

**А. Г. Шмаков**<sup>1,2</sup>, **Г. Р. Грек**<sup>3</sup>, **В. В. Козлов**<sup>2,3</sup>  
**О. П. Коробейничев**<sup>1</sup>, **Ю. А. Литвиненко**<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

<sup>3</sup> *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  
korobein@kinetics.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru*

## **РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ КРУГЛОЙ СТРУИ ВОДОРОДА В ВОЗДУХЕ \***

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании диффузионного горения круглой микроструи водорода с различным диаметром выходного сопла. Обнаружено новое явление в процессе горения микроструи водорода, которое мы условно назвали перетяжкой пламени. Особое внимание было уделено исследованию характеристик развития перетяжки пламени и его роли в процессе диффузионного горения круглой 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 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.

*Ключевые слова:* круглая 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 полагает 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.

*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.

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  $\text{NO}_x$ .

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  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$ . 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  $\text{NO}_x$ . 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  $\text{NO}_x$  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 микроструй водорода. Обнаружено явление раздвоения пламени как круглой, так и плоской микроструи водорода. Данное явление коррелировало с поведением пламени при горении круглой и плоской микроструй 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?

Цель настоящей работы в связи с этим состоит в экспериментальном изучении диффузионного горения круглых микроструй водорода различного диаметра при

его истечении в воздух. Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития так называемой перетяжки и ее роли в процессе горения круглой микроструи водорода.

### Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при выходном диаметре сопла 1 000 мкм

На рис. 1, взятом из работы [3], можно наблюдать изменение геометрических параметров (формы и размеров) перетяжки пламени с ростом скорости истечения круглой микроструи водорода из сопла диаметром 1 000 мкм. Видно, что форма участка пламени от сопла до перетяжки с ростом скорости струи постепенно трансформируется от эллипсоидной к шарообразной, и уменьшается его объем. 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). Теневой метод позволяет осуществлять визуализацию 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 отби-

рались отдельные кадры, которые подвергались компьютерной обработке.

На рис. 2 представлена схема эксперимента и теневая картина струи водорода без горения (рис. 2, *а*) и набор теневых картин сферической области горения (от сопла до так называемой перетяжки) в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 2, *б–е*).

Видно, что форма участка пламени от сопла до перетяжки с ростом скорости струи трансформируется от эллипсоидной формы к форме шара, уменьшается его 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 от сопла до перетяжки (до фронта изменения плотности). При прохождении 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. 3.

На рис. 3 можно также наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи  $U = 200$  м/с. Другой важный аспект процесса горения микроструи водорода связан с причинами образования перетяжки. Связано это с характеристиками самого топлива (водорода) или с процессом его смешения с окружающим воздухом, или с осо-

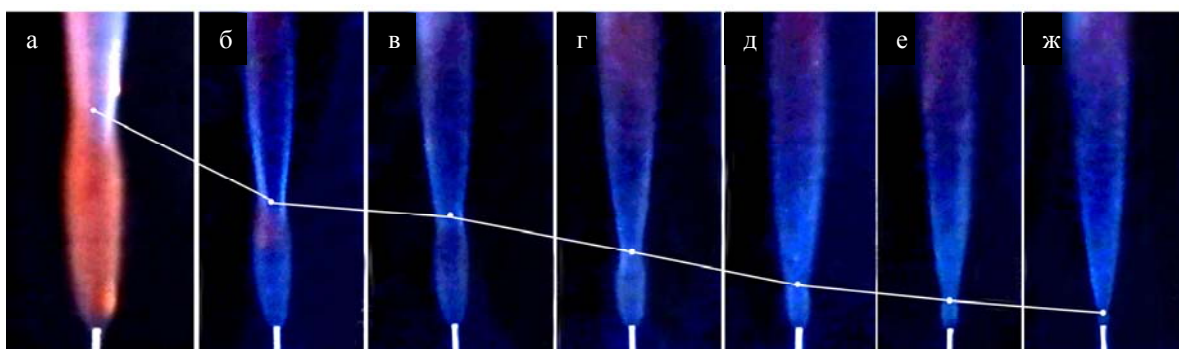


Рис. 1. Уменьшение «перетяжки» пламени в процессе горения круглой микроструи водорода в зависимости от скорости струи (м/с): *а* – 98; *б* – 172; *в* – 197; *г* – 246; *д* – 270; *е* – 295; *ж* – 344; диаметр выходного сопла  $d = 1\ 000$  мкм, присоединенное пламя без акустического воздействия

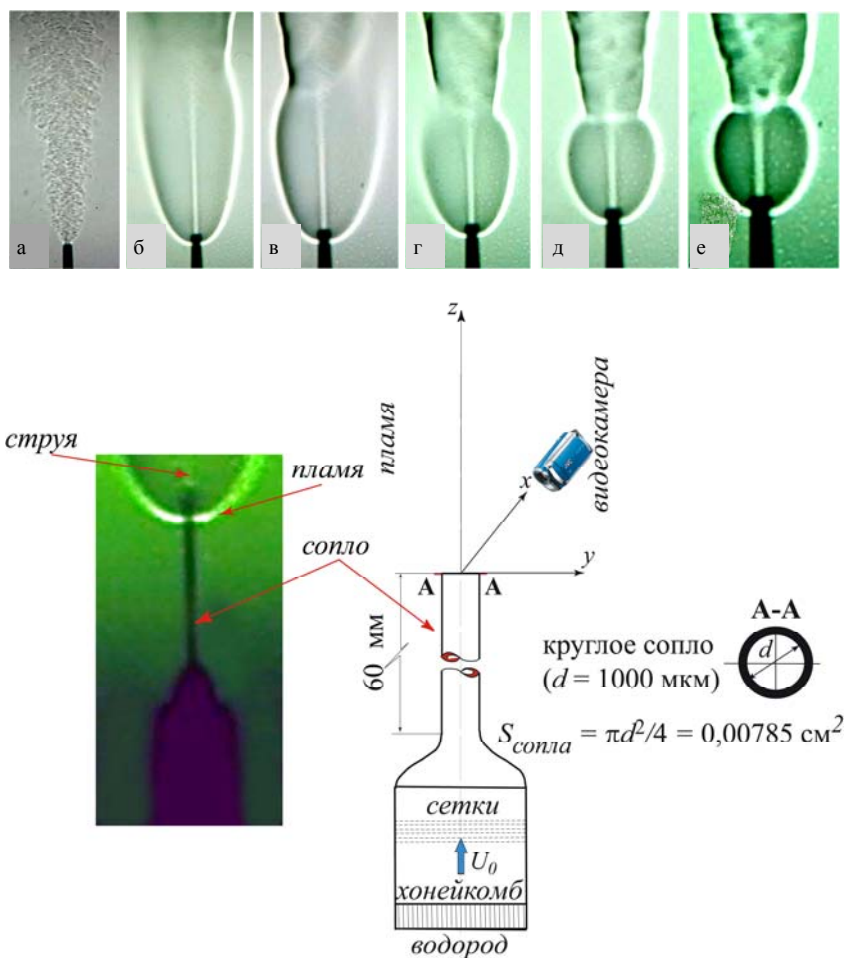


Рис. 2. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода в области от сопла до «перетяжки» пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 484; б – 229; в – 255; г – 306; д – 382; е – 408; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм, присоединенное пламя

