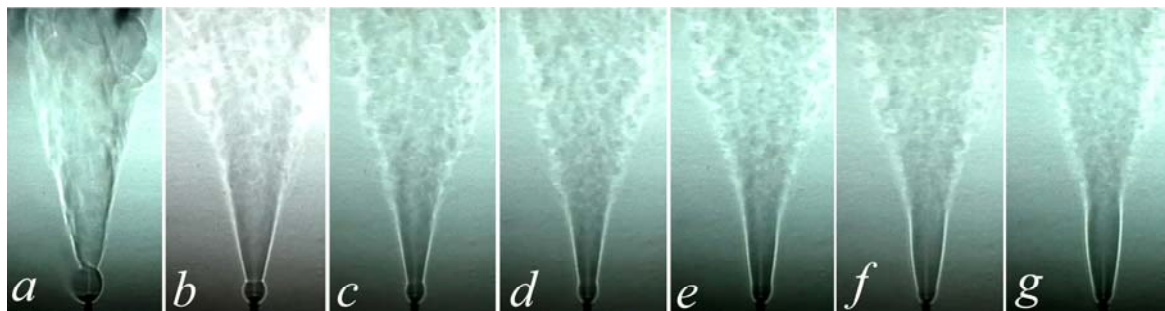


Рис. 10. Теневые картины горения смеси водорода с кислородом ($a-g$), истекающей на скорости 663 м/с из круглого микросопла диаметром 0,5 мм. Доля кислорода (O_2) в смеси указана в процентах: $a - 4$; $b - 8$; $c - 12$; $d - 15$; $e - 19$; $f - 23$; $g - 27$ (срыв пламени)

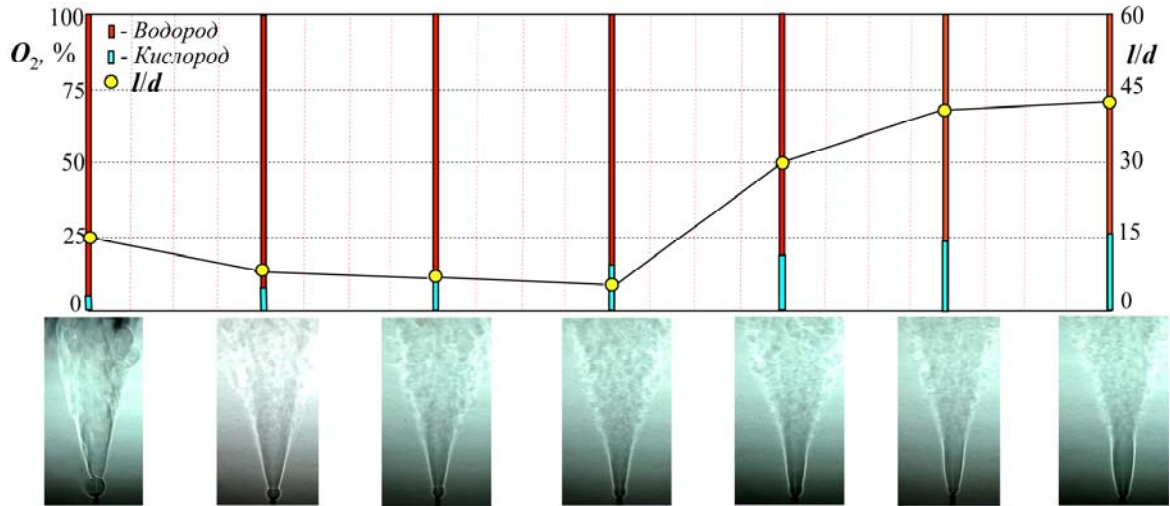


Рис. 11. График изменения размера (l/d) и формы (от сферической к цилиндрической) области перетяжки пламени в зависимости от доли кислорода в смеси при скорости истечения круглой микроструи $U_0 = 663$ м/с и теневые картины процесса горения

