

УДК 544.452.42

DOI 10.25205/2541-9447-2017-12-3-60-71

**В. В. Козлов^{1,3}, Г. Р. Грек¹, Г. В. Козлов¹
Ю. А. Литвиненко¹, А. Г. Шмаков^{2,3}**

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

² *Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН
ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

kozlov@itam.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ КРУГЛОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА ПРИ ЕЕ ЗАЖИГАНИИ ВДАЛИ ОТ СРЕЗА СОПЛА*

Представлен сценарий дозвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла. Обнаружена стабилизация процесса сверхзвукового диффузионного горения микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла по причине отсутствия связи между пламенем и выходным микросоплом, т. е. отсутствием нагрева последнего. Показано, что отсутствие нагрева микросопла по причине неподнятости пламени приводит к реализации сверхзвукового механизма горения микроструи водорода, характеризующегося исчезновением «области перетяжки пламени», отрывом пламени и наличием сверхзвуковых бочек. Установлено, что одним из факторов, стабилизирующих сверхзвуковое горение, является наличие сверхзвуковых бочек как в струе, так и в пламени.

Ключевые слова: зажигание круглой микроструи водорода вдали от среза сопла, диффузионное горение, стабилизация сверхзвукового микрогорения.

Введение

Одним из важных аспектов исследования механизма развития микроструи является изучение механизма диффузионного горения как круглой, так и плоской микроструи. Все явления, наблюдаемые при развитии свободных от горения микроструй, обнаружены и при исследовании их диффузионно-

го горения [1; 2]. К этим явлениям относятся и процесс уплощения пламени круглой микроструи в поперечном акустическом поле, и его раздвоение как в круглой, так и в плоской микроструе [1; 2]. В работе [3] исследован процесс раздвоения присоединенного пламени под воздействием поперечного акустического поля при диффузионном горении метана в малоразмерных круглой и плоской

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант НШ-8788.2016.1) и РФФИ (грант № 16-07-00946а).

Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 60–71.

микроструях. В нашем случае раздвоение пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении микроструи пропана наблюдалось только в ситуации оторвавшегося от среза сопла пламени [4]. С другой стороны, авторы недавно опубликованной работы [5] также обнаружили раздвоение пламени под воздействием акустики при горении круглой микроструи метана именно у оторвавшегося от среза сопла пламени. Детальные результаты исследований как структуры пламени, так и характеристик его развития при диффузионном горении пропана в круглой и плоской микроструе в зависимости от изменений начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия представлены в работах [6; 7]. Результаты экспериментальных исследований диффузионного горения круглой и плоской микроструи водорода представлены в работах [8–12].

Однако в процессе исследования диффузионного горения круглой и плоской микроструи водорода обнаружено новое явление (или, иными словами, появление некоего образования), которое было условно названо «область перетяжки пламени» на участке выхода микроструи из сопла [8–13]. Характеристики области перетяжки пламени сильно зависели от скорости истечения струи, частоты и интенсивности звука. Например, геометрические параметры области перетяжки пламени изменялись с повышением скорости истечения микроструи, одновременно при этом резко возрастала интенсивность звука, генерируемого горячей струей водорода. Детальные характеристики области перетяжки пламени в зависимости от размера выходного диаметра отверстия сопла (круглая микроструя) и размеров выходной щели сопла (плоская микроструя), расхода (или скорости) истечения микроструи представлены в работах [8–13]. Показано, что форма области перетяжки пламени с ростом скорости истечения микроструи водорода трансформируется от эллипсоидной к сферической, а ее пространственный размер уменьшается. Эта область охватывает часть выходного сопла и имеет четко обозначенные границы резкого изменения плотности движущейся и горячей газовой среды – смеси водорода и окружающего воздуха. Обнаружен ламинарный характер течения микроструи водорода в области перетяжки пламени. При прохождении микроструи че-

рез фронт изменения плотности она мгновенно становится турбулентной, процесс смешения с воздухом ламинарной струи в области перетяжки пламени с образованием пламени сферической формы меняется на турбулентное смешение с образованием пламени турбулентного горения водорода.

С ростом скорости U (или расхода Q) истечения микроструи водорода, структура пламени и характеристики развития процесса горения претерпевают определенные изменения. В частности, меняются форма и пространственный размер области перетяжки пламени. Происходит отрыв пламени в турбулентной области микроструи при сохранении горения в области перетяжки пламени. При достижении скорости истечения микроструи близкой к трансзвуковой рост расхода водорода не приводит к росту скорости истечения микроструи. Это так называемый процесс запираания сопла и невозможности выхода на сверхзвук. Выход на сверхзвуковую скорость, как известно, может обеспечить, в частности, сопло Лаваля, где конфузор стыкуется с диффузором через так называемое горло сопла. Именно в горле сопла скорость истечения микроструи выходит на скорость звука, и ее дальнейший рост может обеспечить лишь расширяющийся диффузор. Однако, учитывая сжимаемость газа на трансзвуке, изменение его плотности, температурный фактор, особенности конфигурации и размеров сопла и т. д., струя и процесс ее горения остаются в дозвуковой области, т. е. происходит запираание сопла в его горле.

