

Г. Р. Грек, М. М. Катасонов, Г. В. Козлов, М. В. Литвиненко

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*grek@itam.nsc.ru, mikhail@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru
litmar@itam.nsc.ru*

ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА (КРУГЛОЕ СКОШЕННОЕ СОПЛО)*

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из скошенного под углом 45° сопла. Обнаружено новое явление в процессе горения микроструи водорода, которое мы условно назвали перетяжкой пламени, наблюдаемое нами ранее при исследовании диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из нес скошенного сопла. Особое внимание 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 горящей 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. Показано, что теневые картины горения микроструи, полученные для двух позиций съемки (по нормали к скосу сопла и в направлении перпендикулярном скосу), были идентичны.

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

Введение

Основой современной энергетики является потребление главным образом углеводородного сырья: угля, нефти и природного газа (этан, бутан, пропан, этилен и др.). Объемы 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: и 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, запасы которого в мировом океане практически бесконечны, если иметь в виду, что одним из продуктов горения водорода в среде кислорода, за вычетом получаемой тепловой энергии, является обыкновенная вода. Однако развитию водородной энергетики мешает нерешенность целого ряда проблем, связанных со свойствами водорода, в первую очередь его взрывоопасность.

* 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.

Водородная энергетика пока не получила широкого применения. Методы получения водорода, способы его хранения и транспортировки, которые рассматриваются как перспективные для водородной энергетики, находятся пока 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 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 возможности влиять на процессы различными методами управления, такими, например, как акустика. В работе [1] исследовалось воздействие акустики на снижение выброса оксидов азота и устойчивость приподнятого пламени в диффузионной турбулентной водородной струе. Показано, что NO_x эмиссия была уменьшена и минимизирована на частоте акустического резонанса. Вихрь, который был генерирован воздействием акустики, способствовал росту подсоса воздуха и повышал степень смешения топлива-воздух. Этот эффект приводил к более низкой температуре пламени 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 самом соотношении скорости между коаксиальной струей воздуха и скоростью водородной струи.

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 микроструй пропана в поперечном акустическом поле [4]. С другой стороны [3], 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? Первые результаты более детального рассмотрения характеристик перетяжки при диффузионном горении водорода в круглых микроструях представлены в работе [5].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном изучении диффузионного горения водорода в круглой микроструе со скошенным соплом. Особое внимание будет уделено исследованию характеристик развития так называемой перетяжки и ее роли в процессе диффузионного горения круглой микроструи водорода.

**Диффузионное горение водорода
в круглой микроструе,
истекающей из скошенного
под углом 45° сопла
диаметром 440 мкм
(ракурс съемки –
сбоку от плоскости скоса)**

В результате экспериментальных исследований, представленных в работе [3], установлено, что в процессе диффузионного горения водорода в круглой струе возникает некое явление деформации пламени (мы условно назвали его перетяжкой) на участке выхода струи из сопла. Характеристики перетяжки сильно зависели от скорости исте-

чения струи, частоты и интенсивности звука. Например, пространственный размер перетяжки уменьшался с повышением скорости истечения струи.

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). Теневым методом позволяет осуществлять визуализацию течений, содержащих участки постоянного или медленно изменяющегося градиента плотности среды, и используется для визуализации ударных волн, областей сжатия