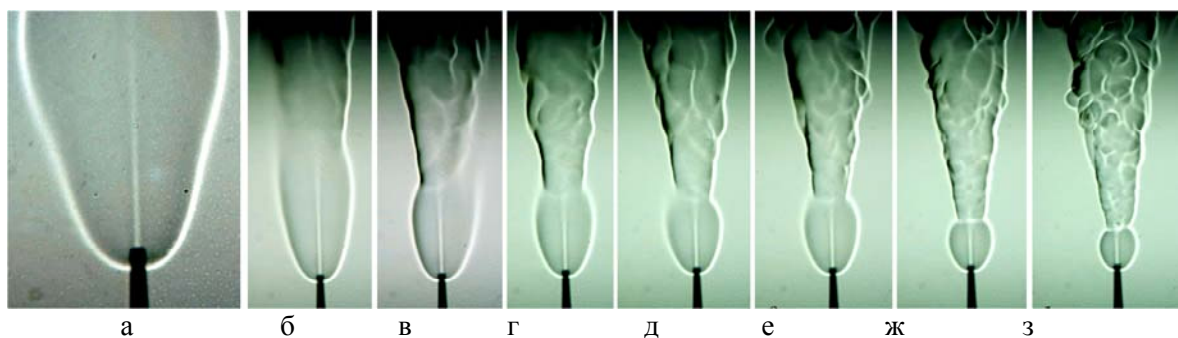


Рис. 3. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 76; б – 229; в – 255; г – 280; д – 306; е – 331; ж – 382; з – 408; диаметр выходного сопла  $d = 1\,000$  мкм, присоединенное пламя

бенностями именно микроструйного горения? Все это мы рассмотрим в статье позднее. 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 (от сопла до перетяжки) от основного пламени. Именно преодоление ламинарной струей градиента плотности вызывает ее внезапную турбулизацию, интенсификацию турбулентного смешения горючего и окислителя и их 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 (рис. 4).

На рис. 5 показаны теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от ее скорости в более крупном масштабе. Хорошо видны области ламинарной и турбулентной струи, ламинарного и турбулентного пламени, а также показана теневая картина турбулентной струи в отсутствие ее горения.

Нам не удавалось оторвать от среза сопла пламя при горении водорода в микроструе, т. е. создать так называемое приподнятое пламя. Однако в определенных условиях это удалось для приподнятого турбулентного пламени, но лишь на 2 мм. Данный режим оказался неустойчивым и ситуация быстро возвращалась к обычному режиму горения (рис. 6).

Как видно из рис. 3, с ростом скорости струи размер сферической области горения (от сопла до перетяжки) уменьшается. На рис. 7 представлен график зависимости размера этой области от скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нелинейная.

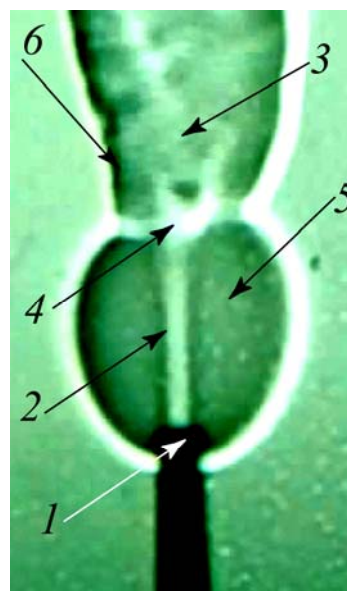


Рис. 4. Теневая картина диффузионного горения круглой струи водорода: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – турбулентная струя; 4 – фронт градиента плотности среды; 5 – область ламинарного пламени перетяжки; 6 – турбулентное пламя; диаметр выходного сопла  $d = 1\,000$  мкм, присоединенное пламя

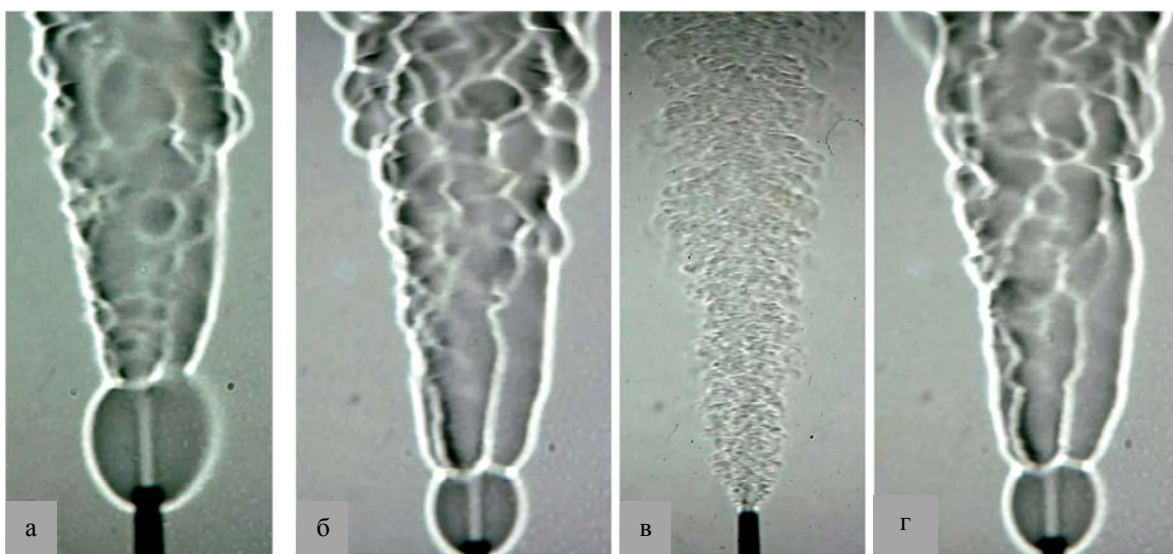


Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода при различной скорости истечения струи (м/с): а – 433; б – 484; в – 509; и теневая картина круглой струи водорода в отсутствие ее горения (в – 484 м/с); диаметр выходного сопла  $d = 1\,000$  мкм, присоединенное пламя

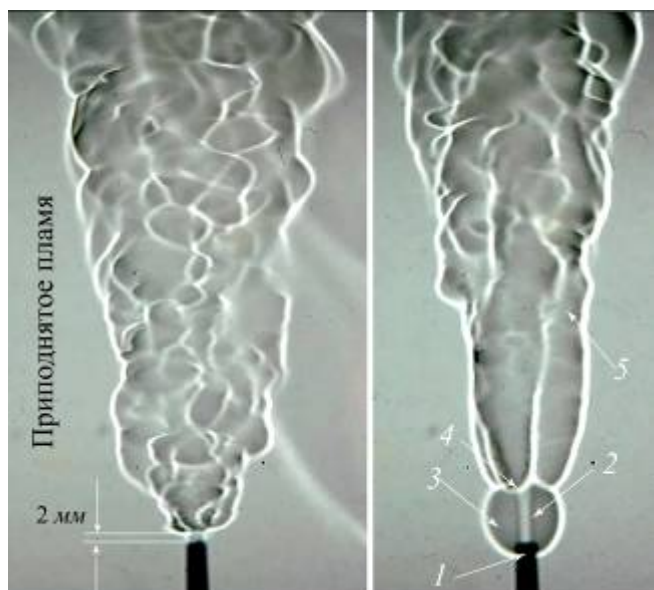


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в процессе горения приподнятого турбулентного пламени (слева) и резкого скачка к горению с наличием сферической области горения ламинарной струи водорода в ближнем поле (справа): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – сферической области смешения и горения ламинарной струи; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – пламя при горении турбулентной струи водорода,  $U = 484$  м/с