В работе [14] представлен сценарий дозвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода. Обнаружена стабилизация процесса диффузионного горения водорода в области перетяжки пламени по причине воздействия на него тороидального вихря, способствующего интенсификации процесса смешения водорода с окружающим воздухом и одновременно стабилизирующего ламинарное течение удлиненной микроструи и ламинарное диффузионное горение в данной области. Показано, что дозвуковое диффузионное горение круглой микроструи водорода связано с наличием области перетяжки пламени в широком диапазоне расхода водорода или близкой к трансзвуковой скорости ее истечения. Установлено, что нагрев толстостенного микро-сопла от области перетяжки пламени при

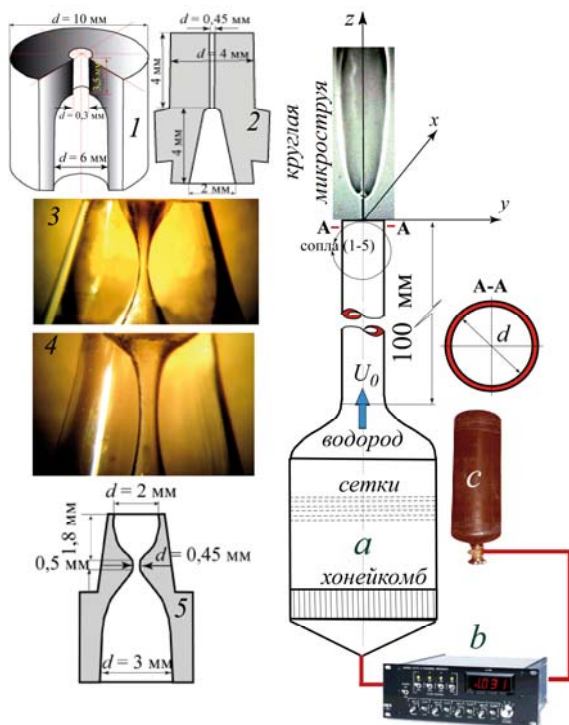


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* – сопловой аппарат, *b* – блок управления электромагнитным клапаном расхода, *c* – баллон сжатого водорода (100 атм.). Набор съемных микросопел: 1, 2 – сопла с цилиндрическим выходным каналом, 3–5 – сверхзвуковые квазимикросопла Лавала

его большой теплоемкости оказывает существенное влияние на характеристики развития микроструйного горения водорода и приводит к запирианию сопла. Обнаружено, что пространственный размер области перетяжки пламени с ростом расхода водорода сначала резко уменьшается, а затем постепенно увеличивается одновременно с изменением формы области перетяжки пламени, пока горение в данной области не прекратится.

В работе [15] представлен сценарий и основные признаки сверхзвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода: исчезновение области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и наличие сверхзвуковых бочек в оторвавшемся пламени. Установлена основная причина данного сценария диффузионного горения, связанная с температурным фактором, т. е. с наличием тонкостенных микросопел с малой теплоемкостью и возможностью их быстрого охлаждения, что не дает возможности существовать области перетяжки пламени на больших скоростях истечения микроструи.

Следует отметить, что все процессы диффузионного горения круглой микроструи водорода, представленные в работах [14; 15], были проведены при зажигании микроструи вблизи среза сопла. Цель же настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании процесса диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из различных микросопел, в том числе и из сверхзвуковых квазисопел Лавала различных конфигураций и размеров, при ее зажигании вдали от среза сопла. Внимание будет уделено и определению признаков, указывающих на дозвуковое или сверхзвуковое течение и горение круглой микроструи водорода.

Экспериментальное оборудование и процедура исследования

На рис. 1 представлена схема эксперимента. В установку соплового аппарата (*a*) через блок управления электромагнитным клапаном типа 179В фирмы *MKS Instruments* объемного расхода газа (*b*), обеспечивающий точность измерения расхода газа в пределах 0,7 %, подавался водород из баллона 100 атм. (*c*). Управление расходом газа осуществлялось с помощью блока управления, а показания расхода регистрировались электронным табло (см. *b*). В экспериментах использовалось пять видов микросопел (см. рис. 1). Микросопло с цилиндрическим выходным отверстием из пирекс-стекла 1 и металла 2. Сверхзвуковые квазимикросопла Лавала из пирекс-стекла 3, 4 имеют произвольные конфигурации и размеры по причине их формирования с помощью стеклодувной технологии из микротрубок и сверхзвуковое квазимикросопло Лавала из металла 5.

Процедура проведения исследований состояла из непосредственной видеосъемки процесса диффузионного горения микроструи водорода и теневой картины данного процесса (теневой метод Теплера на базе ИАБ-451) с помощью цифровой видеокамеры *Olympus SZ-17* с разрешением 12 МП.

Особенности сверхзвукового диффузионного горения микроструи водорода с образованием сверхзвуковых бочек при ее зажигании вдали от среза сопла

Результаты экспериментальных исследований, представленные в работах [14; 15], имеют отношение к диффузионному горению круглой микроструи водорода при ее

зажигании вблизи среза сопла. В данной ситуации мы не смогли оторвать пламя от среза сопла, вероятно, из-за его нагрева областью перетяжки пламени. Однако в случае зажигания микроструи вдали от среза сопла отрыв пламени был реализован при совпадении и превышении скорости истечения микроструи над скоростью распространения фронта пламени. При этом исчезала область перетяжки пламени и, соответственно, нагрев сопла отсутствовал.

Значительные изменения в механизме процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода обнаружены при ее зажигании вдали от среза сопла. В данной ситуации были рассмотрены практически все микросопла, использованные в описанных экспериментах из работы [14].

На рис. 2 представлены теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из цилиндрического микросопла из пирекстекла (см. рис. 1, сопло 1), в зависимости от объемного расхода газа (Q , см³/с) и в ситуации ее зажигания вдали от среза сопла.