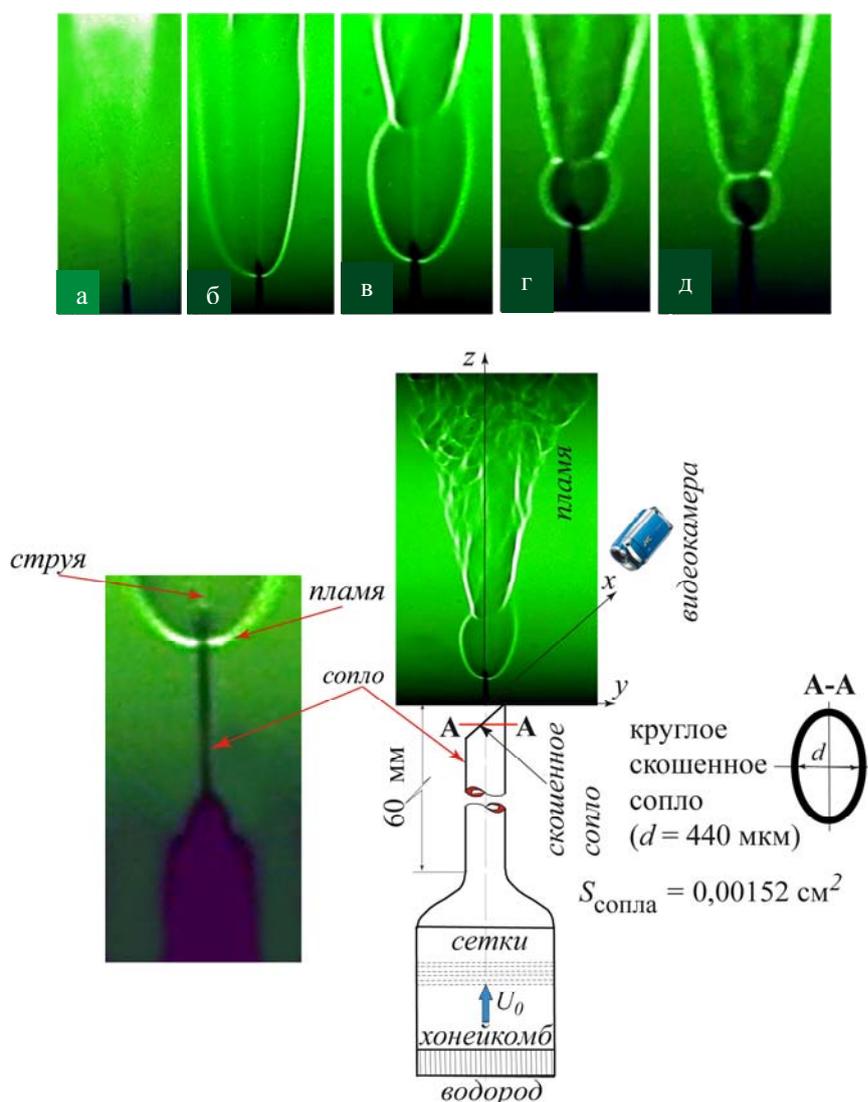


Рис. 1. Схема эксперимента и теневая картина струи водорода без горения (а – 263 м/с) и теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): б – 263; в – 460; г – 526; д – 658; диаметр скошенного выходного сопла $d = 440$ мкм, присоединенное пламя

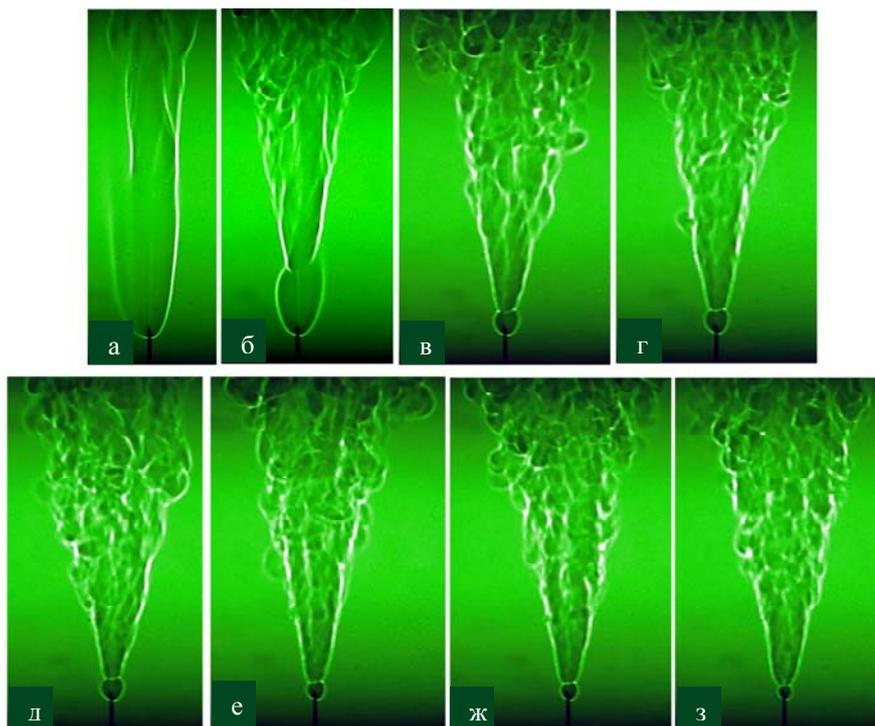


Рис. 2. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 263; б – 460; в – 526; г – 559; д – 592; е – 625; ж – 658; з – 724; диаметр выходного скошенного сопла $d = 440$ мкм, присоединенное пламя

