

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

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

СТРУКТУРА ПРИСОЕДИНЕННОГО ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЩЕЛЕВОГО СОПЛА *

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из сопла различной длины и ширины выходной щели. Обнаружено новое явление в процессе горения плоской микроструи водорода, которое мы условно назвали перетяжкой пламени, наблюдаемое нами ранее при исследовании диффузионного горения круглой микроструи водорода. Особое внимание уделено исследованию характеристик развития перетяжки пламени и его роли в процессе диффузионного горения плоской микроструи водорода. Показано, что перетяжка пламени представляет собой замкнутую сферическую область горения смеси водорода с воздухом в ближнем поле горячей струи (вблизи выходного сопла). Область перетяжки пламени окружена мощным градиентом плотности. Обнаружено, что ламинарная плоская струя водорода в этой области преодолевает градиент плотности газа, становится турбулентной и далее вниз по потоку можно наблюдать как процесс турбулентного смешения водорода с окружающим воздухом, так и наличие турбулентного пламени. Установлено, что пространственный размер перетяжки пламени уменьшается с ростом скорости истечения струи. Показано, что перетяжка пламени не возникает при значительном удлинении сопла.

Ключевые слова: плоская микроструя водорода, диффузионное горение, перетяжка пламени, теневой метод исследования, теневые картины горения.

Введение

Основой современной энергетики главным образом является потребление углеводородного сырья: угля, нефти и природного газа (этан, бутан, пропан, этилен и т. д.). Объем потребления экономикой нашей страны этих невозобновляемых источников энергии достигает 80 % и, как полагают большинство специалистов, их запасов в недрах земли хватит не более чем на 50–100

лет. Доля же потребления альтернативных (возобновляемых) источников энергии, таких как солнечная, ветровая и др., хотя и растет, однако составляет незначительную величину: совместно с гидро- и ядерной энергией – не более 20 %.

В этой связи возникает большой интерес к развитию водородной энергетики, основой которой является сжигание абсолютно экологически чистого топлива – водорода, получаемого из воды, запасы которой в миро-

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

Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.

вом океане практически бесконечны, если иметь в виду, что продуктом горения водорода является та же обыкновенная вода. Однако развитию водородной энергетики мешает нерешенность целого ряда проблем, связанных со свойствами водорода, в первую очередь с его пожаро- и взрывоопасностью. Водородная энергетика пока не получила широкого применения. Методы получения водорода, способы его хранения и транспортировки, которые рассматриваются как перспективные для водородной энергетики, все еще находятся на стадии опытных разработок и лабораторных исследований.

Особый интерес представляет процесс горения водорода при его струйном истечении из различного типа горелок, форсунок, сопел и т. д. Водород (технический) горит бледным, слабоокрашенным пламенем. Горелка, работающая на смеси водород-кислород, может дать пламя с температурой более 2 500 °С, при горении водорода на воздухе достигается температура около 2 000 °С. При работе с водородом необходимо постоянно учитывать его высокую пожаро- и взрывоопасность, причем взрывоопасность водорода повышена из-за высокой способности газа к диффузии даже через твердые материалы, что особенно важно для выбора материала сосудов при его хранении. Физико-химические свойства струйного горения водорода широко исследуются во всем мире как теоретически, так и экспериментально. Определенный интерес вызывает диффузионное горение водорода в воздушной среде с точки зрения повышения устойчивости пламени и снижения вредных выбросов в атмосферу оксидов азота NO_x .

В связи с этим возникает важный вопрос о возможности влиять на эти процессы с различными методами управления, такими, например, как акустика. В работе [1] исследовалось воздействие акустики на снижение выброса оксидов азота и устойчивость приподнятого диффузионного пламени турбулентной водородной струи, истекающей в воздух. Показано, что эмиссия NO_x была уменьшена и минимизирована на частоте акустического резонанса. Вихрь, который был генерирован воздействием акустики, способствовал росту подсоса воздуха и повышал степень смешения топливо-воздух. Этот эффект приводил к более низкой температуре в зоне горения и, таким образом,

понижал эмиссию NO_x . В работе [2] исследовано динамическое поведение диффузионного турбулентного пламени водорода в ближнем поле при акустическом воздействии на резонансной частоте струи воздуха. Частота резонанса была выбрана для возбуждения струи воздуха из-за его способности эффективно усиливать амплитуду акустики и уменьшать эмиссию NO_x . При наложении акустических пульсаций на частоте резонанса во внешнем слое смешения коаксиальной воздушной струи формируется вихрь. Акустическое возбуждение приводило к колебаниям скорости коаксиальной воздушной струи, так же как и струи водорода. Вихрь, который периодически генерировался акустическим возбуждением, увеличивал интенсивность смешения водорода с воздухом, нормализуя при этом длину пламени (уменьшая ее на 15 %) и повышая устойчивость пламени. Это приводило к 25 %-му сокращению эмиссии NO_x по сравнению со струей без акустического возбуждения в том же соотношении скорости между коаксиальной струей воздуха и водородной струей.

В работе [3] исследовано воздействие поперечного акустического поля на поведение круглой и плоской микроструи водорода. Обнаружено явление раздвоения пламени как круглой, так и плоской микроструи водорода. Данное явление коррелировало с поведением пламени при горении круглой и плоской микроструи пропана в поперечном акустическом поле [4]. С другой стороны, было обнаружено некое новое явление в поведении пламени (мы условно назвали его «перетяжкой») на участке выхода струи из сопла. Характеристики перетяжки сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука. Например, геометрические параметры перетяжки изменялись с повышением скорости истечения микроструи, одновременно при этом резко возрастала интенсивность звука, генерируемого горячей струей водорода. Вопрос о том, что же влияет на характеристики развития перетяжки – акустика или скорость струи, требует дальнейших исследований, как и основной вопрос: что это за явление (перетяжка) и каковы причины его возникновения? Определенный ответ на этот вопрос был дан в работе [5], где детально исследована область перетяжки при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от скорости струи и при

различных диаметрах сопла. Показаны особенности возникновения перетяжки, характеристики развития и ее внутренняя структура.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном изучении диффузионного горения водорода в плоских микроструях с различной геометрией щели на срезе сопла. Особое внимание будет уделено исследованию структуры присоединенного пламени, характеристик развития так называемой перетяжки и ее роли в процессе горения плоской микроструи водорода.

Диффузионное горение водорода в плоской микроструе (отношение длины щели сопла к ширине $l/h = 6,7$; длина сопла $l = 2000$ мкм, ширина $h = 300$ мкм)

На рис. 1, взятом из работы [3], можно наблюдать картины раздвоения пламени при горении водорода в присоединенной плоской микроструе под воздействием акустического шума самой струи в зависимости от скорости истечения струи. В данном эксперименте нам не удалось оторвать пламя от среза сопла. Раздвоение пламени было достигнуто только под воздействием акустического поля, генерируемого шумом самой

струи из-за синусоидальной неустойчивости именно плоской струи. Однако, по-видимому, при более низкой интенсивности акустического шума (при меньшей скорости струи) можно реализовать процесс раздвоения струи и пламени от воздействия принудительной акустики, как и в ситуации с раздвоением пламени при горении плоской струи пропана [3].