Следует отметить, что если рассчитать скорость истечения струи как $U = Q/S$, где $S = \pi d^2/4 = 0,00071$ см² – площадь поперечного сечения микросопла, то получим $U = 423, 493, 563, 634$ м/с соответственно. Однако U – среднерасходная скорость микроструи. Учитывая параболический профиль скорости на срезе круглого микросопла, максимальная скорость микроструи на ее продольной оси превышает среднерасход-

ную скорость примерно в два раза, т. е. она близка к скорости звука для водорода ($U_{\text{звук}} = 1284$ м/с). Получаем диапазон скоростей $U_{\text{струи}} = 846 \div 1268$ м/с.

Таким образом, можно предположить, что в данной ситуации мы имеем дело со сверхзвуковым диффузионным горением круглой микроструи при ее зажигании вдали от среза сопла.

На рис. 2 видно отсутствие области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и можно наблюдать характерные области утолщения микроструи в отрыве и в пламени, напоминающие так называемые сверхзвуковые бочки. Как видно из рис. 2, пламя приподнято при зажигании микроструи водорода вдали от среза сопла, и температурный фактор его нагрева отсутствует в отличие от ситуации, описанной в работе [14]. Можно высказать предположение о сверхзвуковом течении в данной ситуации, учитывая результаты исследований, представленные в работе [15]. В этой работе выявлены косвенные признаки сверхзвукового течения: отрыв пламени, исчезновение области перетяжки пламени и наличие сверхзвуковых бочек, чего не наблюдалось при дозвуковом течении [14].

На рис. 3 представлены теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из цилиндрического металлического микросопла (см. рис. 1, сопло 2), в зависимости от объемного расхода газа (Q , см³/с) и в ситуации ее зажигания вдали от среза сопла.

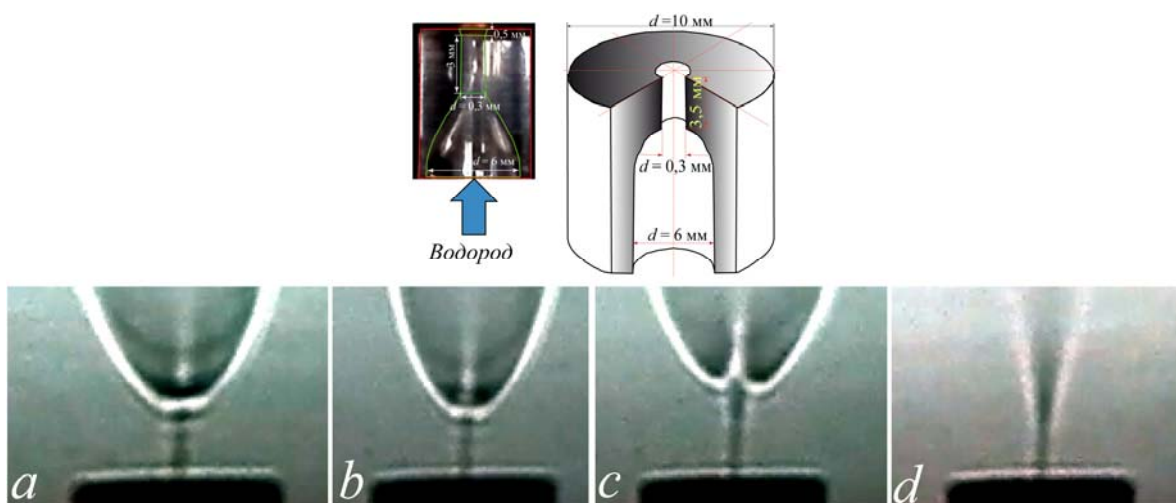


Рис. 2. Схема эксперимента (вверху) и теневые картины (внизу) развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода в зависимости от объемного расхода газа (Q , см³/с): а – 30, б – 35, с – 40, д – 45

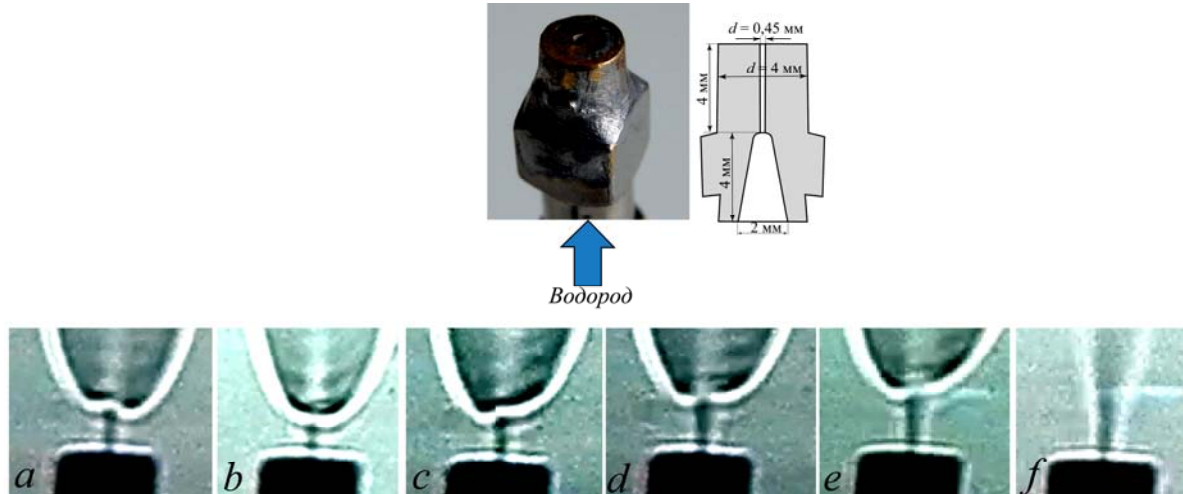


Рис. 3. Схема эксперимента (вверху) и теньевые картины (внизу) развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода в зависимости от объемного расхода газа (Q , см³/с): $a - 80$, $b - 90$, $c - 100$, $d - 105$, $e - 110$, $f - 115$