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 видеопленки отбирались отдельные кадры, которые подвергались компьютерной обработке. Результаты экспериментальных исследований по изучению особенностей развития перетяжки при диффузионном горении круглой [5] и плоской [6] микроструи в зависимости от размеров микросопел и скорости истечения струй с использованием данной методики позволили получить новые интересные данные. В области перетяжки, представляющей собой замкнутую градиентом плотности сферу, идет процесс смешения чисто ламинарной струи водорода с воздухом и ламинарного горения данной смеси. При проникновении сквозь узкую область градиента плотности вниз по потоку ламинарная струя водорода мгновенно становится турбулентной, и можно ясно наблюдать эволюцию как турбулентной струи, так и турбулентного пламени. С целью расшире-

ния знаний в понимании структуры и особенностей микроструйного диффузионного горения водорода в данной работе представлены результаты исследования процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого, скошенного под 45° микросопла диаметром 440 мкм.

На рис. 1 представлена схема эксперимента, теневая картина струи водорода без горения (рис. 1, а) и набор теневых картин сферической области горения – так называемой перетяжки, в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 1, б–д).

Видно, что форма перетяжки с ростом скорости струи изменяется 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. Можно наблюдать ламинарный характер течения струи водорода в области перетяжки до фронта изменения плотности. При пе-

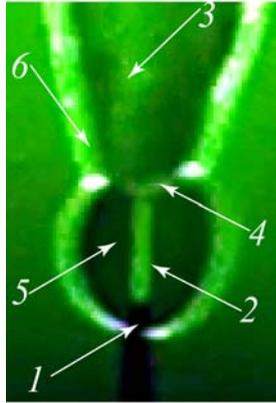


Рис. 3. Теневая картина диффузионного горения круглой струи водорода: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – турбулентная струя; 4 – фронт градиента плотности среды; 5 – область перетяжки ламинарного пламени; 6 – турбулентное пламя; диаметр скошенного выходного сопла $d = 440$ мкм, присоединенное пламя

реходе 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. 2.

На рис. 2 можно также наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи $U = 460$ м/с. Другой важный аспект

процесса горения микроструи водорода связан с причинами образования перетяжки. Связано ли это с характеристиками самого топлива (водорода), с процессом его смешения с окружающим воздухом либо с особенностями именно микроструйного горения? Все это мы рассмотрим 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 (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 (рис. 3).

Как видно на рис. 2, с ростом скорости струи размер сферической области горения (перетяжки) уменьшается. На рис. 4 представлен график зависимости размера перетяжки от скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугубо нелинейная.

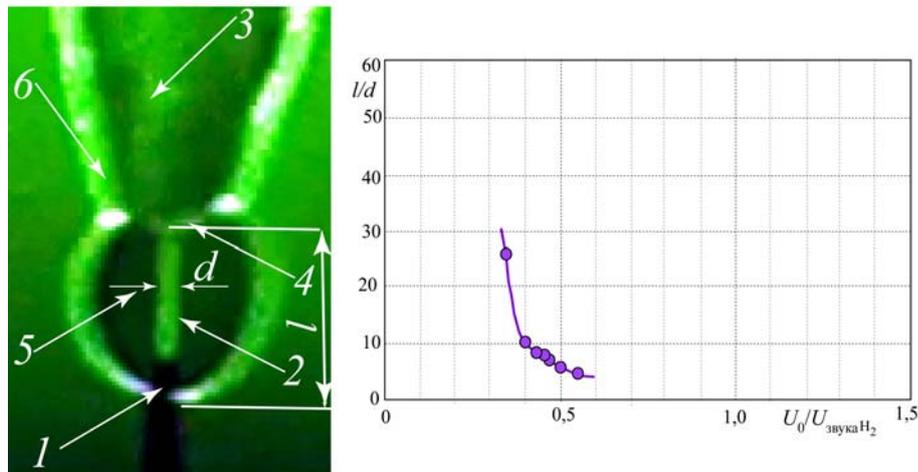


Рис. 4. Теневая картина процесса диффузионного горения круглой струи водорода в ближнем поле: 1 – скошенное круглое сопло $d = 440$ мкм; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 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, $U_{\text{звук H}_2} = 1284$ м/с)