При рассмотрении структуры раздвоенного пламени на рис. 1 (см. [3]), можно отчетливо увидеть область перетяжки пламени в ближнем поле струи – как в плоскости l , так и в плоскости h . На рис. 2 область перетяжки пламени в ближнем поле струи показана в большем масштабе. Видно, что перетяжка очень напоминает аналогичную область пламени, наблюдаемую в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе с различным диаметром выходного сопла и при различной скорости течения в струе.

С целью более детального рассмотрения данного явления, были проведены экспериментальные исследования с использованием теневого метода (прибор Тёплера) с ножевой (так называемый нож Фуко) визуализирующей и щелевыми осветительными диафрагмами (фотометрический метод). Теневого метода позволяет осуществлять ви-

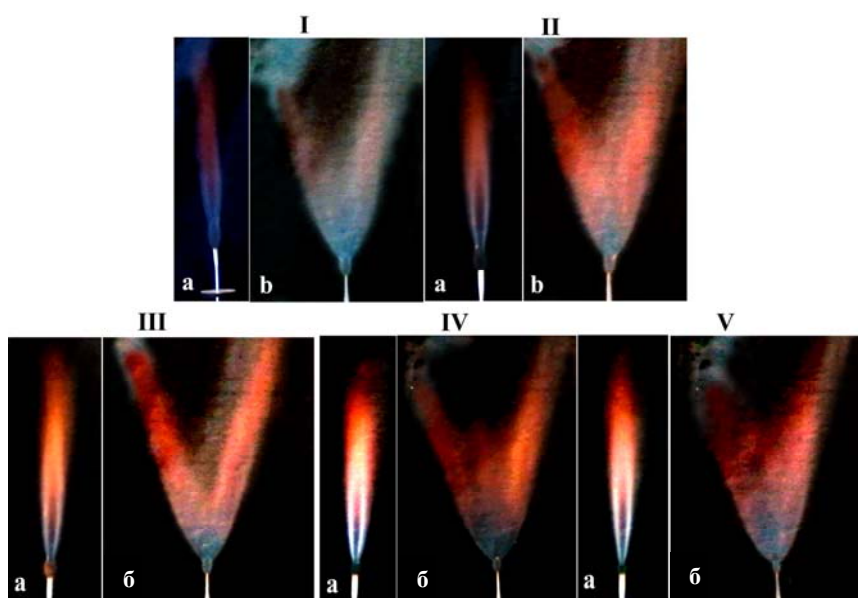
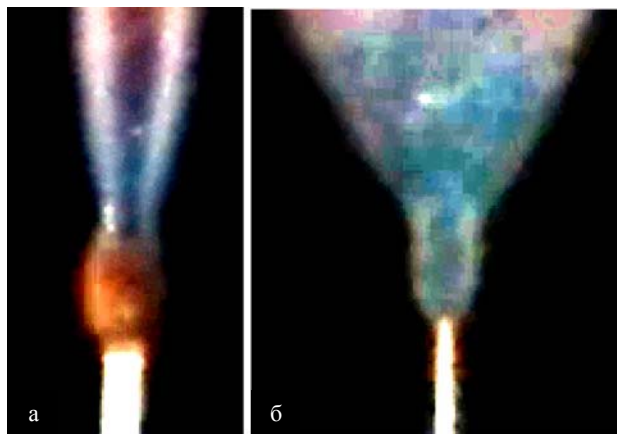


Рис. 1. Картины раздвоения присоединенного пламени в процессе горения плоской микроструи водорода под воздействием акустического поля, генерируемого шумом самой струи: I–V – $U_{\text{струи}} = 260, 288, 322, 387, 450$ м/с соответственно; плоское сопло: $l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм; а, б – картины в плоскости l и h соответственно; уровень шума струи от 60 до 90 дБ при $f \approx 5\text{--}8$ кГц (взято из работы [3])

Рис. 2. Картины области перетяжки раздвоенного присоединенного пламени в процессе горения плоской микроструи водорода под воздействием акустического поля, генерируемого шумом самой струи: $U_{\text{струи}} = 322$ м/с; плоское сопло: $l = 2\,000$ мкм, $h = 300$ мкм; а, б – картины в плоскости l и h соответственно; уровень шума струи от 60 до 90 дБ при $f \approx 5\text{--}8$ кГц



зуализацию течений, содержащих участки постоянного или медленно изменяющегося градиента плотности среды, и используется для визуализации ударных волн, областей сжатия и разрежения, явлений в пограничном слое. Теневой метод позволяет также измерять плотность движущейся газовой среды. В данном случае теневая картина процесса горения микроструи водорода записывалась на цифровую видеокамеру, а затем из видеофильма отбирались отдельные кадры, которые подвергались компьютерной обработке.

На рис. 3 представлена схема эксперимента и набор теневых картин сферической области горения – так называемой перетяжки, в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 3, а–д). Видно, что форма перетяжки с ростом скорости струи трансформируется от эллипсоидной к форме шара, уменьшается ее пространственный размер. Эта область охватывает часть выходного сопла и имеет четко обозначенные границы резкого изменения плотности движущейся и горящей газовой среды смешения водорода и окружающего воздуха. Можно ясно наблюдать ламинарный характер течения струи водорода в области перетяжки до фронта изменения плотности. При переходе струи через этот фронт она становится турбулентной, процесс смешения с воздухом ламинарной струи в области перетяжки с образованием пламени сферической формы меняется на турбулентное смешение с образованием пламени турбулентного горения водорода, что более детально можно наблюдать на рис. 4.

На рис. 4, 5 видно, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается

примерно со скорости истечения струи $U = 167$ м/с. Другой важный аспект процесса горения микроструи водорода связан с причинами образования перетяжки. Связано ли это с характеристиками самого топлива (водорода), процессом его смешения с окружающим воздухом либо с особенностями именно микроструйного горения?

Все это будет рассмотрено ниже. Однако можно сказать определенно, что нигде в научной литературе нам не удалось обнаружить каких-либо упоминаний о данном явлении, т. е. о наличии перетяжек в процессе струйного горения. В данном случае особенно интересен факт проникновения ламинарной струи водорода через барьер (градиент плотности), отделяющий сферическую область пламени (перетяжку) от основного пламени. Именно преодоление ламинарной струей градиента плотности вызывает ее внезапную турбулизацию, турбулентное смешение и горение. С другой стороны, по видимому, процесс смешения ламинарной струи водорода с окружающим воздухом в области ближнего поля приводит к генерации тороидального вихря, горение которого сферически замыкает пламя в данном пространстве (см. рис. 5).

Как видно на рис. 4, 5, размер перетяжки с ростом скорости струи уменьшается. Это наблюдение более отчетливо представлено на рис. 6, где показан график зависимости изменения размера перетяжки (l_1) от скорости струи ($U_0/U_{\text{звука H}_2}$). Здесь же в большем масштабе показана теневая картина перетяжки с детальным представлением особенностей ее отдельных областей.