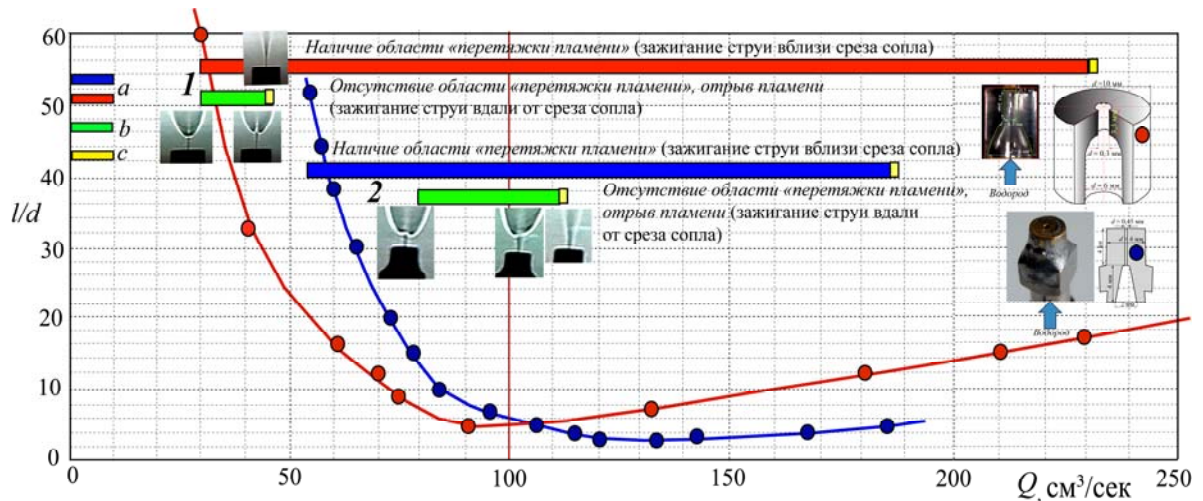


Рис. 4. Графики наличия области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи водорода (см. [14, Рис. 9, 12]) при ее зажигании вблизи среза сопла. Диапазоны расхода газа (Q) как при наличии (зажигание вблизи среза сопла), так и в отсутствие (зажигание вдали от среза сопла) области перетяжки пламени – 1, 2: a – зажигание вблизи среза сопла; b – зажигание вдали от среза сопла; c – срыв пламени

Следует отметить, что если рассчитать скорость истечения струи как $U = Q/S$, где $S = \pi d^2/4 = 0,00126 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения микросопла, то получим $U = 635, 714, 794, 833, 873, 913 \text{ м/с}$ соответственно. Однако U – среднерасходная скорость микроструи. Учитывая параболический профиль скорости на срезе круглого микросопла, максимальная скорость микроструи на ее продольной оси превышает среднерасходную скорость примерно в два раза, т. е. она близка либо превышает скорость звука для водорода ($U_{\text{звук}} = 1284 \text{ м/с}$).

Получаем диапазон скоростей $U_{\text{струи}} = 1270 \div 1826 \text{ м/с}$.

Таким образом, можно предположить, что в данной ситуации, как и на рис. 2, мы имеем дело со сверхзвуковым горением круглой микроструи при ее зажигании вдали от среза сопла.

На рис. 3 видно отсутствие области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и можно наблюдать характерные области утолщения микроструи в отрыве и в пламени, напоминающие так называемые сверхзвуковые бочки, как и в ситуации, пред-

ставленной на рис. 2. Можно предположить сверхзвуковое течение в данной ситуации, учитывая результаты исследований, представленные в работе [15]. В этой работе выявлены косвенные доказательства сверхзвукового течения, такие как отрыв пламени, исчезновение области перетяжки пламени и наличие сверхзвуковых бочек. Данных явлений не наблюдалось при дозвуковом течении (см. работу [14]).

На рис. 4 показано сравнение графиков зависимости размера области перетяжки пламени от объемного расхода при диффузионном горении микроструи водорода (см. [14. Рис. 9, 12]) при ее зажигании вблизи среза сопла. Здесь также показаны диапазоны расхода газа (Q) как при наличии (зажигание вблизи среза сопла), так и в отсутствие (зажигание вдали от среза сопла) области перетяжки пламени.

Видно (см. рис. 4), что диапазон расхода газа Q (или скорости истечения микроструи U) в ситуации отрыва пламени от среза сопла при зажигании микроструи водорода вдали от среза сопла значительно уже, чем в ситуации зажигания микроструи водорода вблизи среза сопла. Следует, однако, отметить, что во втором случае мы имеем дело с запираем сопла по причине его нагрева и сохранением области перетяжки пламени до трансзвуковых скоростей [14]. В первом же случае нагрев сопла отсутствует из-за приподнятости пламени, и можно наблюдать сверхзвуковое горение с наличием сверхзвуковых бочек как в микроструе, так и в пламени (см. рис. 2, 3).