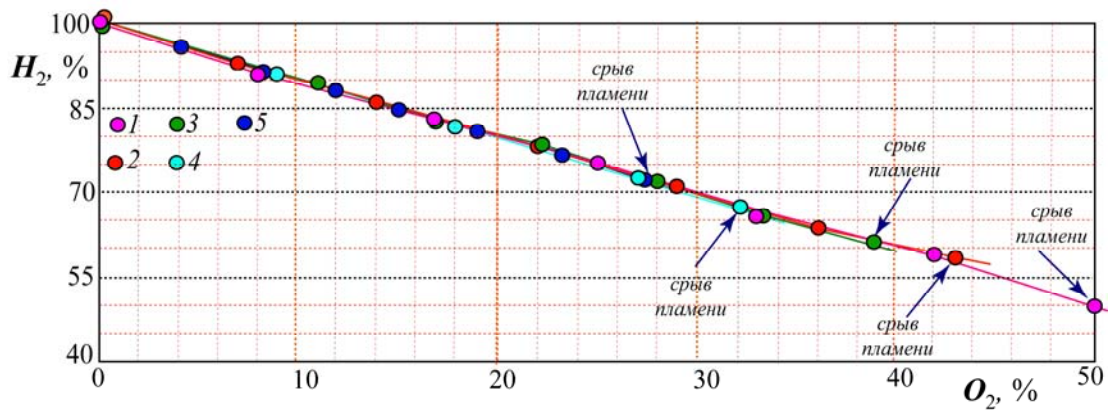


Рис. 12. График зависимости процесса горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом от их долевого соотношения в процессе для различных скоростей истечения микроструи (U_0 , м/с): 1 – 306; 2 – 357; 3 – 459; 4 – 561; 5 – 663

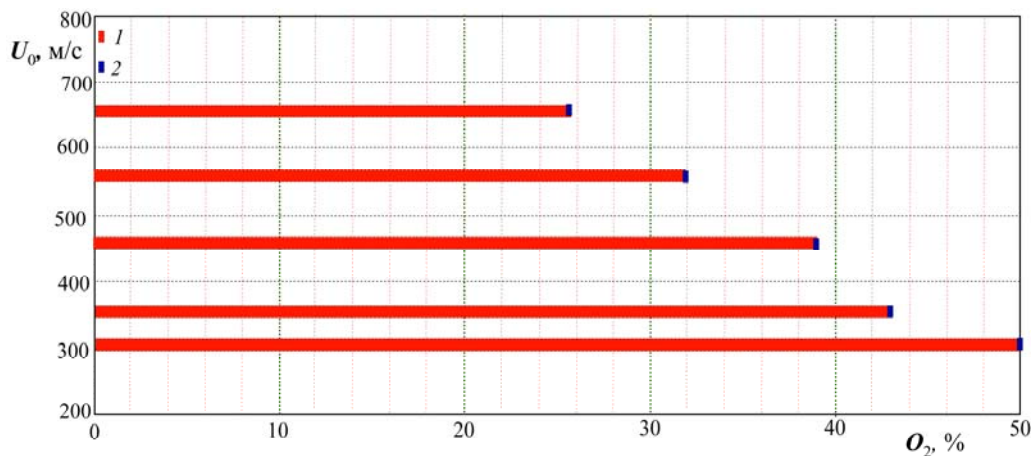


Рис. 13. Диаграммы процесса горения смеси водорода с кислородом в ситуации нарастания / снижения доли кислорода в смеси до момента срыва пламени (прекращение горения микроструи) в зависимости от скорости истечения микроструи: 1 – диапазон устойчивого горения смеси водород / кислород; 2 – срыв пламени

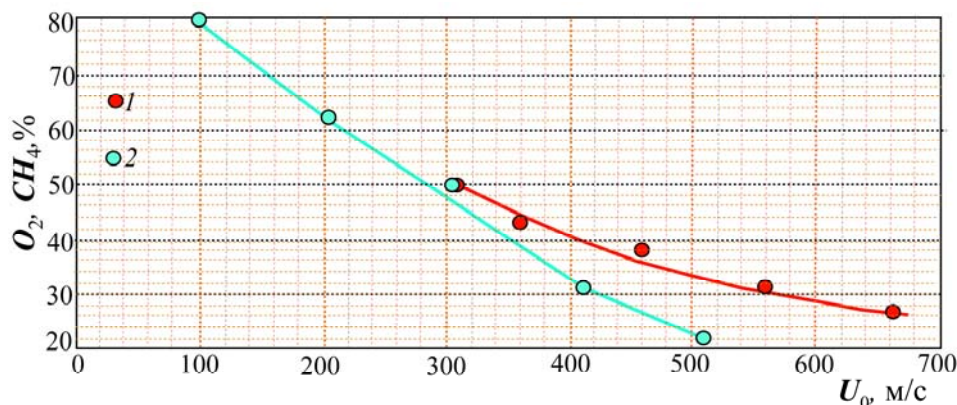


Рис. 14. Сравнение графиков зависимости процесса срыва пламени при снижении доли примеси (1 – кислород, 2 – метан) в смеси с водородом в ситуации нарастания скорости истечения микроструи