В отличие от шарообразной формы перетяжки, наблюдаемой при горении круглой

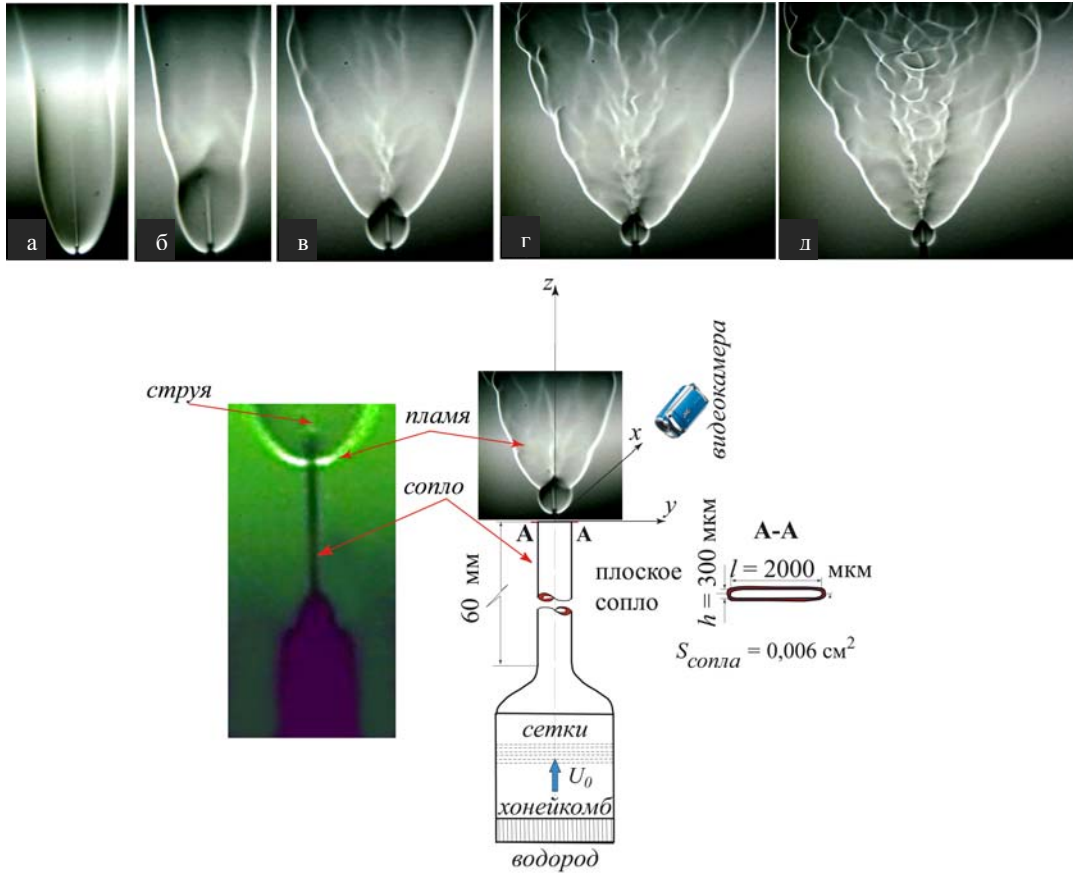


Рис. 3. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 100; б – 167; в – 200; г – 267; д – 333; плоское сопло: $l = 2\,000$ мкм, $h = 300$ мкм, присоединенное пламя

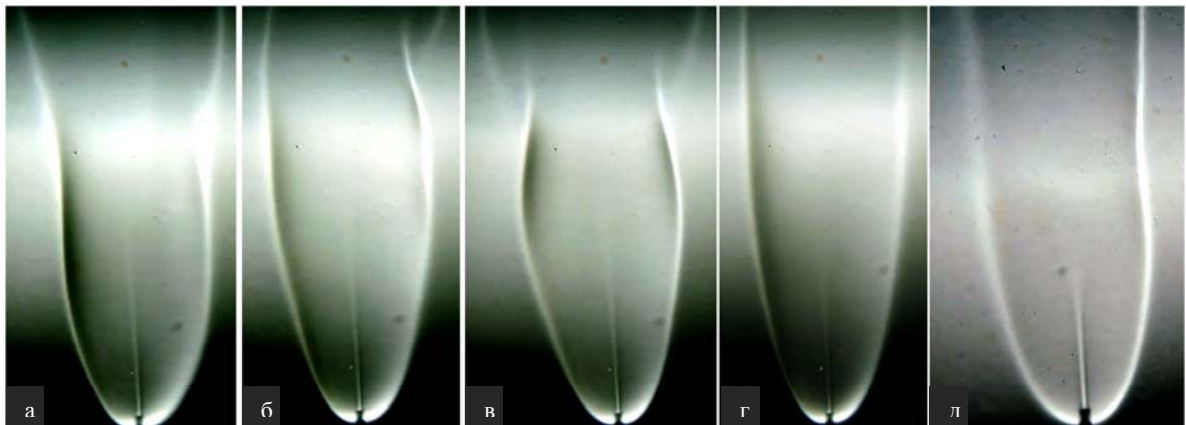


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 100; б – 100; в – 117; г – 133; д – 150; плоское сопло: $l = 2\,000$ мкм, $h = 300$ мкм, присоединенное пламя

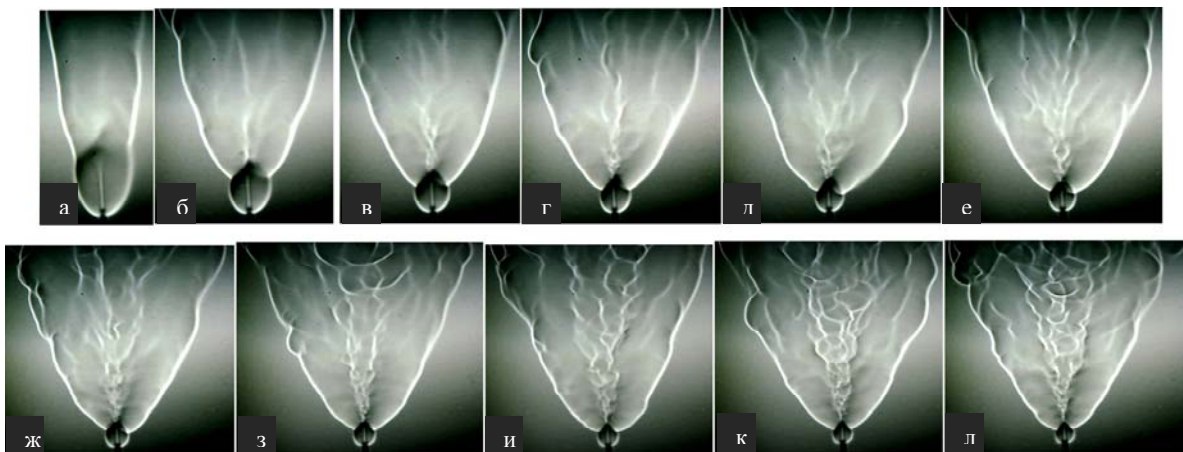


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 167; б – 183; в – 200; г – 217; д – 233; е – 250; ж – 267; з – 283; и – 300; к – 317; л – 333; плоское сопло: $l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм, присоединенное пламя