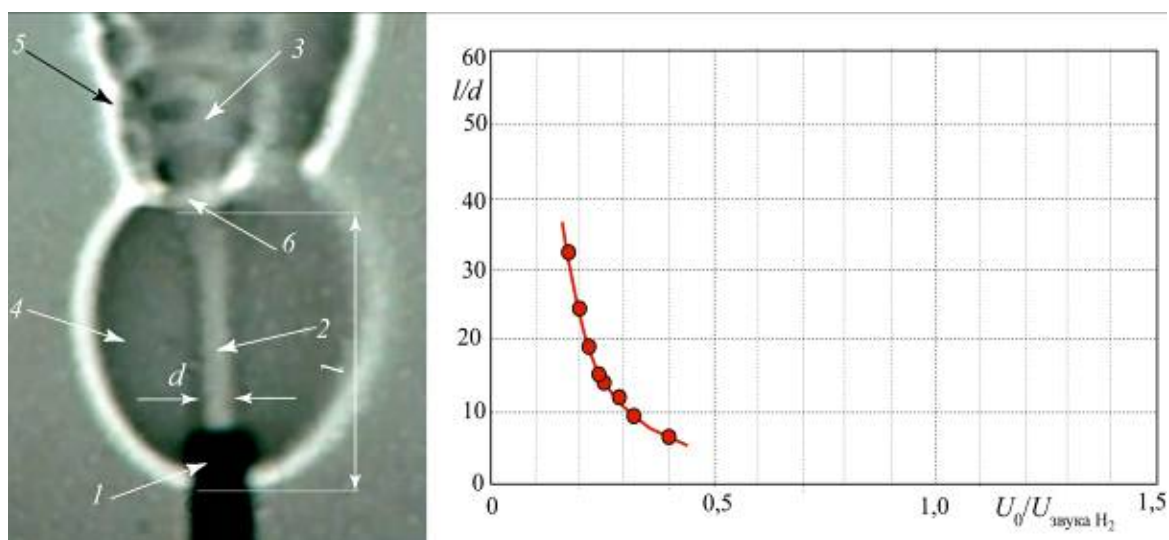


Рис. 7. Теневая картина процесса диффузионного горения круглой струи водорода в ближнем поле: 1 – сопло ( $d = 1\,000$  мкм); 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера сферической области горения струи водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи ( $d$  – диаметр ламинарной струи,  $l$  – размер сферической области,  $U_{\text{звук H}_2} = 1\,284$  м/с)

### Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при выходном диаметре сопла 500 мкм

На рис. 8 представлены схема эксперимента, теневая картина струи водорода без горения (рис. 8, а) и несколько теневых картин сферической области горения от сопла до так называемой перетяжки в ближнем

поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 8, б–ж). Видно, что форма этой зоны 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 горячей газовой среды смешения водорода и окружающего

воздуха. Наблюдается ламинарный характер течения струи водорода в области от сопла до 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 круглой микроструи водорода, истекающей из сопла диаметром 500 мкм, аналогичен предыдущему случаю при горении круглой микроструи водорода, истекающей из сопла диаметром 1 000 мкм. На рис. 9 можно также наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи  $U = 300$  м/с. В области скорости истечения микроструи от 102 до 255 м/с, пламя сохраняет лами-

нарный характер развития в процессе горения.

На рис. 10 представлены теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи, но в более крупном, чем на рис. 9, масштабе.

Здесь также можно наблюдать картину срыва пламени при скорости  $U = 663$  м/с (рис. 10, з) и два случая: турбулентной струи без горения, но с наличием горения в области от сопла до перетяжки  $U = 765$  м/с (рис. 10, и) и турбулентной струи без горения и без области перетяжки  $U = 816$  м/с (рис. 10, к). Можно высказать предположение о природе и особенностях этих двух случаев. В первом случае (рис. 10, и), ламинарное горение в области перетяжки может способствовать воспламенению турбулентной микроструи при уменьшении ее скорости. Таким образом, это явление позволяет добиться более устойчивого горения в слу-

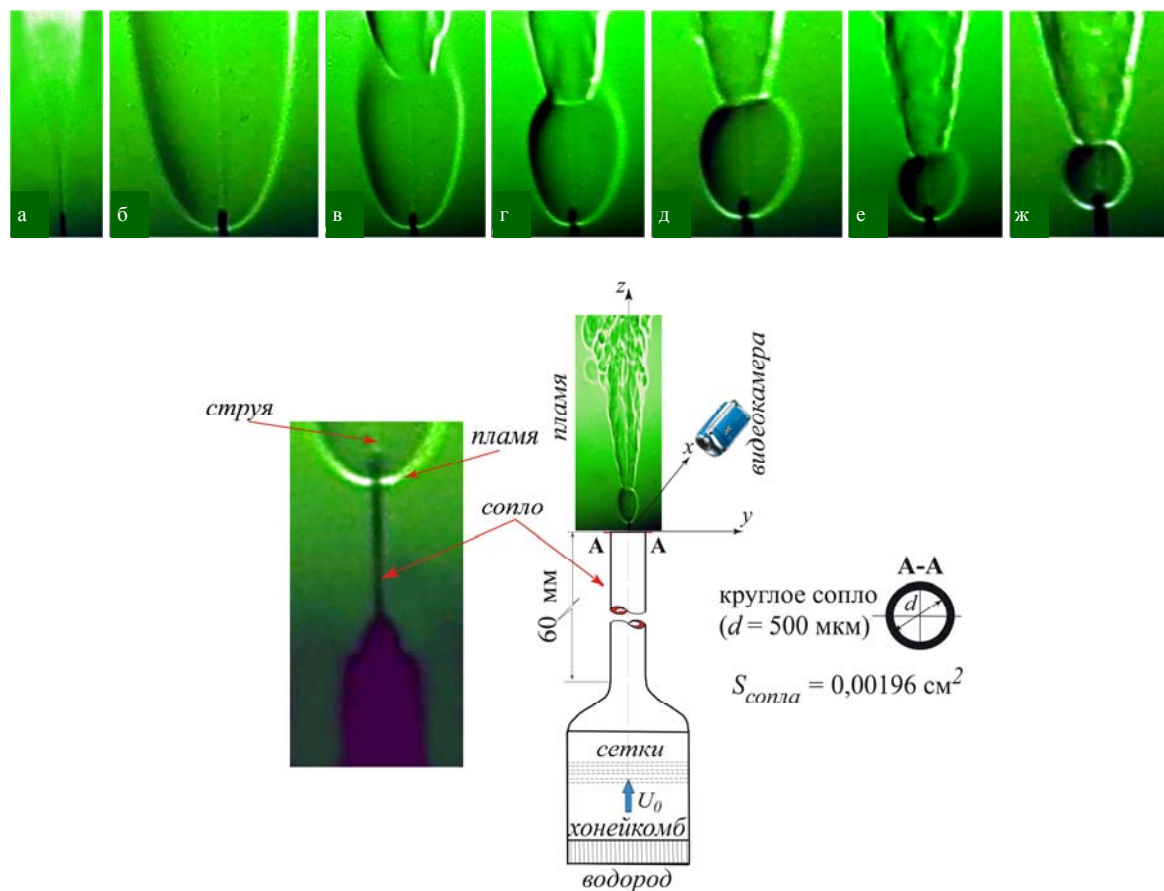


Рис. 8. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 102; б – 229; в – 306; г – 357; д – 459; е – 510; ж – 561; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм, присоединенное пламя