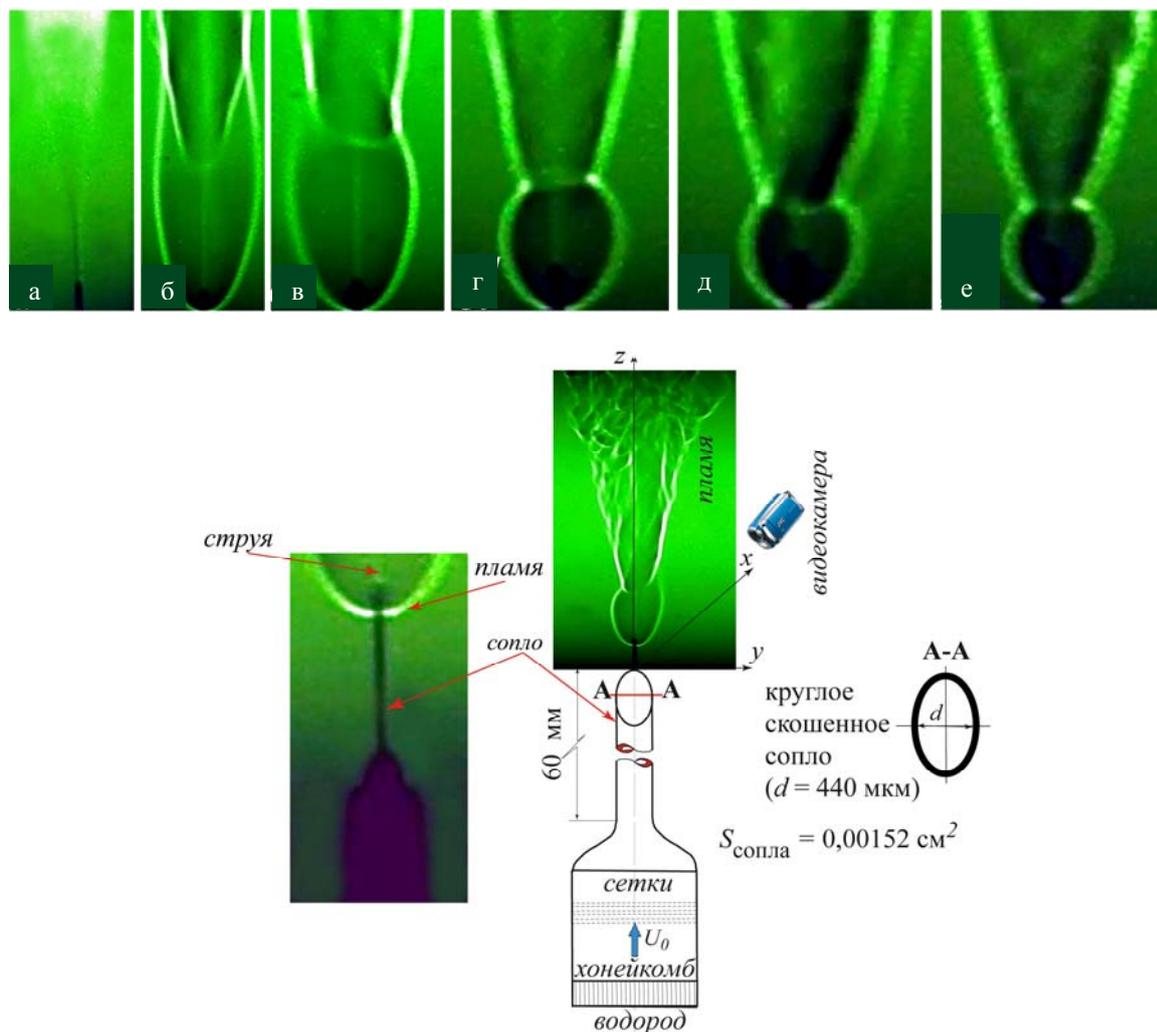


Рис. 5. Схема эксперимента и теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода в области перетяжки пламени в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 395; б – 395; в – 460; г – 526; д – 592; е – 691; диаметр скошенного выходного сопла $d = 440$ мкм, присоединенное пламя

Диффузионное горение водорода в круглой микроструе, истекающей из скошенного под углом 45° сопла диаметром 440 мкм (ракурс съемки – по нормали к плоскости скоса)

На рис. 5 представлены схема эксперимента, теневая картина струи водорода без горения (рис. 5, а) и набор теневых картин сферической области горения, так называемой перетяжки, в ближнем поле пламени горения при различной скорости истечения струи (рис. 5, б–е).