Таким образом, зажигание микроструи водорода вблизи среза сопла приводит к стабилизации процесса горения в широком диапазоне расхода газа Q (или скорости истечения микроструи U) при сохранении горения в области перетяжки пламени вплоть до трансзвуковых скоростей. Именно наличие области перетяжки пламени является стабилизирующим фактором дозвукового горения круглой микроструи. В ситуации зажигания микроструи вдали от среза сопла этот диапазон резко сужается, приводя к сверхзвуковому горению, сопровождающемуся отрывом пламени, отсутствием области перетяжки пламени и наличием сверхзвуковых бочек. По-видимому, именно наличие сверхзвуковых бочек является стабилизирующим фактором сверхзвукового горения круглой микроструи. Данное наблюдение

коррелирует с ситуацией сверхзвукового горения микроструи водорода, истекающей из квазисверхзвуковых сопел Лавалья и представленной в работе [15].

Следует сразу отметить, что в случае зажигания микроструи вблизи среза сопла реализуется ситуация присоединенного к срезу сопла пламени, где существенную роль играет нагрев сопла и его теплоемкость. Область перетяжки пламени непосредственно находится на срезе сопла и нагревает его. С ростом расхода газа Q (или скорости истечения микроструи U) область перетяжки пламени исчезает, и пламя отрывается от среза сопла при достижении трансзвуковой скорости в случае ее истечения из тонкостенных квазисверхзвуковых сопел Лавалья [15].

Проведем сравнение механизмов диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из толстостенных квазисверхзвуковых сопел Лавалья, при ее зажигании вблизи и вдали от среза сопла.

На рис. 5, 6 показаны теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода (зажигание вдали от среза сопла), истекающей из двух сверхзвуковых квазимикросопел Лавалья 3 и 4 (см. рис. 1 и работу [14]) в зависимости от объемного расхода газа (Q).

Видно, что в обоих случаях наблюдаются признаки сверхзвукового течения: отсутствие области перетяжки пламени, отрыв пламени от среза сопла и наличие сверхзвуковых бочек. Расчет скорости истечения микроструи ($U = Q/S$) не совсем корректен (не учтены сжимаемость, изменение плотности и т. д.), тем не менее, по-видимому, она близка к сверхзвуковой скорости, на что указывает изменение самого механизма горения в ситуации зажигания микроструи вдали от среза сопла по сравнению с ее зажиганием вблизи среза сопла.

Это наглядно иллюстрирует рис. 7. Видно, что диапазон расхода газа (Q) в ситуации зажигания микроструи вдали от среза сопла и наличия ее сверхзвукового горения значительно уже, чем в ситуации зажигания микроструи вблизи среза сопла и наличия ее дозвукового горения при сохранении области перетяжки пламени. Однако следует отметить, что этот диапазон все же значительно шире, чем в ситуации истечения микроструи из цилиндрического микросопла (см. рис. 4). Есть еще одна особенность



Рис. 5. Теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода (зажигание вдали от среза сопла), истекающей из сверхзвукового квазимикросопла Лавала 3 в зависимости от объемного расхода газа (Q , $\text{см}^3/\text{с}$): $a - 50$, $b - 60$, $c - 70$, $d - 80$, $e - 90$, $f - 100$ (или скорости истечения микроструи, рассчитанной как $U = Q/S$: 1 923, 2 308, 2 692, 3 077, 3 461, 3 846 м/с соответственно)



Рис. 6. Теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода (зажигание вдали от среза сопла), истекающей из сверхзвукового квазимикросопла Лавала 4 в зависимости от объемного расхода газа (Q , $\text{см}^3/\text{с}$): $a - 150$, $b - 160$, $c - 170$, $d - 180$, $e - 190$, $f - 195$ (или скорости истечения микроструи, рассчитанной как $U = Q/S$: 1 685, 1 798, 1 910, 2 022, 2 135, 2 191 м/с соответственно)

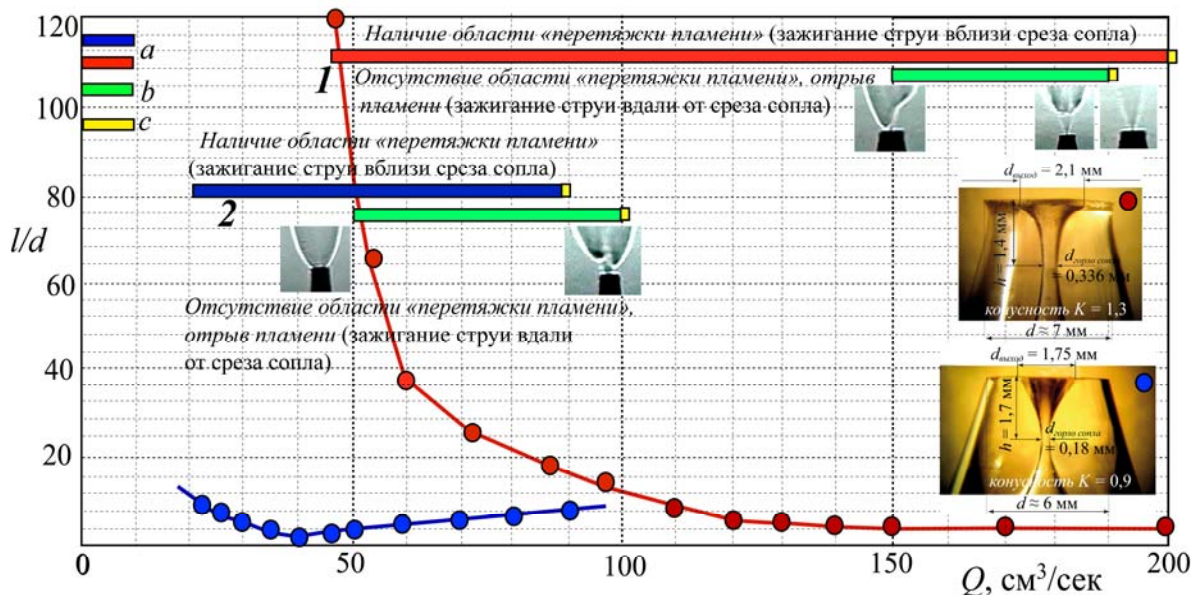


Рис. 7. Графики наличия области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи водорода (см. [14. Рис. 15, 21]) при ее зажигании вблизи среза сопла. Диапазоны расхода газа (Q) как при наличии (зажигание вблизи среза сопла), так и в отсутствие (зажигание вдали от среза сопла) области перетяжки пламени – 1, 2: a – зажигание вблизи среза сопла; b – зажигание вдали от среза сопла; c – срыв пламени