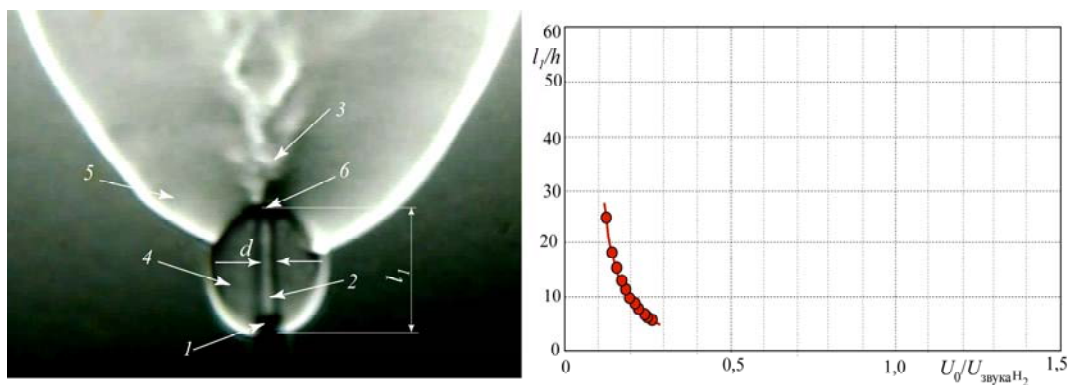


Рис. 6. Теневая картина процесса диффузионного горения плоской струи водорода в ближнем поле: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; б – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера (l_1) сферической области горения водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи (сопло: $l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм, l_1 – размер сферической области, $U_{\text{звук}} \text{H}_2 = 1284$ м/с)

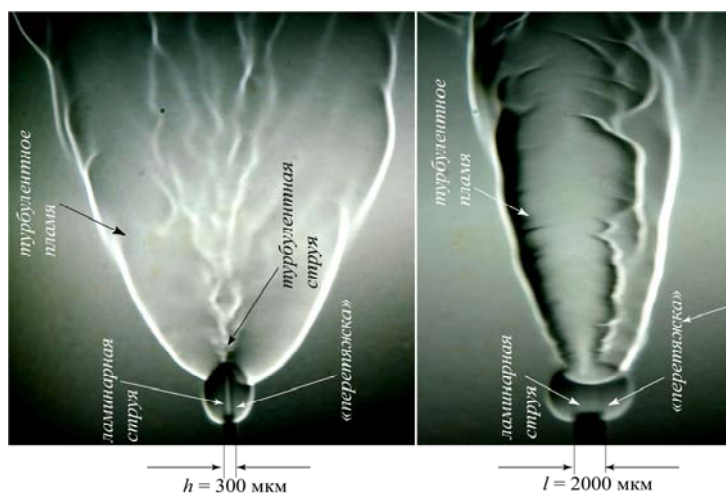


Рис. 7. Теневые картины процесса диффузионного горения плоской струи водорода в двух ракурсах: h и l (сопло: $l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм), $U_{\text{струи}} = 250$ м/с

микроструи [5], в случае горения плоской микроструи она приобретает эллипсоидную форму (рис. 7).

Диффузионное горение водорода в плоской микроструе (отношение длины щели сопла к ширине $l/h = 5,44$; длина сопла $l = 680$ мкм, ширина $h = 125$ мкм)

Результаты исследования горения микроструи водорода (ракурс съемки со стороны «h»)

На рис. 8 представлена схема эксперимента и теневая картина струи водорода без горения (рис. 8, а) и набор теневых картин области горения – так называемой перетяжки, в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 8, б–е). Видно, что с ростом скорости струи уменьшается пространственный размер пе-

ретьяжки. Эта область охватывает часть выходного сопла и имеет четко обозначенные границы резкого изменения плотности движущейся и горячей газовой среды смешения водорода и окружающего воздуха. Можно наблюдать ламинарный характер течения струи водорода в области перетяжки до фронта изменения плотности. При переходе струи через этот фронт она становится турбулентной, процесс смешения с воздухом ламинарной струи в области перетяжки с образованием пламени сферической формы меняется на турбулентное смешение с образованием пламени турбулентного горения водорода, что более детально можно наблюдать на рис. 9.

В целом, характер горения плоской микроструи водорода, истекающей из сопла ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм) аналогичен предыдущему случаю при горении плоской микроструи водорода, истекающей из сопла ($l = 2\,000$ мкм, $h = 300$ мкм).

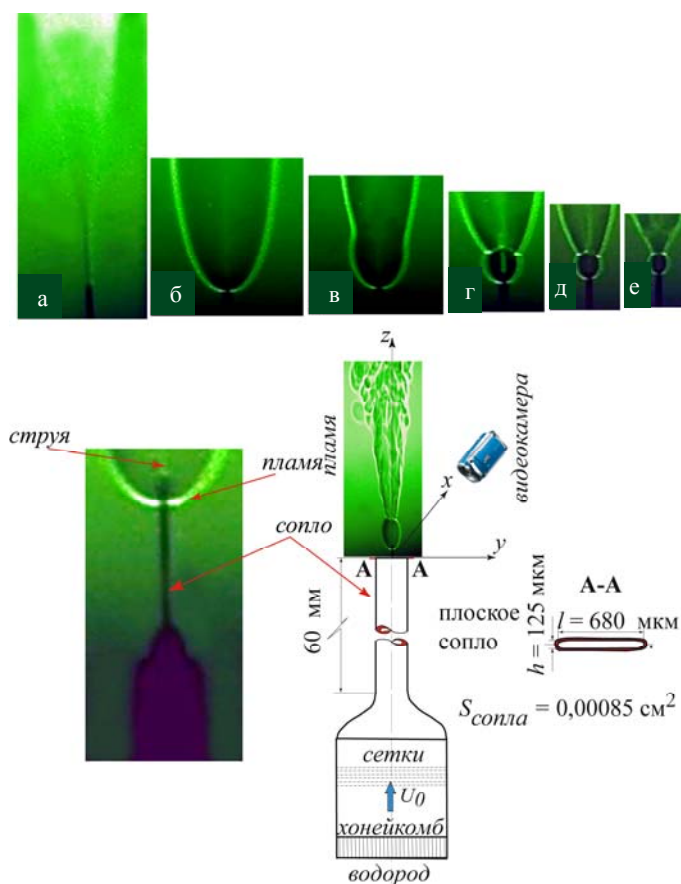


Рис. 8. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 235 (без горения); б – 235 (с горением); в – 353; г – 470; д – 706; е – 941; размер выходного сопла $l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, присоединенное пламя, вид со стороны «h»

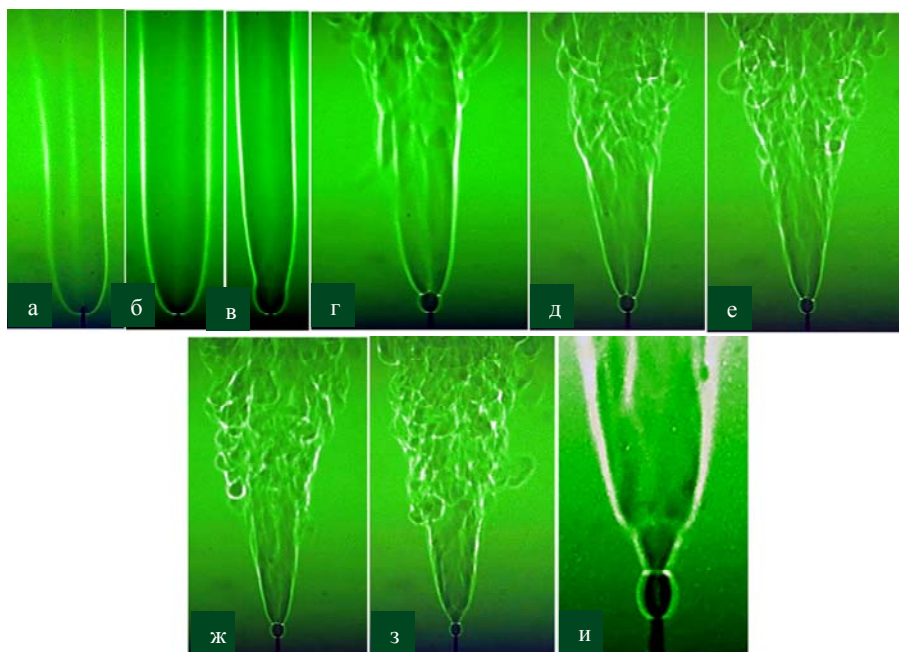


Рис. 9. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 118; б – 235; в – 353; г – 470; д – 588; е – 706; ж – 823; з – 941; и – 941; размер выходного сопла $l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, присоединенное пламя