Диаграммы на рис. 13 представляют процесс горения смеси водорода с кислородом в ситуации нарастания доли кислорода в смеси до момента срыва пламени (т. е. прекращения горения микроструи) в зависимости от скорости истечения микроструи.

Аналогичная ситуация срыва пламени происходила при снижении доли метана в смеси водород / метан с ростом скорости истечения микроструи (см. рис. 14 и работу [6]).

При горении чистого водорода, истекающего из микросопла диаметром 0,5 мм, стабильное диффузионное горение наблюдалось до значения скорости истечения микроструи порядка 850 м/с (см. работу [2]).

Как видно на рис. 14, наличие примеси к водороду (H_2) как метана (CH_4), так и кислорода (O_2) не способствует стабилизации горения круглой микроструи. Срыв пламени происходит в обоих случаях при значительно меньших скоростях истечения микроструи по сравнению с горением аналогичной микроструи чистого водорода.

С другой стороны, обнаружена принципиальная разница в структуре пламени при горении смеси водорода с кислородом и смеси водорода с метаном [6]. Если во втором случае процесс горения смеси происходит по классическому сценарию микрогорения чистого водорода [8], включающего в себя: ламинарное горение в сферической области перетяжки пламени и турбулентное горение после преодоления микроструей градиента плотности газа. Далее, с ростом скорости истечения микроструи, наблюда-

ется отрыв турбулентного пламени с сохранением горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращение горения микроструи. Причем с ростом скорости истечения микроструи размер сферической области перетяжки пламени уменьшается.

Совершенно иная картина возникает при горении смеси водорода с кислородом. Можно наблюдать трансформацию формы и размера области перетяжки пламени как с ростом доли кислорода в смеси, так и с ростом скорости истечения микроструи (рис. 15). Пламя при горении чистого водорода (см. [1–6]) или с малой долей примеси кислорода сохраняет сферическую форму и размеры области перетяжки пламени. Далее, с ростом скорости истечения микроструи и доли кислорода в смеси, область перетяжки пламени трансформируется из сферической в цилиндрическую, удлиняется и сужается. Это отчетливо видно на теневых картинах процесса горения чистого водорода и его смеси с кислородом на грани срыва пламени, т. е. прекращения горения микроструи.

Следует отметить еще одно обстоятельство. В данных исследованиях микроструя воспламенялась поджиганием вблизи среза микросопла, и мы наблюдали присоединенное пламя. Однако в случае воспламенения микроструи поджиганием вдали от среза микросопла, реализовывалось приподнятое пламя. В данной ситуации обнаружено, что даже небольшая примесь кислорода (порядка 5%) приводит к мгновенному срыву пламени и прекращению горения микроструи.