механизма сверхзвукового горения микроструи водорода, истекающей из квазисверхзвукового микросопла Лавала, при ее зажигании вдали от среза сопла. Отрыв пламени от среза сопла практически не виден (см. рис. 5, $a-e$), хотя сверхзвуковые бочки видны отчетливо. На теневых картинах невозможно увидеть, что происходит внутри микросопла. Тем не менее мы предполагаем, что сверхзвуковые бочки

уже существуют на ламинарной микроструе внутри микросопла и далее наблюдаются уже на микроструе внутри пламени. Предполагаемая схема такого механизма развития горения, инициированного зажиганием микроструи водорода вдали от среза сопла, представлена на рис. 8.

Таким образом, обнаружено два механизма стабилизации диффузионного горения микроструи водорода в зависимости

от способа ее зажигания (вблизи и вдали от среза сопла).

Первый механизм связан с зажиганием микроструи водорода вблизи среза сопла. В данной ситуации стабилизирующим фактором является наличие горения в области перетяжки пламени в широком диапазоне расхода газа (или скорости ее истечения вплоть до трансзвуковых скоростей). Важным фактором при этом является прогрев толстостенного микросопла от области перетяжки пламени, находящейся непосредственно на срезе сопла.

Второй механизм связан с зажиганием микроструи водорода вдали от среза сопла. В данной ситуации стабилизирующим фактором является образование сверхзвуковых бочек на микроструе, стабилизирующих процесс развития самой сверхзвуковой микроструи как внутри сопла и в зоне отрыва пламени, так и внутри самого приподнятого пламени. Важным фактором при этом является приподнятость пламени, т. е. невозможность нагревания сопла. Зажигание микроструи вдали от среза сопла при малых скоростях ее истечения приводит к образованию области перетяжки пламени из-за преобладания скорости химической реакции процесса горения над скоростью микроструи. Однако при равенстве этих скоростей либо превышении скорости истечения микроструи над скоростью химической реакции горения ее

зажигание вдали от среза сопла приводит к отрыву пламени от среза. Таким образом, режим сверхзвукового горения микроструи водорода при ее зажигании вблизи среза сопла достигался путем использования тонкостенных квазимикросопел Лавалья, позволивших по причине их малой теплоемкости обеспечить отрыв пламени от среза сопла при определенной скорости истечения микроструи и достичь сверхзвукового горения (см. [15]). С другой стороны, сверхзвуковое горение микроструи водорода достигалось путем отрыва пламени от среза сопла с помощью ее зажигания вдали от среза сопла при достаточно большой скорости, когда уже не реализовывался режим перетяжки пламени. Интересно в связи с этим утверждением рассмотреть и сравнить механизм диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из тонкостенного металлического квазимикросопла Лавалья при зажигании микроструи вблизи [15] и вдали от среза сопла.

На рис. 9 показаны теневые картины развития пламени в зависимости от объемного расхода газа (Q) при диффузионном горении микроструи водорода (зажигание вдали от среза сопла), истекающей из сверхзвукового металлического квазимикросопла Лавалья 5 (см. [15]). Видны признаки сверхзвукового течения: отсутствие области перетяжки пламени, отрыв



Рис. 8. Предполагаемая схема развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из сверхзвукового квазимикросопла Лавалья 3, в ситуации ее зажигания вдали от среза сопла и при отрыве пламени вблизи (а) и вдали (б) от среза сопла: сверхзвуковые бочки внутри микросопла (1), внутри пламени (2) и в области отрыва пламени (3)

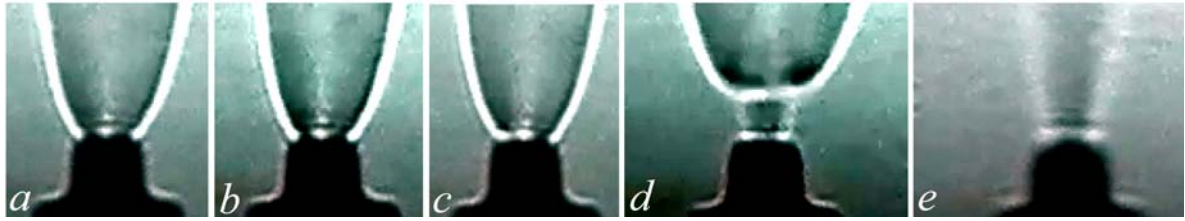


Рис. 9. Теневые картины развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода (зажигание вдали от среза сопла), истекающей из сверхзвукового квазимикросопла Лавалья 5 (см. рис. 1 и работу [15]) в зависимости от объемного расхода газа (Q , $\text{см}^3/\text{с}$): $a - 110$; $b - 120$; $c - 140$; $d - 160$; $e - 162$ (или скорости истечения микроструи, рассчитанной как $U = Q/S$: 691, 755, 880, 1 006, 1 019 м/с соответственно)