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. 6.

В целом, характер горения микроструи водорода, истекающей из скошенного круглого сопла диаметром 440 мкм аналогичен

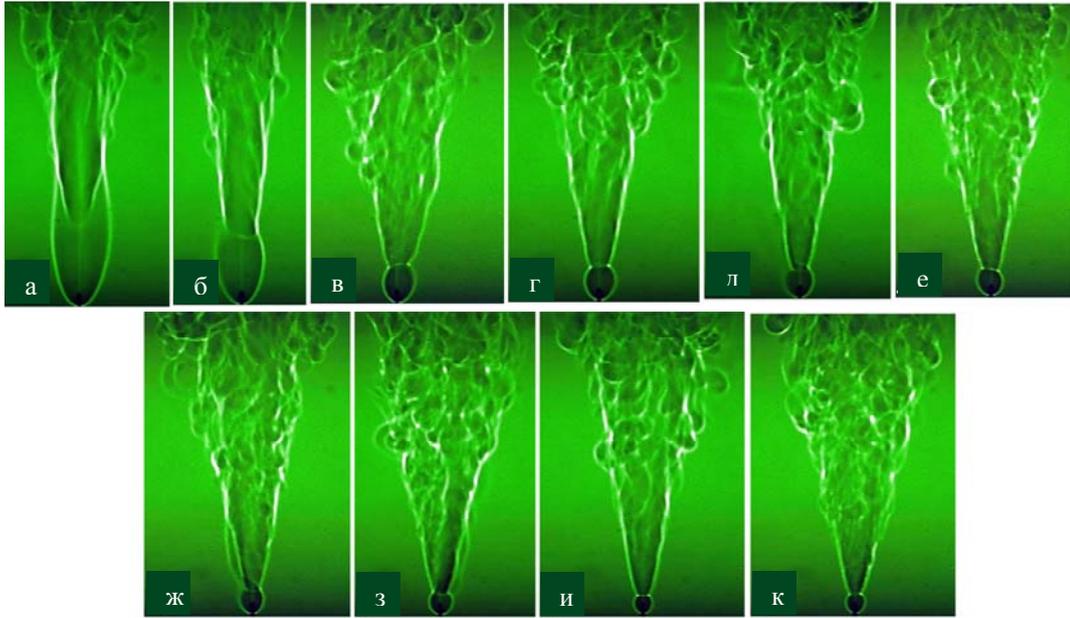


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а – 395; б – 460; в – 493; г – 526; д – 539; е – 559; ж – 572; з – 592; и – 625; к – 691; диаметр выходного скошенного сопла $d = 440$ мкм, присоединенное пламя

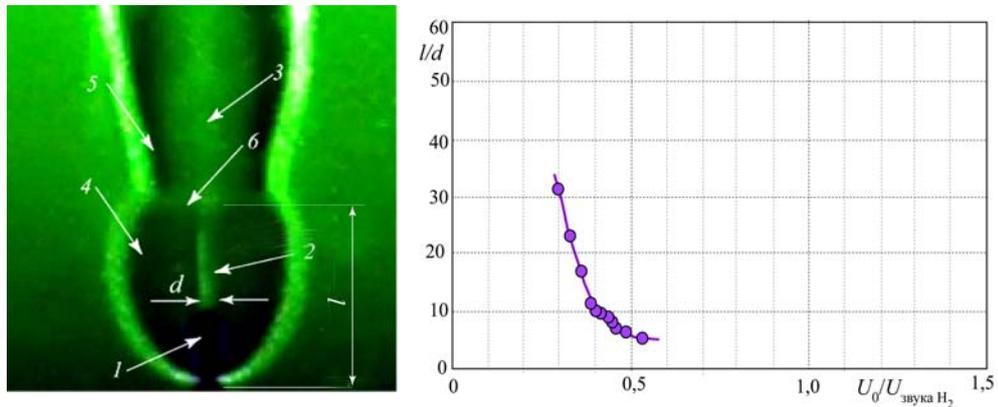


Рис. 7. Теневая картина процесса диффузионного горения круглой струи водорода в ближнем поле: 1 – скошенное круглое сопло $d = 440$ мкм; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 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)

предыдущему случаю при горении круглой микроструи водорода, истекающей из круглого сопла диаметром 250 и 500 мкм [5]. На рис. 6 можно также наблюдать, что процесс возникновения перетяжки пламени начинается примерно со скорости истечения струи $U = 395$ м/с.