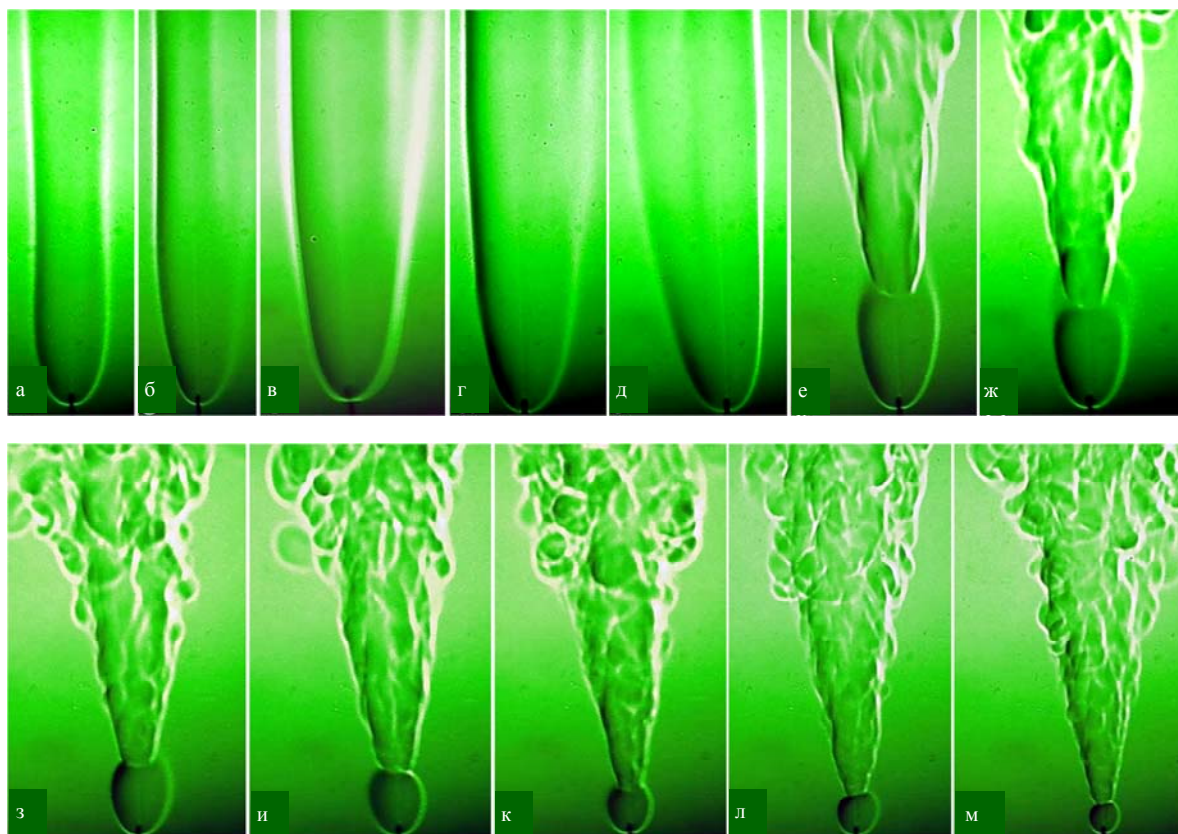


Рис. 9. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 102; б – 153; в – 204; г – 229; д – 255; е – 306; ж – 357; з – 434; и – 459; к – 485; л – 510; м – 561; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм, присоединенное пламя

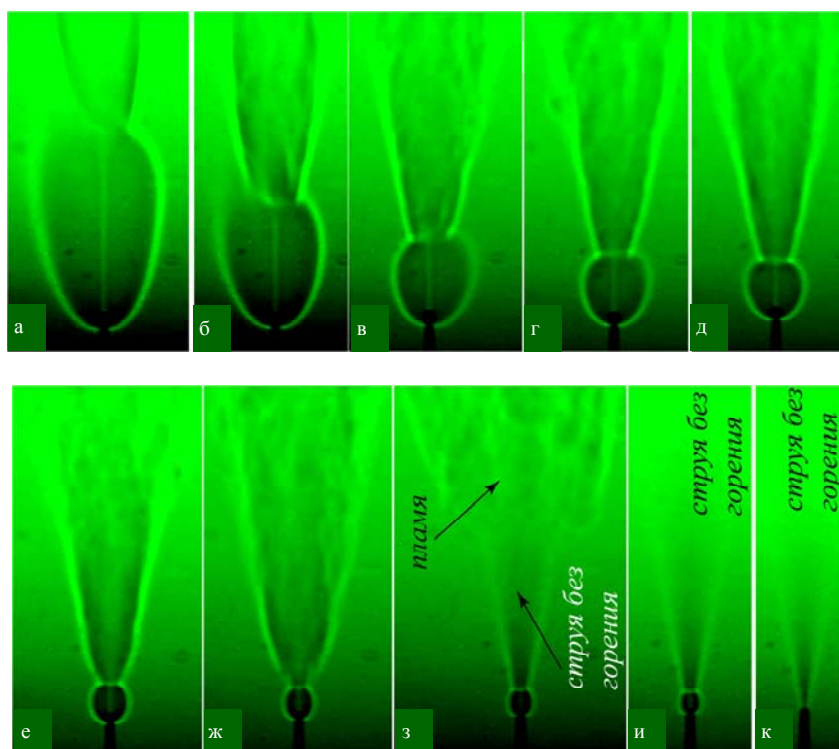


Рис. 10. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 306; б – 357; в – 408; г – 459; д – 510; е – 561; ж – 612; з – 663; и – 765; к – 816; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм ( $S_{\text{сопла}} = \pi d^2/4 = 0,00196 \text{ см}^2$ ), присоединенное пламя