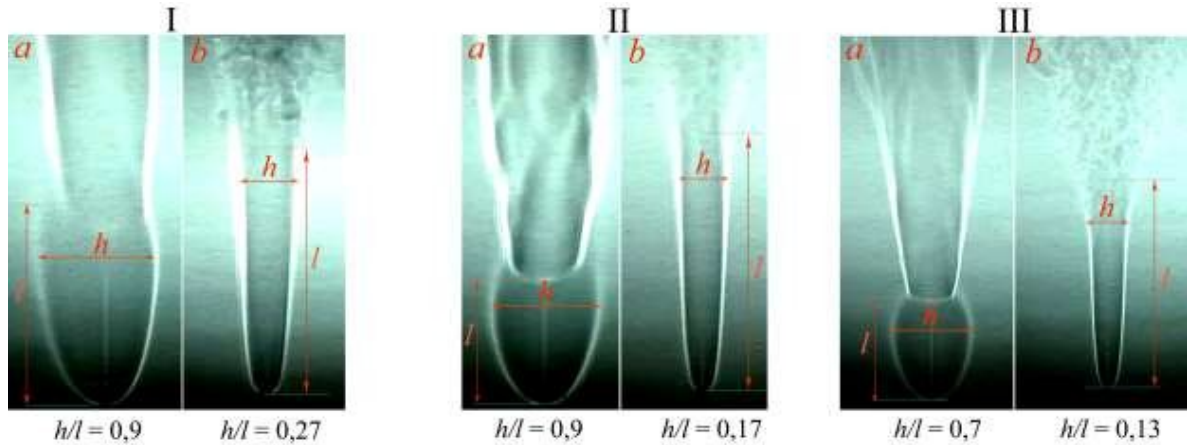


Рис. 15. Теневые картины процесса горения чистого водорода (а) и его смеси с кислородом на грани срыва пламени (b) в зависимости от изменения формы и размеров области перетяжки пламени (h/l) при различной скорости истечения микроструи: I – 306 м/с, II – 357 м/с, III – 459 м/с. Доля кислорода в смеси (O_2 , %) при ее горении на грани срыва пламени составляла: I – 50, II – 43, III – 33

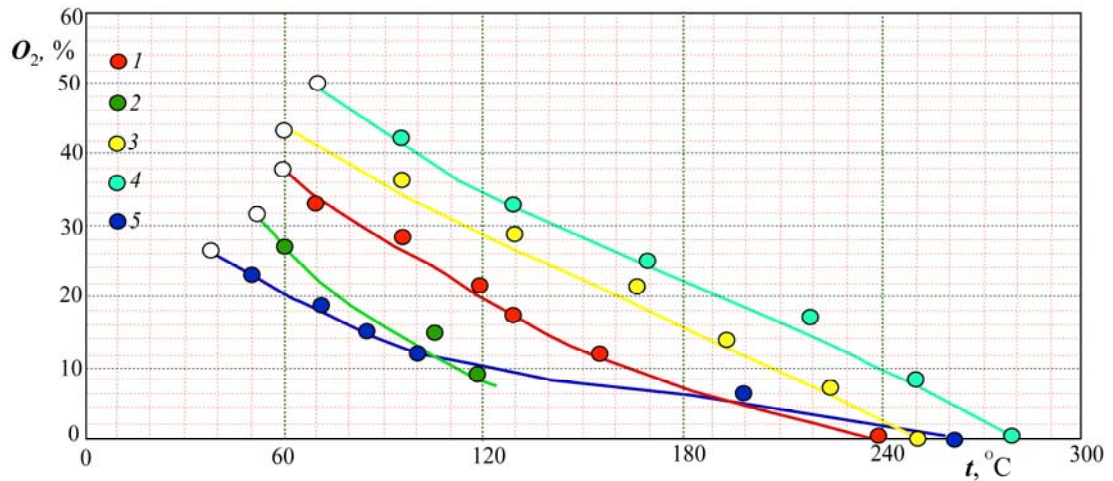


Рис. 16. Графики температуры нагрева микросопла при горении чистого водорода и его смеси с кислородом в зависимости от доли кислорода в смеси и скорости истечения микроструи (U_0 , м/с): 1 – 306, 2 – 357, 3 – 459, 4 – 561, 5 – 663