На рис. 7 представлен график зависимости размера перетяжки от скорости истечения струи. Видно, что эта зависимость сугу-

бо нелинейная, как и в случае, изображенном на рис. 4.

Обсуждение результатов экспериментов

Как показали результаты исследований диффузионного горения круглой микроструи водорода [5], впервые обнаружено новое явление, которое, по-видимому, ранее

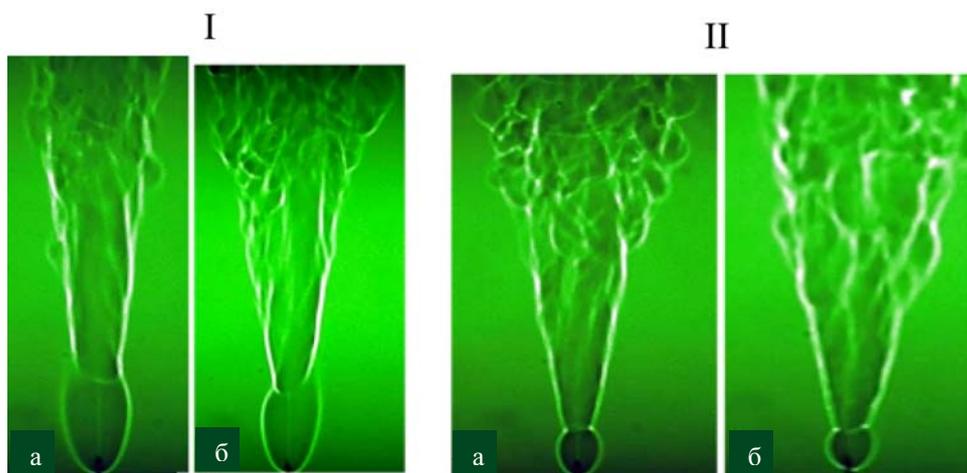


Рис. 8. Теневые картины процесса диффузионного горения круглой струи водорода, истекающей из круглого скошенного под 45° сопла, в зависимости от скорости струи (I – 460 м/с, II – 560 м/с) и ракурса съемки: *а* – по нормали к поверхности скоса сопла, *б* – сбоку от поверхности скоса сопла ($d_{\text{сопла}} = 440$ мкм)

ником не наблюдалось. Это явление связано с возникновением в ближнем поле горения круглой 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 шарообразную форму, ее пространственный размер постепенно уменьшается с ростом скорости 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 характер горения турбулентный с типичным турбулентным пламенем.

Аналогичный результат исследований был получен в результате экспериментальных исследований диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого скошенного под углом 45° сопла. Как в ситуации круглого, так и круглого скошенного сопла диффузионное горение микроструи водорода сопровождалось появлением замкнутой сферической области перетяжки в ближнем поле ее горения. Показано, что кардинальных изменений в особенностях горения смеси водорода с воздухом как в перетяжке, так и во всей струе не обнаруже-

но. Не обнаружено также принципиальных изменений в характере горения водородной микроструи в зависимости от ракурса съемки теневых картин процесса (съемки сбоку и по нормали к поверхности скоса сопла). На рис. 8 это хорошо видно.

Вне зависимости от скорости истечения микроструи водорода ($U_{\text{струи}} = 460, 560$ м/с) и ракурса съемки теневых картин процесса (сбоку или по нормали к поверхности среза сопла) качественные характеристики процесса горения водородно-воздушной смеси в перетяжке и во всей струе остаются одинаковыми. На рис. 9 показан график зависимости уменьшения пространственного размера перетяжки с ростом скорости истечения микроструи для случая съемки данного процесса сбоку и по нормали к поверхности среза сопла. Видно, что кривые зависимости ($l/d = f(U_0/U_{\text{звука H}_2})$) практически слились, что указывает на одинаковый характер уменьшения размера (l) сферической области горения струи водорода в ближнем поле (перетяжки) с ростом скорости истечения струи (U_0) в обеих ситуациях съемки теневых картин.