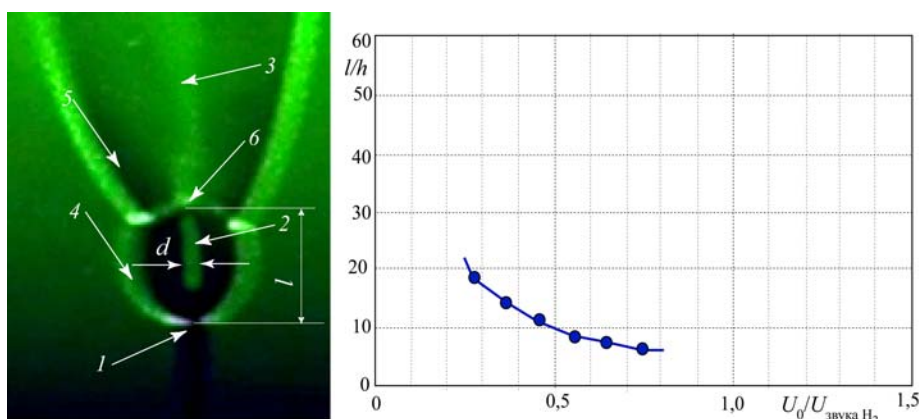


Рис. 10. Теневая картина процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в ближнем поле: 1 – сопло ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, вид со стороны «h»); 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера (l/h) сферической области горения струи водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи ($U_0/U_{\text{звук H}_2}$); l – размер сферической области, $U_{\text{звук H}_2} = 1\,284$ м/с)

На рис. 9 можно наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи $U = 353$ м/с. Пламя в диапазоне скоростей 118–353 м/с (см. рис. 9, а–в) сохраняет ламинарный характер горения. Пламя в области перетяжки при $U = 941$ м/с (см. рис. 9, и)

показано в увеличенном масштабе, где хорошо видно, что в области перетяжки струя водорода имеет ламинарный характер течения, а на выходе из нее струя и пламя становятся турбулентными.

На рис. 10 показана теневая картина диффузионного горения плоской струи во-

дорода с детальным представлением области перетяжки пламени, границы градиента плотности и области развития турбулентной струи и турбулентного пламени. Здесь же показан график зависимости размера перетяжки (l/h) от скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нелинейная, как и в случае, представленном на рис. 6.

Результаты исследования горения микроструи водорода (ракурс съемки со стороны «l»)

На рис. 11 представлена схема эксперимента, теневая картина струи водорода без горения (рис. 11, а) и набор теневых картин сферической области горения – так называемой перетяжки, в ближнем поле пламени

горения при различной скорости истечения струи (рис. 11, б–е).

Видно, что форма перетяжки с ростом скорости струи трансформируется от эллипсовидной к форме шара, уменьшается ее пространственный размер. Эта область охватывает часть выходного сопла и имеет четко обозначенные границы резкого изменения плотности движущейся и горящей газовой среды смешения водорода и окружающего воздуха. Можно наблюдать ламинарный характер течения струи водорода в области перетяжки до фронта изменения плотности. При переходе струи через этот фронт она становится турбулентной, процесс смешения с воздухом ламинарной струи в области перетяжки с образованием пламени сферической формы меняется на турбулентное смешение с образованием пламени турбулентного горения водорода, что более детально можно наблюдать на рис. 12.

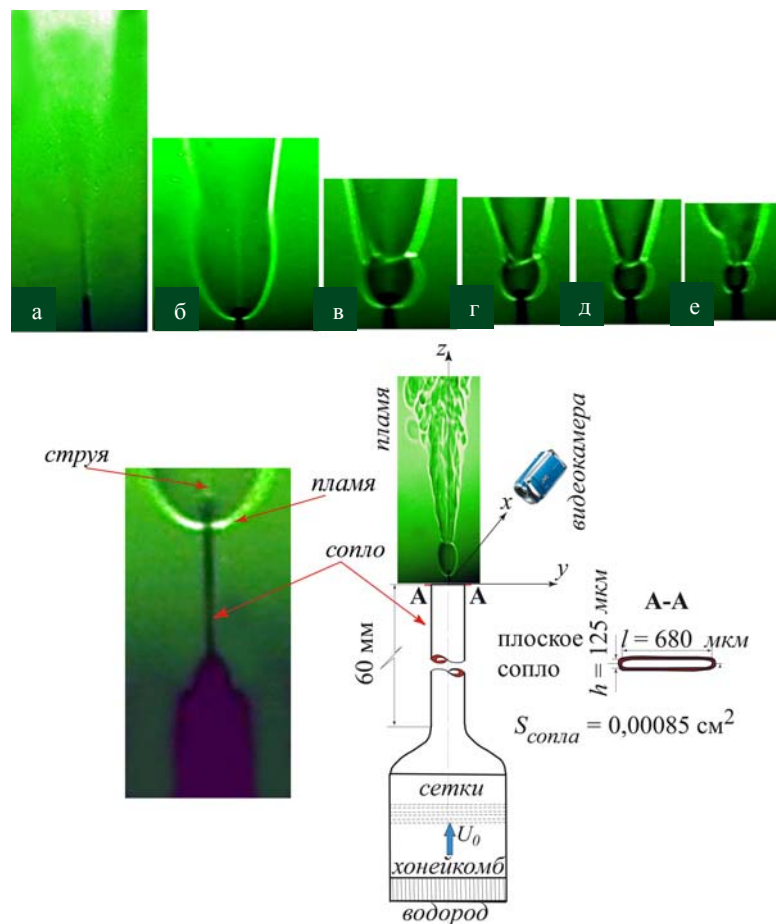


Рис. 11. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи: а – 353 (без горения); б – 353 (с горением); в – 470; г – 588; д – 706; е – 941; размер выходного сопла $l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, присоединенное пламя, вид со стороны «l»