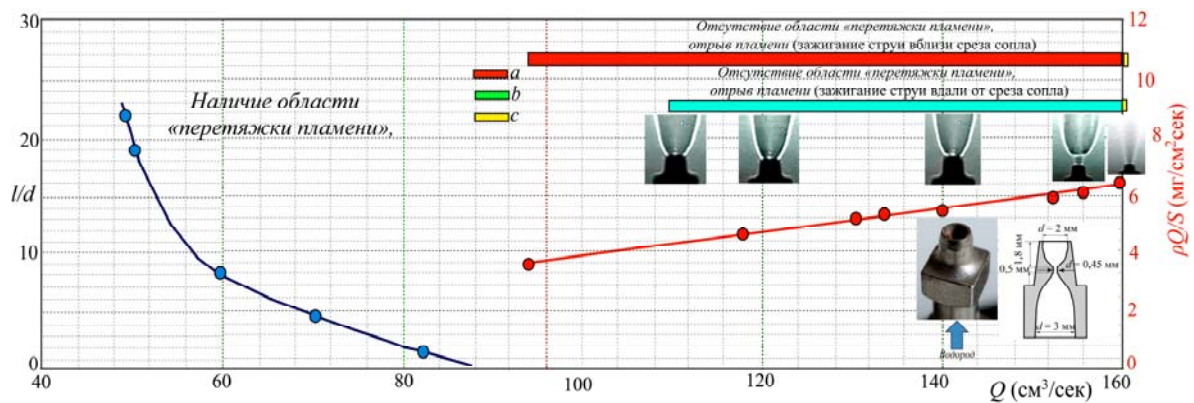


Рис. 10. Графики наличия и отсутствия области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи водорода (см. [15. Рис. 6]) при ее зажигании вблизи от среза сопла. Диапазоны расхода газа (Q) в случае сверхзвукового течения микроструи водорода при ее зажигании вблизи (a) и вдали (b) от среза сопла; c – срыв пламени

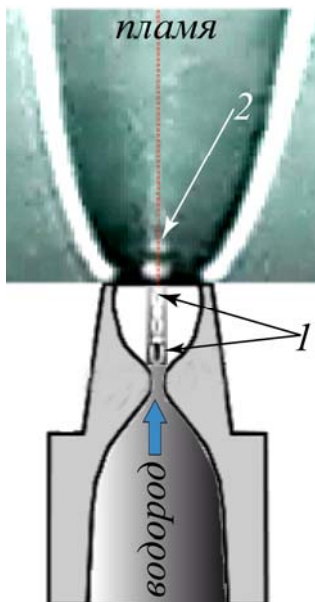


Рис. 11. Предполагаемая схема развития пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из сверхзвукового квазимикросопла Лавалья 5 (см. рис. 1 и работу [15]), в ситуации ее зажигания вдали от среза сопла: сверхзвуковые бочки внутри микросопла – 1, внутри пламени – 2

пламени от среза сопла и наличие сверхзвуковых бочек. Расчет скорости истечения микроструи ($U = Q/S$) не совсем корректен (не учтены сжимаемость, изменение плотности и т. д.), тем не менее, по-видимому, она близка к сверхзвуковой, на что указывает изменение самого механизма горения в ситуации зажигания микроструи вдали от среза сопла по сравнению с ее зажиганием вблизи среза сопла.

Более наглядно это проиллюстрировано на рис. 10. Видно, что диапазон расхода газа (Q) в ситуации зажигания микроструи вдали от среза сопла и при наличии ее сверхзвукового горения несколько уже, чем в ситуации зажигания микроструи вблизи среза сопла. В принципе, в обеих ситуациях механизмы сверхзвукового горения микроструи водорода практически идентичны: наблюдается отрыв пламени, отсутствие области перетяжки пламени и наличие сверхзвуковых бочек. Есть одна особенность механизма сверхзвукового горения микроструи водорода, истекающей из квазисверхзвукового микросопла Лавалья 5, при ее зажигании

вдали от среза сопла. Отрыв пламени от среза сопла практически не виден (см. рис. 9, *a–c*), хотя сверхзвуковые бочки видны отчетливо. На теневых картинах невозможно наблюдать, что происходит внутри микросопла, тем не менее мы предполагаем, что сверхзвуковые бочки уже существуют на ламинарной микроструе внутри микросопла, и далее наблюдаются уже на микроструе внутри пламени. Предполагаемая схема такого механизма развития горения, инициированного зажиганием микроструи водорода вдали от среза сопла, представлена на рис. 11 (по аналогии с рис. 8).

Идентификация сверхзвуковых бочек

Наблюдаемые круглые светлые пятна, идентифицируемые нами как сверхзвуковые бочки, на теневых картинах процесса диффузионного горения круглой микроструи водорода требуют определенного разъяснения (так ли это на самом деле). На рис. 12 показаны теневые картины сверхзвукового истечения газа (в отсутствие горения) из круглого микросопла, полученные различными экспериментаторами [14–18].

Теневые картины сверхзвуковых бочек на рис. 12 очень похожи на наблюдаемые выше структуры, которые мы идентифицируем как сверхзвуковые бочки при диффузионном горении водорода в круглой микроструе. Сверхзвуковые бочки при истечении метана из круглого микросопла в отсутствие горения также наблюдались (рис. 13). Однако горение метана на сверхзвуковой скорости невозможно, в отличие от сверхзвукового горения микроструи водорода, при котором на теневых картинах можно отчетливо наблюдать наличие сверхзвуковых бочек.

Следует заметить, что, вероятно, из-за физико-химических свойств водорода при его истечении из микросопла в отсутствие горения теневые картины не демонстрировали наличие сверхзвуковых бочек, которые наблюдались лишь в процессе его горения.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования диффузионного горения микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла, и получены следующие результаты.