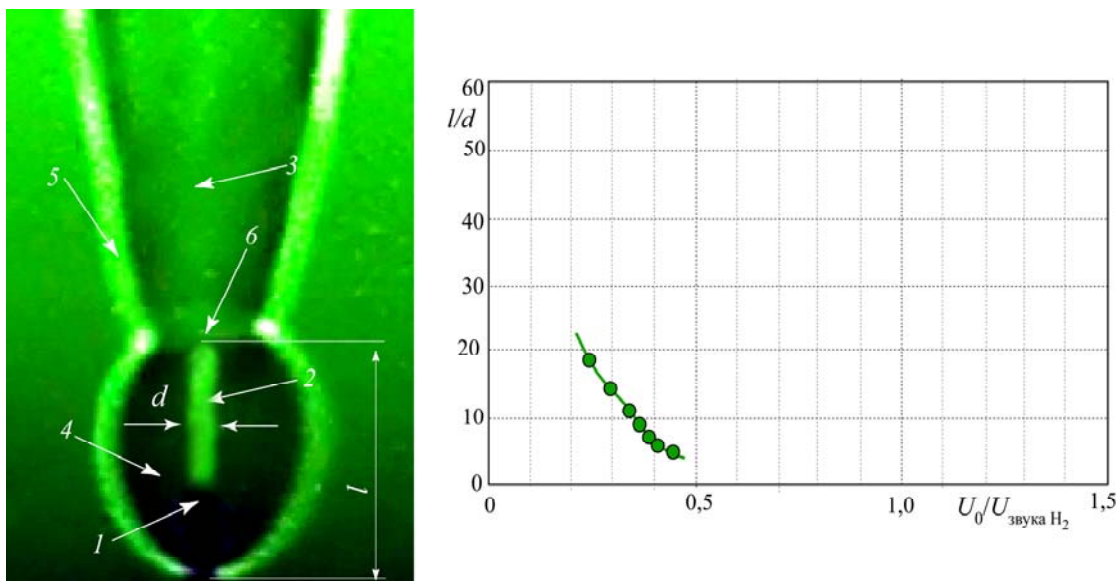


Рис. 11. Теневая картина процесса диффузионного горения круглой струи водорода в ближнем поле: 1 – сопло ( $d = 500$  мкм); 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера сферической области горения струи водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи ( $d$  – диаметр ламинарной струи;  $l$  – размер сферической области;  $U_{\text{звук H}_2} = 1\,284$  м/с)

чае существенных колебаний скорости струи водорода, так как после срыва горения турбулентного пламени при увеличении скорости потока водорода оно самовоспламеняется после снижения скорости истечения водородной струи. Во втором случае (рис. 10, к) воспламенение турбулентной микроструи возможно лишь при внешнем поджигании струи водорода. На рис. 11 представлен график зависимости размера зоны от сопла до перетяжки как функции скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нелинейная, как и в случае на рис. 7.

Экспериментально была исследована ситуация горения круглой микроструи водорода с приподнятым пламенем, осуществленным с помощью поджигания турбулентной микроструи водорода сверху, т. е. вдали от среза сопла (рис. 12, 13). Видно, что приподнятое пламя распространяется лишь на турбулизированный участок струи, тогда как ламинарный ее участок не затронут горением. С ростом скорости струи приподнятость пламени остается практически на одной высоте, примерно на 4 мм (рис. 13, а–г). На рис. 13, д показана теневая картина горения микроструи водорода при ее поджигании

снизу, т. е. вблизи среза сопла. Видно, что в данной ситуации процесс горения происходит по сценарию, описанному выше, т. е. с наличием сферической области горения в ближнем поле микроструи – от сопла до так называемой перетяжки.

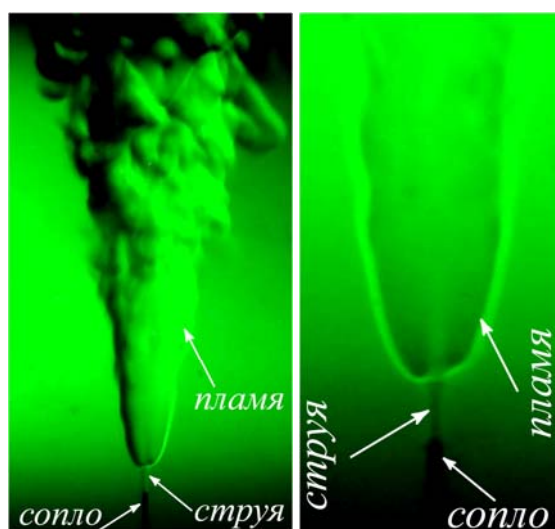


Рис. 12. Теневые картины приподнятого пламени в процессе диффузионного горения круглой струи водорода,  $U = 306$  м/с

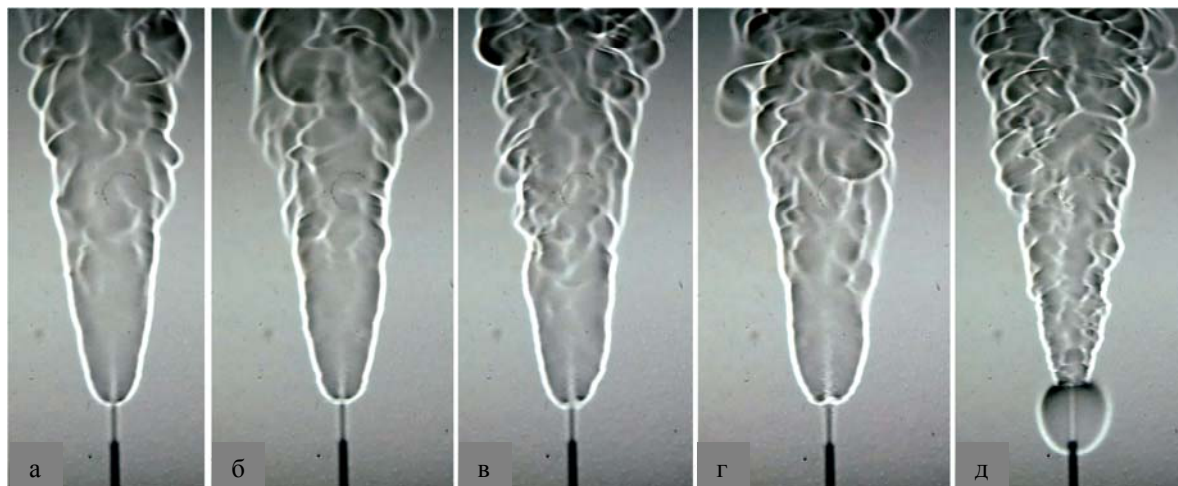


Рис. 13. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в случае приподнятого пламени при поджигании сверху в зависимости от скорости истечения струи (м/с):  $a - 382$ ;  $b - 402$ ;  $c - 434$ ;  $e = 459$ , и присоединенного пламени при поджиге снизу:  $e - 459$ ; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм

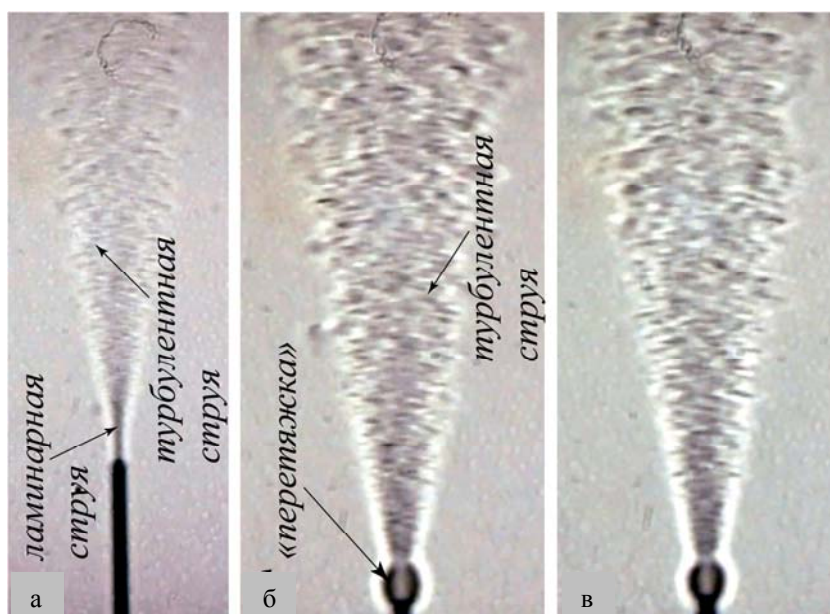


Рис. 14. Теневые картины круглой микроструи водорода в отсутствие горения ( $a$ ) и при диффузионном горении ламинарной круглой струи водорода в сферической области вблизи выхода струи из сопла, но в отсутствие горения турбулентной струи, турбулизованной при преодолении ламинарной струей фронта сферической области с резким изменением плотности ( $b, v$ ) в зависимости от скорости истечения струи (м/с):  $a - 382$ ;  $b - 714$ ;  $v - 816$ ; диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм