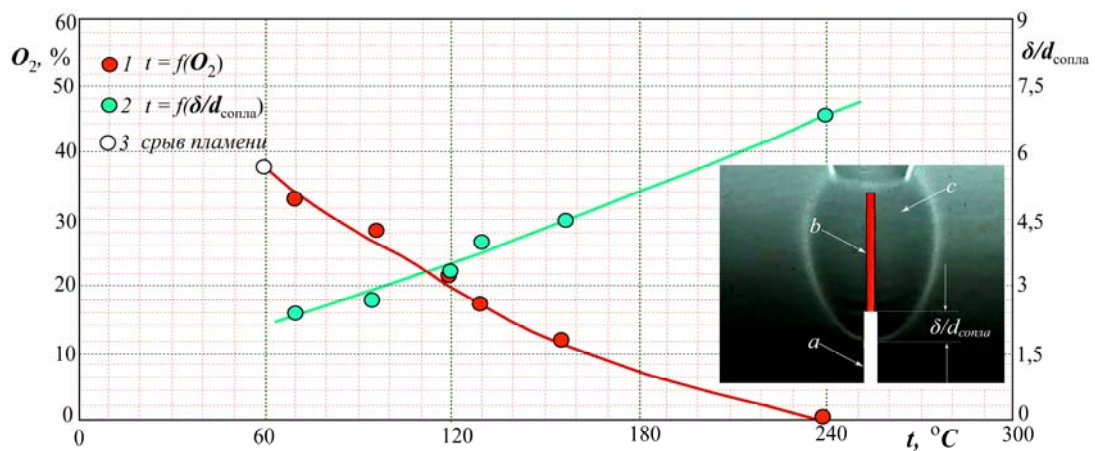


Рис. 17. График температуры нагрева микросопла при горении чистого водорода и его смеси с кислородом в зависимости от доли (O_2) кислорода в смеси (кривая 1) и график зависимости длины ($\delta/d_{\text{сопла}}$) области охвата пламенем выхода микросопла от доли кислорода в смеси (кривая 2): а – микросопло; b – ламинарная микроструя; c – область перетяжки пламени; $U_0 = 459$ м/с

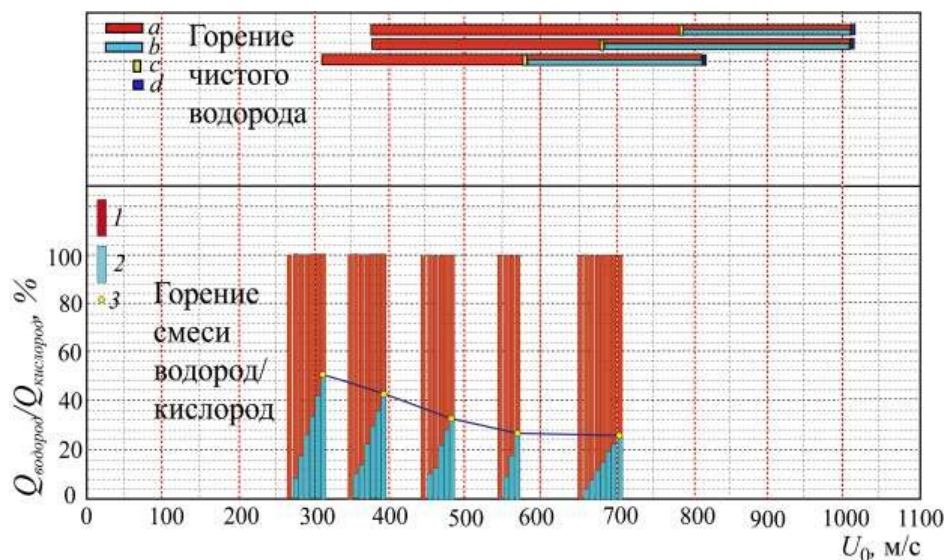


Рис. 18. Диаграммы зависимости диффузионного горения чистого водорода, истекающего из круглого отверстия микросопла ($d = 0,5$ мм) с параболическим профилем скорости на его срезе, от скорости истечения микроструи: a – диапазон горения; b – отрыв турбулентного пламени при наличии горения в области перетяжки пламени; c – момент начала отрыва пламени; d – прекращение горения микроструи.

Диаграммы зависимости горения микроструи смеси водород / кислород, истекающей из микросопла ($d = 0,5$ мм) с параболическим профилем скорости на его срезе при различной скорости ее истечения: 1 – доля водорода в смеси, 2 – доля кислорода в смеси, 3 – прекращение горения микроструи

Очень важным обстоятельством при горении как микроструи водорода, так и его смеси с кислородом является температурный фактор. В случае присоединенного пламени оно охватывает значительную область выхода микросопла и, соответственно, нагревает его. Данные по температуре нагрева микросопла и температуре внутри самого пламени детально представлены в работе [8]. На рис. 16 представлены графики зависимости температуры нагрева микросопла при горении чистого водорода и его смеси с кислородом от доли кислорода в смеси и скорости истечения микроструи.