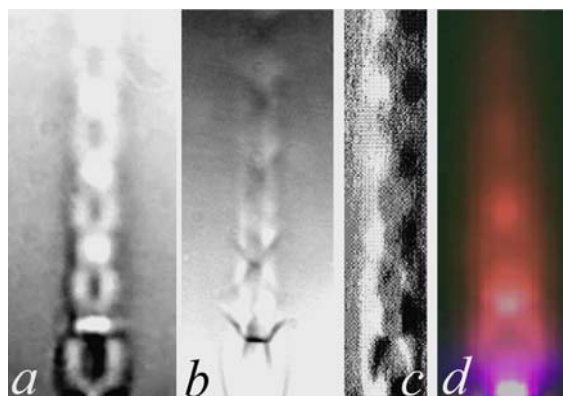


Рис. 12. Теневые картины наличия сверхзвуковых бочек при сверхзвуковом истечении круглой микроструи газа (воздух) в отсутствие горения, полученные из различных источников: *a* – [14]; *b* – [16]; *c* – [17]; *d* – [18]



Рис. 13. Теневая картина наличия сверхзвуковых бочек при сверхзвуковом истечении круглой микроструи метана в отсутствие горения

- Представлен сценарий диффузионного горения круглой микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла.

- Обнаружена стабилизация процесса сверхзвукового диффузионного горения микроструи водорода при ее зажигании вдали от среза сопла по причине отсутствия связи между пламенем и выходным микросоплом, т. е. отсутствием нагрева последнего.

- Показано, что отсутствие нагрева микросопла по причине приподнятости пламени приводит к реализации сверхзвукового механизма горения микроструи водо-

рода, характеризуемого исчезновением области перетяжки пламени, отрывом пламени и наличием сверхзвуковых бочек.

- Установлено, что одним из факторов, стабилизирующих сверхзвуковое горение, является наличие сверхзвуковых бочек как в струе, так и в пламени.

Список литературы

1. Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. пособие / Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2013. 239 с. + CD-диск (423 мБ).

2. Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A. Visualization of Conventional and Combusting Subsonic Jet Instabilities. Dordrecht: Springerbook, 2015. 127 p. (ISBN 978-3-319-26957-3, Book DOI 10.1007/978-3-319-26958-0).

3. Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between acoustically excited diffusion flames of tube and slit burners // Proc. of the 11th Asian Symposium on Visualization. Niigata, Japan, 2011. P. 1–6.

4. Kozlov V. V., Grek G. R., Katasonov M. M., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Stability of Subsonic Microjet Flows and Combustion // Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. 2013. Vol. 3. Iss. 1. P. 108–111.

5. Кривокопытнов М. С., Голуб В. В., Володин В. В. Влияние акустических колебаний на диффузионное горение метана // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 38, вып. 10. С. 57–63.

6. 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.

7. Козлов В. В., Грек Г. Р., Катасонов М. М., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Структура пламени при горении пропана в круглой и плоской микроструе в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // ДАН. 2014. Т. 459, № 5, С. 562–566.

8. 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.

9. 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.

10. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of hydrogen in round and plane microjets in transverse acoustic field at small Reynolds numbers as compared to propane combustion in the same conditions (Part I) // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Iss. 44. P. 20231–20239. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.27>

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

12. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.

13. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets (Part II) // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41. Iss. 44. P. 20240–20249. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.039>

14. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода (Часть 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение) // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 27–45.

15. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода (Часть 2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение) // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 46–59.

16. Charney Anchilyn Davy. Surface Flow Measurements of Supersonic Impinging Micro-

jets. Electronic Theses. Florida State University. Chapter 4, 4.2. Supersonic Free Jets. 2003. P. 52–58

17. *Phalnikar K. A., Alvi F. S., Shih C.* Behavior of Free and Impinging Supersonic Microjets // AIAA 2001-3047, Department of Mechanical Engineering, Florida A&M University and Florida State University, Tallahassee, FL 32310. 31st AIAA Fluid Dynamics

Conference & Exhibit. Anaheim, CA, 2001. P. 1–15

18. *Koh T. L., Gordon M. J.* Thin-film deposition with high pressure capillary microdischarges under different supersonic flow and shock regimes // Journal of Physics D: Applied Physics 2013. Vol. 46. No. 49. P. 1–65.

Материал поступил в редколлегию 30.06.2017

V. V. Kozlov^{1,3}, G. R. Grek¹, G. V. Kozlov¹, Yu. A. Litvinenko¹, A. G. Shmakov^{2,3}

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

² *Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

³ *Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

kozlov@itam.nsc.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DIFFUSION COMBUSTION OF A ROUND HYDROGEN MICROJET AT ITS IGNITION FAR FROM THE NOZZLE EXIT

A scenario of subsonic diffusion combustion of the round hydrogen microjet at its ignition far from the nozzle exit is proposed. Stabilization of supersonic diffusion combustion of a hydrogen microjet at its ignition far from the nozzle exit due to the absence of connection between flame and micronozzle exit, i.e. absence of the nozzle heating is found. It is shown that absence of the nozzle heating because of the flame lifted leads to the supersonic mechanism of the hydrogen microjet combustion characterized by disappearance of the «bottleneck flame region», flame separation and supersonic cells occurrence. It is found that one of the stabilizing supersonic combustion factors is existence of the supersonic cells both in jet, and flame.

Keywords: ignition of a round hydrogen microjet far from the nozzle exit, diffusion combustion, stabilizing of the supersonic micro combustion.