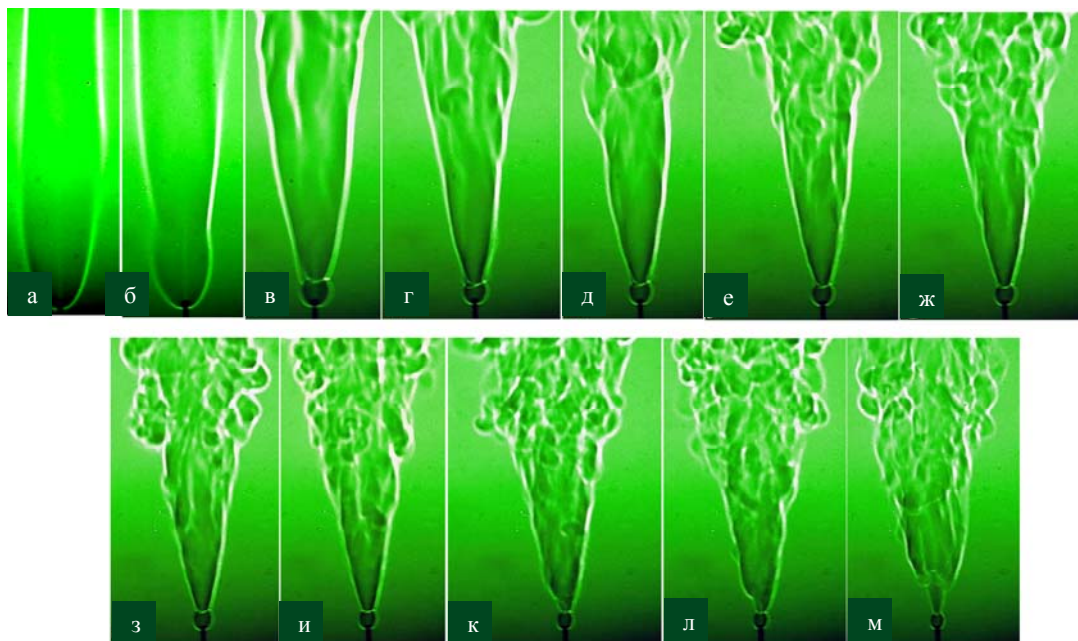


Рис. 12. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 353; б – 353; в – 470; г – 529; д – 588; е – 647; ж – 706; з – 765; и – 823; к – 882; л – 941; м – 976; размер выходного сопла $l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, присоединенное пламя, вид со стороны «л»

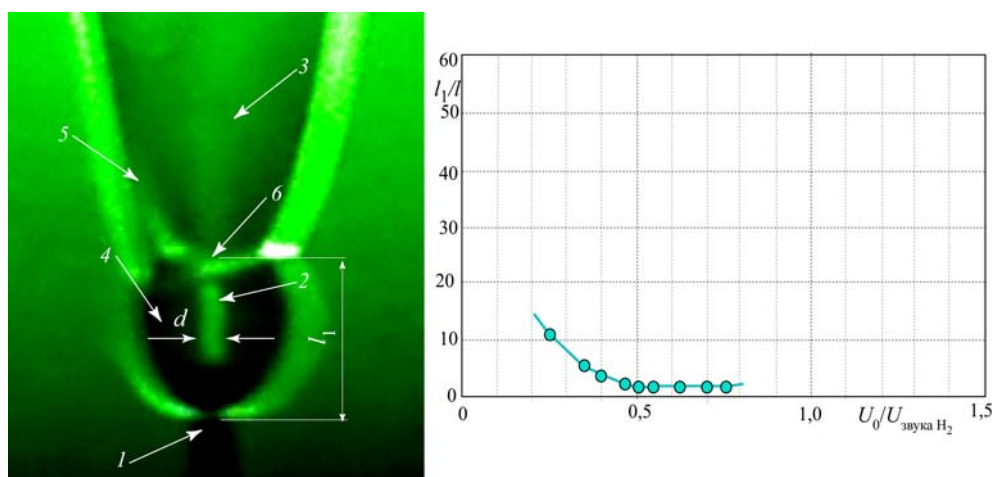


Рис. 13. Теневая картина процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в ближнем поле: 1 – сопло ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, вид со стороны «л»); 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера (l_1/l) сферической области горения струи водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи ($U_0/U_{\text{звук H}_2}$); l_1 – размер сферической области; $U_{\text{звук H}_2} = 1284$ м/с)

В целом, характер горения плоской микроструи водорода, истекающей из сопла ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, вид со стороны «л»), аналогичен предыдущему случаю (вид со стороны «h»). Аналогия соблюдается также со случаем горения плоской микро-

струи водорода, истекающей из сопла ($l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм). На рис. 12 можно наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи $U = 353$ м/с. Пламя при скорости струи 353 м/с (рис. 9, а–б)

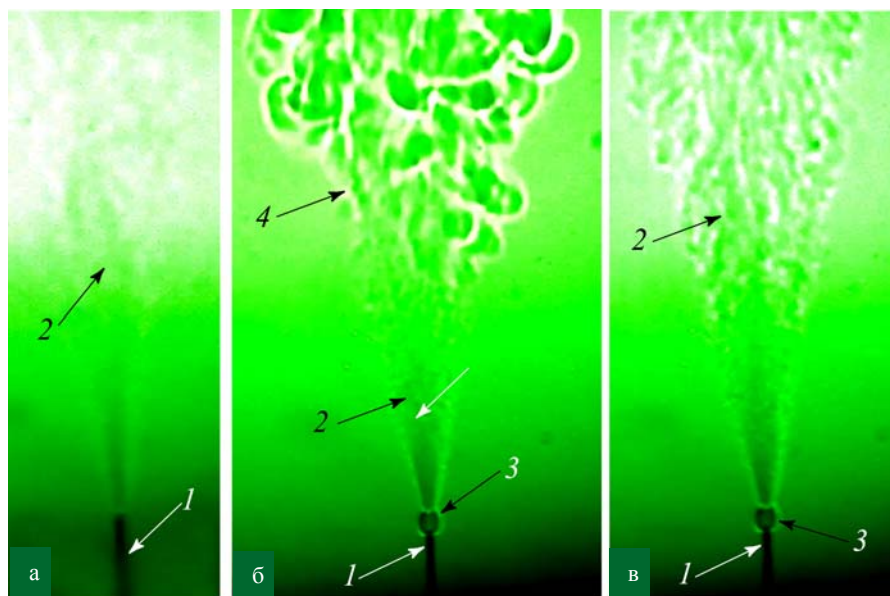


Рис. 14. Теневые картины процесса срыва пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода: а – плоская микроструя водорода без горения ($U = 941$ м/с), б, в – срыв пламени при горении турбулентной микроструи водорода и продолжающемся горении водорода в области перетяжки ($U = 1\,000$ м/с), 1 – сопло ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, вид со стороны «л»); 2 – турбулентная струя без горения; 3 – область перетяжки; 4 – пламя

сохраняет ламинарный характер горения. Появление перетяжки уже наблюдается при данной скорости струи (см. рис. 9, б). На рис. 13 представлен график зависимости размера перетяжки от скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нелинейная, как и в ситуациях, показанных на рис. 6, 10.