На рис. 14,  $a$  показана теневая картина круглой микроструи водорода в отсутствие ее горения ( $U = 382$  м/с). В то же время на рис. 14,  $b, v$  представлены теневые картины диффузионного горения ламинарной круглой микроструи водорода в сферической области от выхода струи из сопла до перетяжки. Однако, с другой стороны, можно

наблюдать отсутствие горения турбулентной микроструи, турбулизованной при преодолении ламинарной струей фронта сферической области с резким изменением плотности в зависимости от скорости микроструи:  $b - 714$  м/с,  $v - 816$  м/с, диаметр выходного сопла  $d = 500$  мкм. В данной ситуации можно выделить два важных аспекта

та: 1) наблюдался срыв пламени при таких скоростях течения в струе; 2) как показали эксперименты, сохраняющийся процесс горения в области пламени от сопла до перетяжки в определенных условиях является источником возгорания («дежурным факелом») турбулизованной части струи. По-видимому, это может быть связано с подмешиванием из области перетяжки горячих компонент сгорания в высокоскоростной турбулентный поток водородо-воздушной смеси.

### Диффузионное горение водорода в круглой микроструе при выходном диаметре сопла 250 мкм

На рис. 15 представлены схема эксперимента, теньевая картина струи водорода без горения (рис. 15, а) и набор теньевых картин сферической области горения от сопла до так называемой перетяжки в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 15, б–ж). Видно, что форма зоны пламени от сопла до 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 горячей газовой среды смешения водорода и окружающего воздуха. Наблюдается ламинарный характер течения струи водорода в области от сопла до перетяжки (до фронта изменения плотности). При переходе струи через эту область она становится турбулентной, процесс смешения ламинарной струи водорода с воздухом в области от сопла до перетяжки с образованием пламени сферической формы ниже по потоку меняется на турбулентное смешение с образованием пламени турбулентного горения водорода, что более детально можно наблюдать на рис. 16.

В целом, характер горения круглой микроструи водорода, истекающей из сопла диаметром 250 мкм, аналогичен предыдущим ситуациям при горении круглой микроструи водорода, истекающей из сопел диаметром 1 000 и 500 мкм. На рис. 16 можно также наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи  $U = 650$  м/с. В области скорости истечения микроструи от 204 до 611 м/с, пламя сохраняет ламинарный характер развития в процессе горения.

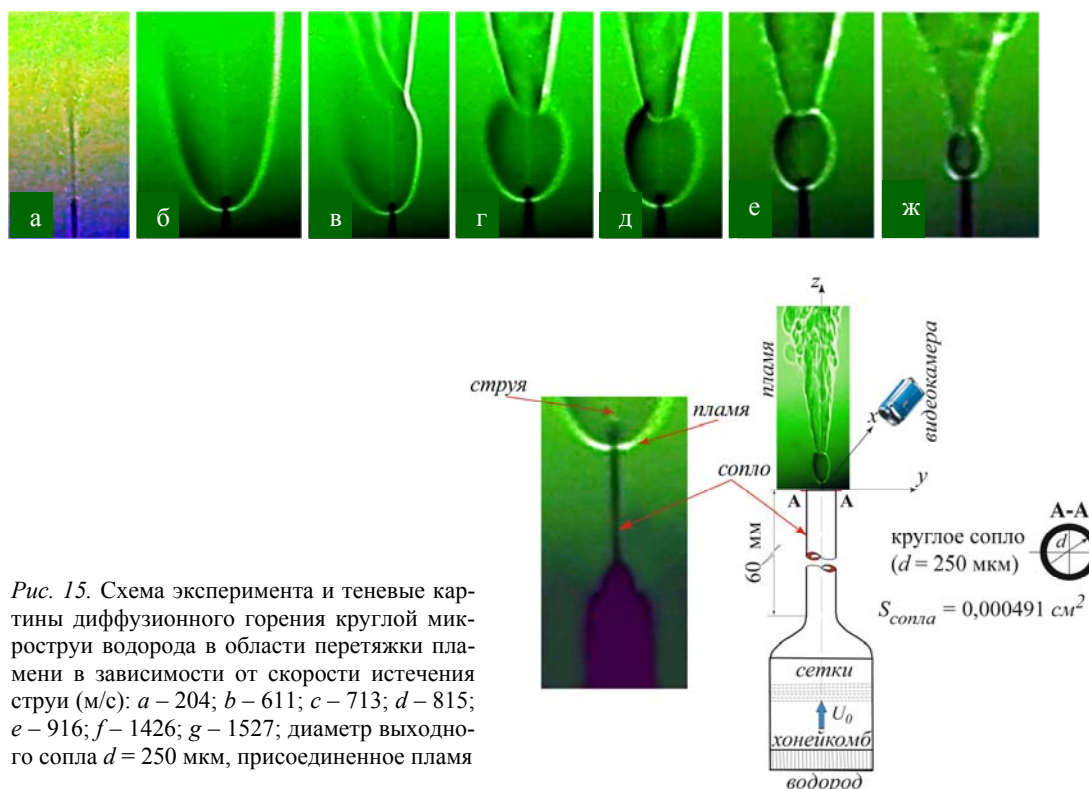


Рис. 15. Схема эксперимента и теньевые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 204; б – 611; в – 713; д – 815; е – 916; ф – 1426; г – 1527; диаметр выходного сопла  $d = 250$  мкм, присоединенное пламя