Видно (см. рис. 16), что с ростом скорости истечения микроструи температура нагрева выхода микросопла падает, а с уменьшением доли кислорода в смеси температура нагрева выхода микросопла растет. Это особенно наглядно показано на рис. 17, где представлены графики зависимости температуры нагрева микросопла от изменения доли кислорода (O_2) в смеси и изменения длины области охвата пламенем выхода микросопла ($\delta/d_{\text{сопла}}$) с ростом доли кислорода в смеси при горении микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом. Отчетливо

видно, что зависимость $t = f(\delta/d_{\text{сопла}})$ прямая, а $t = f(O_2)$ – обратная, т. е. температура нагрева выхода микросопла, а соответственно и самой микроструи, падает с ростом доли кислорода (O_2) в смеси и растет с ростом длины области охвата пламенем выхода микросопла ($\delta/d_{\text{сопла}}$).

На рис. 18 представлено сравнение диаграмм процесса горения микроструи чистого водорода и его смеси с кислородом в зависимости от скорости истечения микроструи и соотношения долей водорода и кислорода в смеси. Видно значительное превышение скорости истечения микроструи до момента прекращения диффузионного горения чистого водорода над аналогичным параметром горения смеси водород/кислород. Причем при одной скорости истечения микроструи смеси водород/кислород прекращение ее горения связано с ростом доли кислорода в смеси. Например, доля кислорода (O_2) в смеси водород/кислород до момента прекращения горения микроструи нарастала постепенно с градацией 8, 17, 25, 33, 42 и 50 % при $U_0 = 306$ м/с.

С другой стороны, прекращение горения микроструи смеси водород/кислород с рос-

том скорости ее истечения, наоборот, связано с уменьшением доли кислорода в смеси. Например, доля кислорода (O_2) в смеси 50 % при $U_0 = 306$ м/с и 25 % при $U_0 = 663$ м/с. Следует отметить также следующие особенности горения микроструи смеси водород/кислород в отличие от диффузионного горения микроструи чистого водорода. Сферическая форма области перетяжки пламени при диффузионном горении чистого водорода сохраняется, ее размер уменьшается с ростом скорости истечения микроструи, горение в области перетяжки пламени продолжается при отсутствии горения турбулентной области микроструи до больших дозвуковых скоростей ее истечения. В то время как горение микроструи смеси водород/кислород сопровождается трансформацией сферической формы области перетяжки пламени в узкую область цилиндрической формы, которая с ростом скорости истечения микроструи удлиняется и сжимается, сохраняя ламинарный характер развития пламени и микроструи. Турбулизация как пламени, так и микроструи происходит при сохранении ламинарного горения в цилиндрической области, горение в которой, в отличие от горения микроструи чистого водорода, продолжается одновременно с продолжением горения турбулентной части микроструи.

Выводы

1. Показано, что добавление кислорода (O_2) в смесь водород/кислород приводит к снижению диапазона скоростей существования горения микроструи по сравнению с аналогичным параметром при диффузионном горении чистого водорода (H_2).
2. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи смеси водород / кислород прекращение ее горения связано с уменьшением доли кислорода (O_2) в смеси.
3. Обнаружено, что сферическая форма области перетяжки пламени трансформируется в узкую и вытянутую область ламинарного пламени цилиндрической формы, процесс утончения которой растет с ростом скорости истечения микроструи.
4. Показано существенное влияние температурного фактора на процесс горения микроструи смеси водород / кислород.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // Авиадвигатели XXI века: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. М., 2015.
4. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

A. G. Shmakov^{1,2}, **V. V. Vikhorev**^{2,3}, **G. R. Grek**³, **V. V. Kozlov**^{2,3}
G. V. Kozlov³, **Yu. A. Litvinenko**^{2,3}

¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

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

³ Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 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 PREMIXED HYDROGEN WITH OXYGEN EFFLUX FROM THE LINEAR CHANNEL

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 straight micronozzle with a parabolic 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. It is revealed that the spherical shape of «bottleneck flame region» is transformed to the narrow and extended area of a laminar flame of a cylindrical shape. Its thinning process grows with growth of microjet velocity efflux.

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

For citation:

Shmakov A. G., Vikhorev V. V., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A. Combustion of the Round Microjet Premixed Hydrogen with Oxygen Efflux from the Linear Channel. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 1, p. 54–67. (In Russ.)

DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-1-54-67