На рис. 14 представлены теневые картины процесса срыва пламени при горении плоской микроструи водорода. Видно (рис. 14, б), что при сохранении горения в сферической области перетяжки можно наблюдать его отсутствие в ближнем поле турбулентной струи и наличие пламени далее вниз по потоку (срыв пламени). На рис. 14, в представлена ситуация, когда при сохранении горения в области перетяжки турбулентная струя вообще не горит, и можно наблюдать развитие вниз по потоку чисто турбулентной струи. Данное явление проявляется при достаточно большой скорости истечения струи ($U \geq 1\,000$ м/с). Интересен также факт сохранения в данной ситуации горения смеси водорода с воздухом в области перетяжки. Срыв пламени носит случайный характер, и, по-видимому, это связано с наличием горения в перетяжке, откуда случайным образом могут проникать через

фронт градиента плотности в область турбулентной струи горящие частицы продуктов сгорания. Конечно, данное предположение требует дальнейших исследований. С другой стороны, явление срыва пламени наблюдалось и при исследовании горения круглой микроструи водорода [5].

Диффузионное горение водорода в плоской микроструе (отношение длины щели сопла к ширине $l/h = 30$; длина сопла $l = 3\,000$ мкм, ширина $h = 100$ мкм)

Проведены экспериментальные исследования диффузионного горения плоской микроструи водорода для сопла большого удлинения ($l/h = 30$). Сделано сравнение результатов данного исследования с результатами исследований, полученными выше для микроструй водорода, истекающих из плоских сопел с малым удлинением ($l/h = 5,44$ и $6,7$). На рис. 15 представлена схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи. Видно, что с ростом скорости струи не наблюдается по-

явления области перетяжки. С другой стороны, можно обнаружить развитие чисто ламинарной струи, даже подверженной раздвоению при $U = 200, 230$ м/с, что типично для плоских струй, в частности, под воздействием акустического шума [6], создаваемого в данном случае шумом диффузионно

горящей водородной струи. При этом в ближнем поле развитие пламени сохраняет ламинарный характер, хотя далее вниз по потоку пламя становится турбулентным (рис. 16).

Таким образом, эксперименты показали, что диффузионное горение плоской микро-

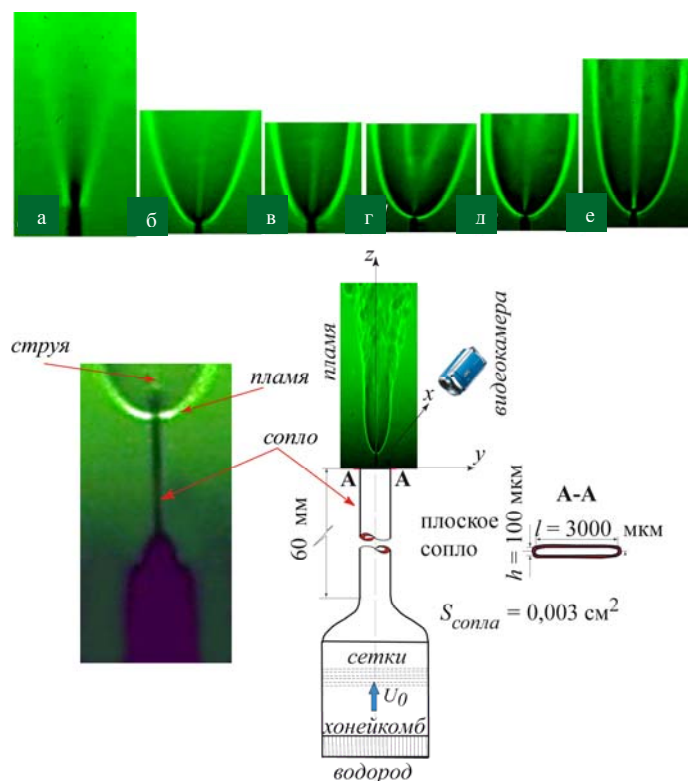


Рис. 15. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в области «перетяжки» пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 400 (без горения), б – 150 (с горением); в – 183; г – 200; д – 233; е – 333; размер выходного сопла $l = 3\,000$ мкм, $h = 100$ мкм, присоединенное пламя, вид со стороны « h »

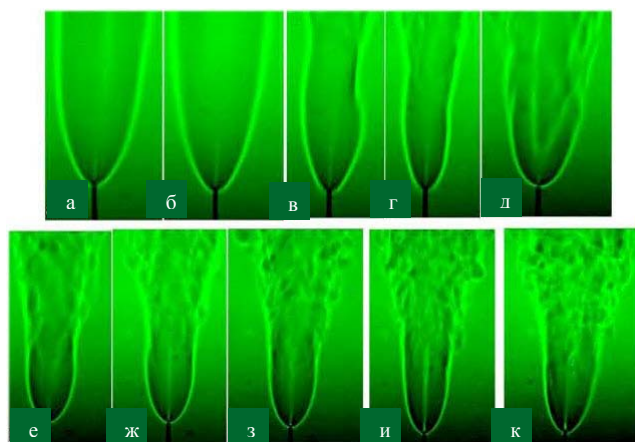


Рис. 16. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи: а – 133; б – 150; в – 166; г – 183; д – 200; е – 233; ж – 266; з – 300; и – 333; к – 367; размер выходного сопла $l = 3\,000$ мкм, $h = 100$ мкм, присоединенное пламя, вид со стороны « h »

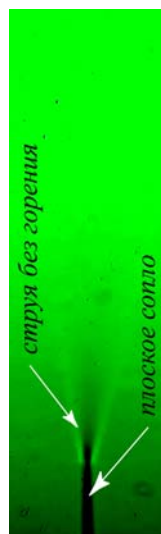


Рис. 17. Теневая картина срыва пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода, истекающей из сопла ($l = 3\,000$ мкм, $h = 100$ мкм) на скорости $U = 400$ м/с, присоединенное пламя, вид со стороны « h »

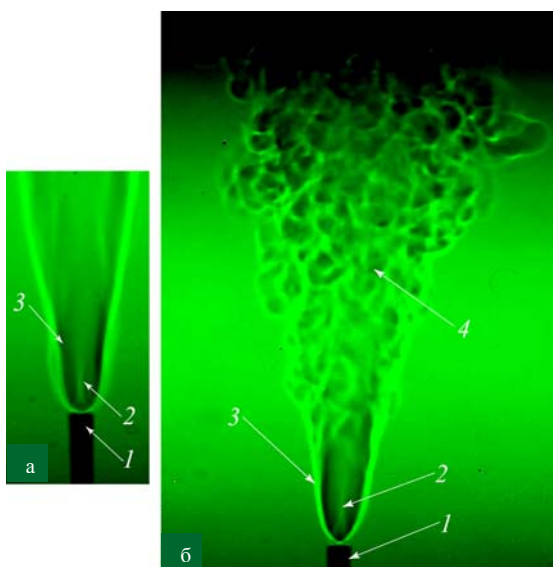


Рис. 18. Теневые картины пламени при диффузионном горении плоской микроструи водорода, истекающей из сопла ($l = 3\,000$ мкм, $h = 100$ мкм) на скорости $U = 200$ м/с (а) и $U = 367$ м/с (б), присоединенное пламя, вид со стороны « l »: 1 – микросопло, 2 – ламинарная струя, 3 – ламинарное пламя, 4 – турбулентное пламя

струи большого удлинения ($l/h = 30$) не связано с образованием области перетяжки пламени в ближнем поле, что резко отличается от результатов исследования плоской микроструи малого удлинения ($l/h = 5,44$ и $6,7$), где возникает область перетяжки пламени.