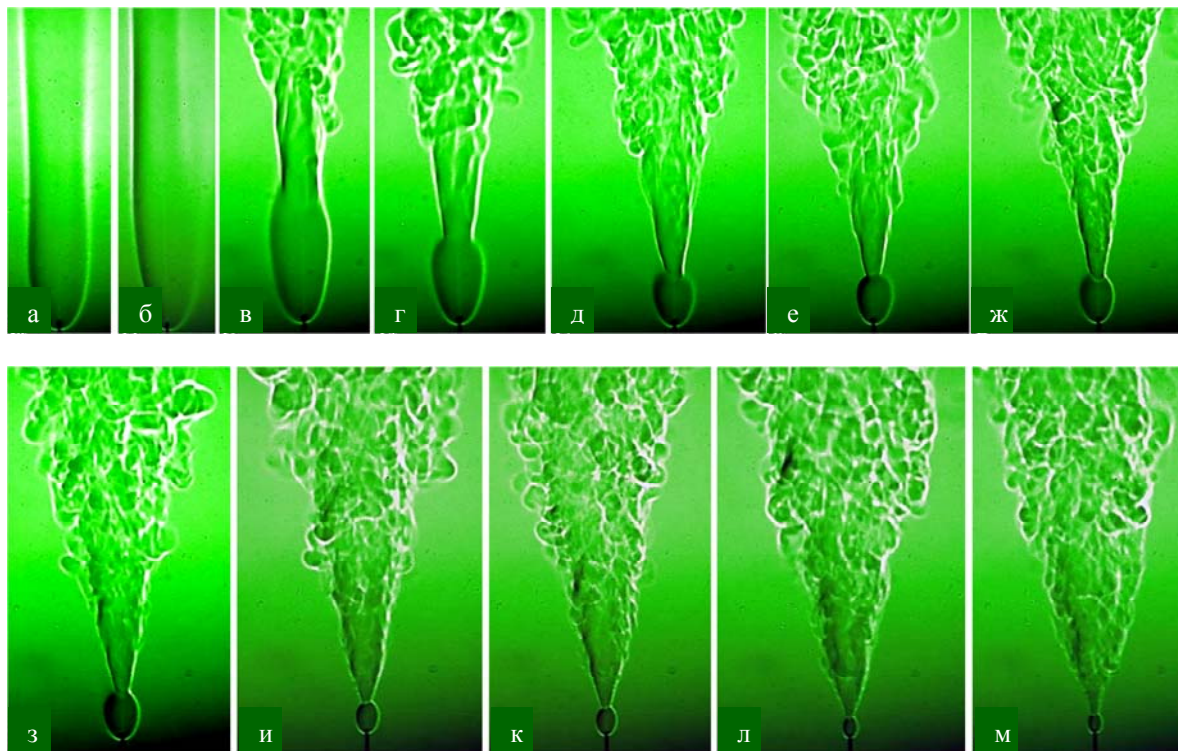


Рис. 16. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а = 204; б = 611; в = 652; г = 713; д = 815; е = 916; ж = 1 120; з = 1222; и = 1405; к = 1426; л = 1527; м = 1 568; диаметр выходного сопла  $d = 250$  мкм ( $S_{\text{сопла}} = \pi d^2/4 = 0,000491$  см<sup>2</sup>), присоединенная пламя

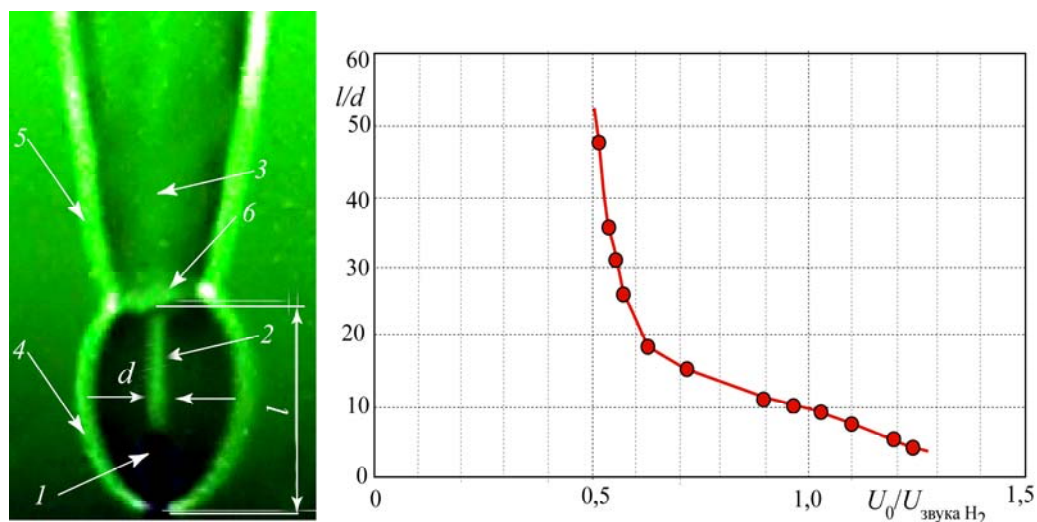


Рис. 17. Теневая картина процесса диффузионного горения круглой струи водорода в ближнем поле: 1 – сопло ( $d = 250$  мкм); 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности и кривая уменьшения размера сферической области горения струи водорода в ближнем поле с ростом скорости истечения струи ( $d$  – диаметр ламинарной струи,  $l$  – размер сферической области,  $U_{\text{звук Н}_2} = 1\,284$  м/с)

На рис. 17 представлен график зависимости размера области от сопла до перетяжки как функции скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нели-

нейная, как и в ситуациях, показанных на рис. 7, 11. Следует отметить, что при данном диаметре сопла ( $d = 250$  мкм) и задаваемых величинах расхода газа в экспери-

менте на его выходе скорость струи превысила скорость звука ( $U_{\text{звука H}_2} = 1\,284$  м/с).

### Обсуждение результатов экспериментов

Как показали результаты исследований диффузионного горения круглой микро-струи водорода, впервые обнаружено новое явление, которое, по-видимому, ранее никем не наблюдалось. Это явление связано с возникновением в ближнем поле горения круглой микроструи водорода практически замкнутой сферической области, простирающейся от сопла до так называемой перетяжки, где идет процесс смешения чисто ламинарной водородной струи с окружающим воздухом. Причем данная область устойчива к внешнему воздействию, имеет эллипсо- или шарообразную форму, ее пространственный размер постепенно уменьшается с ростом скорости микроструи. Важной особенностью области от сопла до перетяжки является то, что она окружена мощным барьером градиента плотности газа, при преодолении которого ламинарная струя мгновенно становится турбулентной. Эксперименты показали, что в области от сопла до перетяжки горение водорода имеет ламинарный характер с ламинарным пламенем, а вне этой области характер горения турбулентный с типичным турбулентным пламенем.

Возникает вопрос: с чем это связано? С целью ответа на данный вопрос были проведены экспериментальные исследования границ возникновения данного явления с точки зрения определения геометрических параметров круглой струи, а именно ее диаметра. Кроме того, выяснялось, присуще ли наблюдаемое явление в круглой микроструе макро- и мини-струям. Обнаружено, что круглая мини-струя водорода ( $d = 3\,000$  мкм) также подвержена возникновению описанной характерной области пламени от среза сопла до перетяжки. На рис. 18, а, б показаны соответственно обычная и теневая фотографии возникновения этой зоны в процессе горения водорода в круглой мини-струе на скорости  $U_{\text{струи}} = 95$  м/с. Теневая фотография четко демонстрирует все особенности начального периода возникновения перетяжки, наблюдаемые в экспериментах с микроструей, представленных выше.

С ростом скорости мини-струи (рис. 18, в, г), эллипсоидная форма области перетяжки трансформируется в шарообразную форму, как и в представленных выше ситуациях с микроструями.

Таким образом, ситуация, наблюдаемая в процессе горения водорода в круглой микроструе, сохраняется и для случая горения водорода в мини-струе диаметром 3 000 мкм.