Таким образом, эксперимент показал, что, по-видимому, образование области перетяжки при диффузионном горении круглой струи водорода, истекающей из круглого или круглого скошенного сопла, является особенностью горения именно микроструи, по крайней мере до диаметра струи порядка

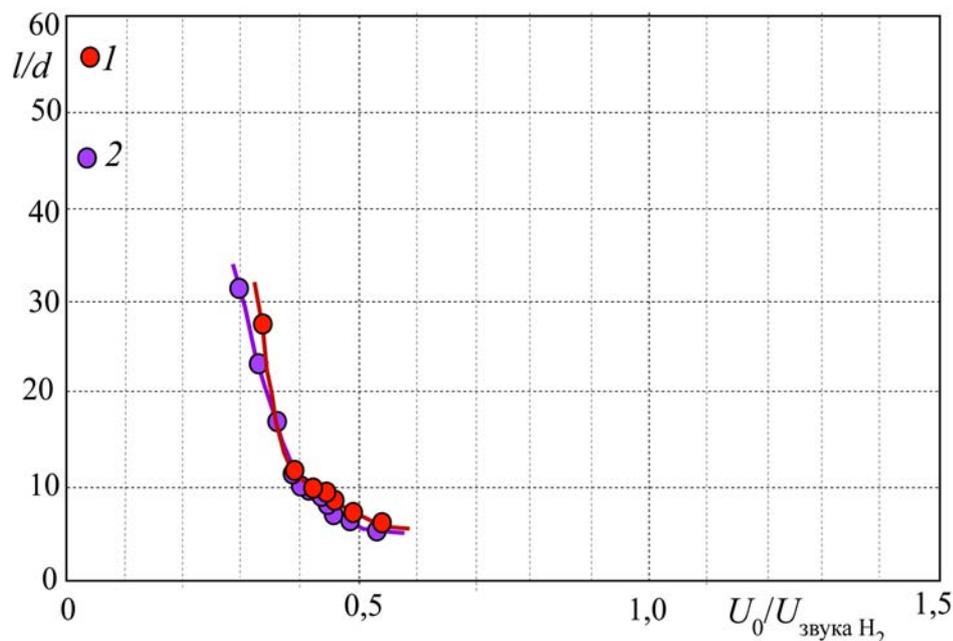


Рис. 9. Кривые уменьшения размера (l) сферической области горения струи водорода в ближнем поле (перетяжки) с ростом скорости истечения струи: 1, 2 – съемка сбоку и по нормали к поверхности скаса сопла соответственно (d – диаметр ламинарной струи, l – размер сферической области, $U_{\text{звукa H}_2} = 1\,284$ м/с)

3 000 мкм [5]. 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) [7]. Ударный профиль с мощным градиентом скорости на периферии струи и его отсутствием в ядре струи скорости типичен для макро- и микро-струй с отношением l/d менее единицы. Что касается микро-струй, то этот показатель обычно значительно больше единицы, даже при относительно короткой длине соплового канала. Для эксперимента, представленного в данной работе, этот параметр $l/d = 136$, т. е. на срезе сопла 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 микро-струй водорода [5]. Другое предположение можно связать с особенностями гидродинамических и химических характеристик водорода и его горе-

ния. Тем не менее ясного понимания природы возникновения такого нового явления, как перетяжка, при горении круглой микро-струй 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 микро-струе 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. 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.

7. 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

G. R. Grek, M. M. Katasonov, V. V. Kozlov, Yu. A. Litvinenko

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

*grek@itam.nsc.ru, mikhail@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru
litmar@itam.nsc.ru*

DIFFUSION HYDROGEN MICROJET COMBUSTION (ROUND BEVELLED NOZZLE)

The purpose of this work is experimental study of diffusion combustion of the round hydrogen microjet at the 45° bevelled nozzle. The new phenomenon is revealed during combustion of a given hydrogen microjet, which we have named «bottleneck», as well as in a situation of the round and plane microjet combustion. 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. It is found, that shadow patterns of the microjet combustion obtained for two shooting positions (normal and side view to the bevelled nozzle) were identical.

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