Обнаружен срыв пламени при большой скорости струи ($U = 400$ м/с) в условиях горения микроструи водорода, истекающей из плоского сопла длиной $l = 3\,000$ мкм и шириной $h = 100$ мкм (рис. 17).

При срыве пламени можно наблюдать развитие турбулентной струи водорода в отсутствие горения. Теневые картины развития пламени при диффузионном горении плоской микроструи, снятые со стороны « l », показаны на рис. 18. Видно, что развитие как струи, так и пламени в плоскости « l » аналогично их развитию в плоскости « h », т. е. в обоих случаях отсутствует область перетяжки пламени.

Обсуждение результатов экспериментов

При исследовании диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из сопла малого удлинения ($l/h = 5,44$ и $6,7$), обнаружено, как и в случае горения круглой микроструи водорода [5], новое явление, которое, по-видимому, ранее никем не наблюдалось. Это явление связано с возникновением в ближнем поле горения плоской микроструи водорода замкнутой сферической области – так называемой перетяжки, где идет процесс смешения чисто ламинарной водородной струи с окружающим воздухом. Причем данная область устойчива к внешнему воздействию, имеет форму, близкую к эллипсоидной, ее пространственный размер постепенно уменьшается с ростом скорости истечения микроструи. Важной особенностью области перетяжки является то, что она окружена мощным барьером градиента плотности газа, при преодолении которого ламинарная струя мгновенно становится турбулентной. Эксперименты показали, что в области перетяжки горение водорода имеет ламинарный характер с ламинарным пламенем, а вне этой области – турбулентный характер с типичным турбулентным пламенем. С другой стороны, исследования диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из сопла большого удлинения ($l/h = 30$), показали отсутствие области перетяжки.

Возникает вопрос, с чем это связано? На рис. 19 показаны теневые картины диффузионного горения водорода в ближнем поле плоской микроструи с образованием облас-

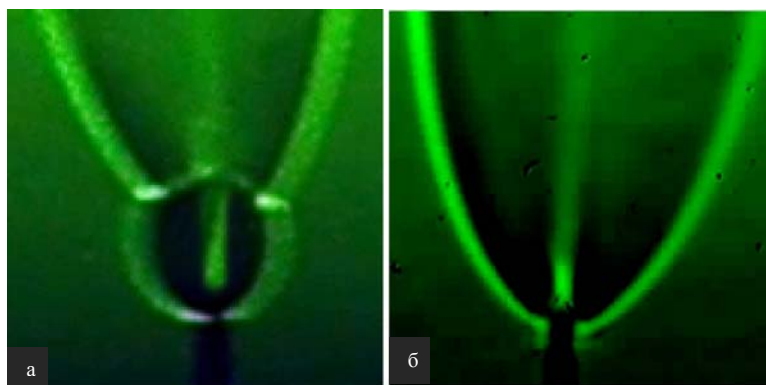


Рис. 19. Теневые картины пламени в ближнем поле при диффузионном горении плоской микроструи водорода, истекающей из сопла $l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм, $l/h = 5,44$ на скорости $U = 470$ м/с (а) и из сопла $l = 3000$ мкм, $h = 100$ мкм, $l/h = 30$ на скорости $U = 367$ м/с (б); присоединенное пламя, вид со стороны «h»

ти перетяжки (а) и ее отсутствием (б). Видно, что, как и в случае диффузионного горения водорода в круглой микроструе ($d \leq 3$ мм) [5], диффузионное горение водорода в ближнем поле плоской микроструи с малым удлинением сопла ($l/h = 5,44$ и $6,7$) сопровождается образованием области перетяжки. Однако при большом удлинении плоского сопла ($l/h = 30$) теневая картина (см. рис. 9, б) демонстрирует наличие ламинарной струи и пламени в ближнем поле горения водорода и отсутствие даже намека на возможность возникновения перетяжки.

Таким образом, эксперименты показали, что, по-видимому, образование области перетяжки при горении как круглой, так и плоской микроструи водорода является особенностью горения именно микроструй, по крайней мере до диаметра сопла круглой микроструи $d \leq 3$ мм и удлинения плоской микроструи $l/h \leq 10$.

Одно из предположений относительно причин возникновения и отсутствия перетяжки в ситуации горения круглой микроструи водорода [5] было отнесено к характеру распределения средней скорости на срезе сопла. Аналогичное предположение можно было бы отнести и к настоящей ситуации, однако в нашем случае профиль скорости на срезе плоского сопла скорее параболический, чем ударный. Отсутствие мощного градиента скорости на периферии струи в случае параболического профиля скорости на срезе сопла, который мог бы препятствовать замыканию области перетяжки пламени при горении водорода в пло-

ской микроструе не позволяет объяснить отсутствие перетяжки пламени в случае большого удлинения сопла ($l/h = 30$) плоской микроструи. Здесь скорее играет роль не профиль скорости на срезе сопла, а сам факт большого удлинения сопла, но для понимания физики данного влияния требуются дополнительные исследования.

Другое предположение можно связать с особенностями гидродинамических и химических характеристик водорода и его горения. Тем не менее законченного понимания природы возникновения такого нового явления, как перетяжка при горении плоской микроструи водорода, пока не существует, и требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении, особенно в области химической кинетики.

Список литературы

1. Jeongseog Oh, Pilwon Heo, Youngbin Yoon. Acoustic excitation effect on NO_x reduction and flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air // International journal of hydrogen energy. 2009. Vol. 34. P. 7851–7861.
2. Munki Kim, Youngil Choi, Jeongseog Oh, Youngbin Yoon. Flame – vortex interaction and mixing behaviors of turbulent non-premixed jet flames under acoustic forcing // Combustion and Flame. 2009. Vol. 156. P. 2252–2263.
3. Козлов В. В., Грек Г. П., Коробейников О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения водорода в круглой и

плоской микроструе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.

4. 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 мини и микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 98–119.

5. 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.

6. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 208 с.

Материал поступил в редколлегию 09.04.2015

**Yu. A. Litvinenko¹, G. R. Grek¹, V. V. Kozlov^{1,2}
O. P. Korobeinichev³, A. G. Shmakov^{2,3}**

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

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

³ *Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

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

STRUCTURE OF THE ATTACHED FLAME DURING DIFFUSION HYDROGEN MICROJET COMBUSTION (SLOTTED NOZZLE)

The purpose of this work is experimental study of diffusion combustion of the plane hydrogen microjet with different slotted nozzle dimensions. The new phenomenon is revealed during combustion of a plane hydrogen microjet, which we have named «bottleneck», as well as in a situation of a round microjet combustion. The special attention has been given to research of characteristics of the «bottleneck» development and its role during of a hydrogen plane microjet combustion. It is shown, that «bottleneck» represents the closed spherical area of the hydrogen with air mixture combustion in a jet near-field. The «bottleneck» area is closed by a powerful density gradient. It is found, that the laminar hydrogen jet in this area overcomes a density gradient of gas, becomes turbulent and combustion process is accompanied both a turbulent jet, and a turbulent flame further downstream evolution. It is shown, that the spatial size of a «bottleneck» decreases with growth of a jet velocity. It is found, that «bottleneck» does not arise in case of the big nozzle lengthening ($l/h > 10$)

Keywords: round hydrogen microjet, hydrogen diffusion combustion, schlieren method, shadow patterns.