Кардинальное изменение в характере горения водорода в круглой струе обнаружено при увеличении ее диаметра до 5 000 мкм. На рис. 19 представлены обычная фотогра-

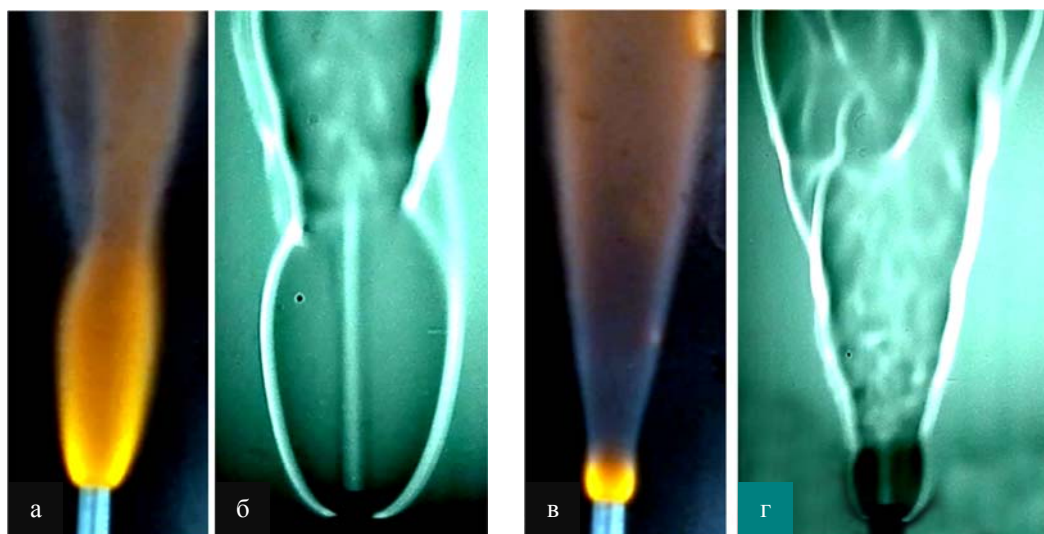


Рис. 18. Фотография пламени (а, в) процесса диффузионного горения круглой струи водорода и его теневая картина (б, г) в ближнем поле мини-струи (диаметр сопла  $d = 3\,000$  мкм): а, б –  $U_{\text{струи}} = 95$  м/с; в, г –  $U_{\text{струи}} = 125$  м/с

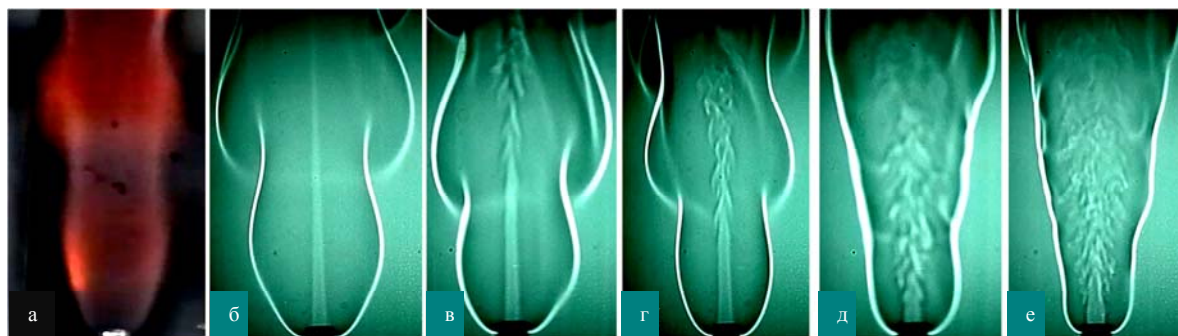


Рис. 19. Фотография пламени (а) процесса диффузионного горения круглой струи водорода и его теньевые картины (б–е) в ближнем поле мини-струи при различной скорости струи (м/с): а – 10; б – 10; в – 30; г – 50; д – 70; е – 80;  $d = 5\,000$  мкм

фия (а) и набор теньевых фотографий (б–е) возникновения характерной зоны пламени в области от сопла до перетяжки в процессе горения водорода в круглой мини-струе диаметром  $5\,000$  мкм в диапазоне скоростей  $U_{\text{струи}} = 10\text{--}60$  м/с.

На рис. 19 видно, что в данной ситуации формирование перетяжки не реализуется, хотя мы и можем наблюдать определенную деформацию пламени в направлении замыкания области перетяжки. Однако этого не происходит, и поэтому не возникает фронта резкого градиента плотности на границе между пламенем в области от сопла до перетяжки и пламенем горения в остальной (дальней, верхней) части струи, проходя которой чисто ламинарная струя мгновенно турбулизуется, как в ситуациях наличия перетяжки при горении микроструй водорода, что продемонстрировано выше.

В данном случае в процессе горения струи водорода развитие пламени соответствует динамике классического ламинарно-турбулентного перехода ламинарного течения в струе в турбулентное состояние. На рис. 19, б струя водорода чисто ламинарная. С ростом скорости струи по причине синусоидальной (варикозной) неустойчивости можно наблюдать появление характерных  $\Lambda$ -структур нелинейной стадии перехода (рис. 19, в, г). Дальнейший рост скорости приводит к разрушению когерентных  $\Lambda$ -структур, образованию турбулентных пятен и турбулизации всей струи (рис. 19, д, е).

Таким образом, эксперимент показал, что, по-видимому, образование области перетяжки при горении круглой струи водорода яв-

ляется особенностью горения именно микроструи, по крайней мере до диаметра струи порядка  $3\,000$  мкм. С чем это может быть связано? Одно из предположений можно отнести к характеру распределения средней скорости на срезе сопла. Профиль скорости на срезе сопла может быть ударным либо параболическим в зависимости от отношения длины канала сопла к его выходному диаметру ( $l/d$ , где  $l$  – длина канала сопла, а  $d$  – его выходной диаметр) [5]. Ударный профиль с мощным градиентом скорости на периферии струи и практически его отсутствием в ядре струи скорости типичен для макро- и мини-струй с отношением  $l/d$  менее единицы. Что касается микроструй, то этот показатель обычно значительно больше единицы даже при относительно короткой длине соплового канала. Для экспериментов, представленных в данной работе, этот параметр находится в диапазоне  $l/d = 20\text{--}240$ , т. е. на срезе сопла всегда формируется параболический профиль скорости. Наличие мощного градиента скорости на периферии струи в случае ударного профиля скорости на срезе сопла при  $d_{\text{сопла}} > 3\,000$  мкм может препятствовать замыканию сферической области в районе перетяжки пламени при горении макро- и мини-струи водорода. 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 круглой микроструи водорода пока не существует, и требуются дополнительные эксперимен-

тальные 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<sub>x</sub> 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. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения водорода в круглой и

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

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. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие. Новосибирск, 2012. 208 с.

Материал поступил в редколлегию 06.04.2015

A. G. Shmakov<sup>1,2</sup>, G. R. Grek<sup>3</sup>, V. V. Kozlov<sup>2,3</sup>  
O. P. Korobeinichev<sup>1</sup>, Yu. A. Litvinenko<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Chemical Kinetics and Combustion of SB RAS  
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

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

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

### DIFFERENT CONDITIONS OF THE ROUND HYDROGEN JETS DIFFUSION COMBUSTION IN AIR

The purpose of this work is experimental study of diffusion combustion of the round hydrogen microjets with different nozzle diameter. The new phenomenon is revealed during combustion of a hydrogen microjet, which we have named «bottleneck». The special attention has been given to research of characteristics of the «bottleneck» development and its role during of a hydrogen round 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.

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