

В. В. Вихорев^{1,3}, **Г. Р. Грек**¹, **В. В. Козлов**^{1,3}, **М. В. Литвиненко**^{1,3}
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*

*grek@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru, litmar.nsu@gmail.com
litur@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru*

ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ КРУГЛОЙ СТРУИ ВОДОРОДА, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО КАНАЛА С ВИХРЯМИ ДИНА *

Представлены результаты экспериментальных исследований горения круглой струи водорода, истекающей из криволинейного микросопла с вихрями Дина. Обнаружено наличие «области перетяжки пламени», как и в ситуациях горения микроструй водорода, истекающих из прямолинейных круглых и плоских микросопел. Показано, что взаимодействие кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина приводит как к искажению самой области перетяжки пламени, так и к искривлению фронта градиента плотности между ламинарным горением водорода в области перетяжки пламени и его турбулентным горением. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать искажение области турбулентного пламени еще при наличии области перетяжки пламени. Показано, что позиция этого искажения находится в районе максимальной скорости в профиле скорости на срезе сопла и что данное искажение явно связано с воздействием вихрей Дина и кольцевых вихрей. Дальнейший рост скорости истечения микроструи приводит к исчезновению области перетяжки пламени, и пламя постепенно отрывается от среза сопла, но искажение области турбулентного пламени сохраняется. Исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла указывают на переход дозвукового диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина к сверхзвуковому горению и возможному появлению сверхзвуковых бочек.

Ключевые слова: круглая микроструя водорода с вихрями Дина, диффузионное горение, область перетяжки пламени, взаимодействие вихрей Дина с кольцевыми вихрями Кельвина – Гельмгольца, деформация пламени, дозвуковое и сверхзвуковое горение.

Введение

Как известно [1], в криволинейных трубах на более быстрые частицы жидкости,

движущиеся в середине трубы, действует большая центробежная сила, чем на менее быстрые частицы, движущиеся вблизи стенок. Это приводит к возникновению вто-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант НШ-8788.2016.1), РФФИ (грант № 16-19-10330) и РФФИ (грант № 16-07-00946а).

ричного течения, которое в середине трубы направлено к внешнему закруглению, т. е. к центру кривизны (рис. 1). Таким образом, вторичное течение в криволинейном канале создает условия формирования двух противовращающихся вихрей, которые в научной литературе получили название «вихри Дина» (см. рис. 1, справа), по фамилии ученого, впервые исследовавшего их теоретически.

Результаты предварительных качественных экспериментальных исследований круглой ламинарной струи, сформированной на выходе из криволинейного канала, в котором возникают вихри Дина, представлены ниже и в работе [2]. Угол кривизны канала $\alpha = 90^\circ$, число Дина $D = \bar{u}R/\nu \cdot \sqrt{R/r} = 6320$, где R – радиус трубы (0,01 м), а r – радиус ее кривизны (0,08 м). $\sqrt{R/r} = 0,35$, $\bar{u} = 6320 \cdot 0,000015/0,35 \cdot 0,01 \approx 27$ м/с.

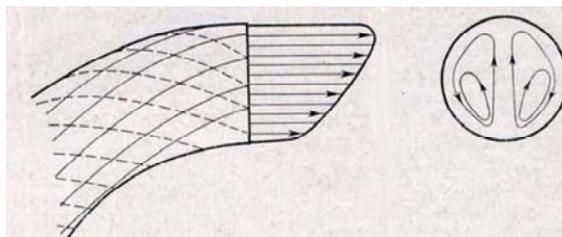


Рис. 1. Схема течения в криволинейной трубе по Прандтлю [1]

На рис. 2 (взято из работы [2]) показаны картины дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи непосредственно на срезе выходного отверстия криволинейного канала (а) и на различных расстояниях вниз по потоку (б, в). На рис. 2, а видны две области внутри струи, которые, по-видимому, и представляют собой два противовращающихся вихря Дина. Далее вниз по потоку

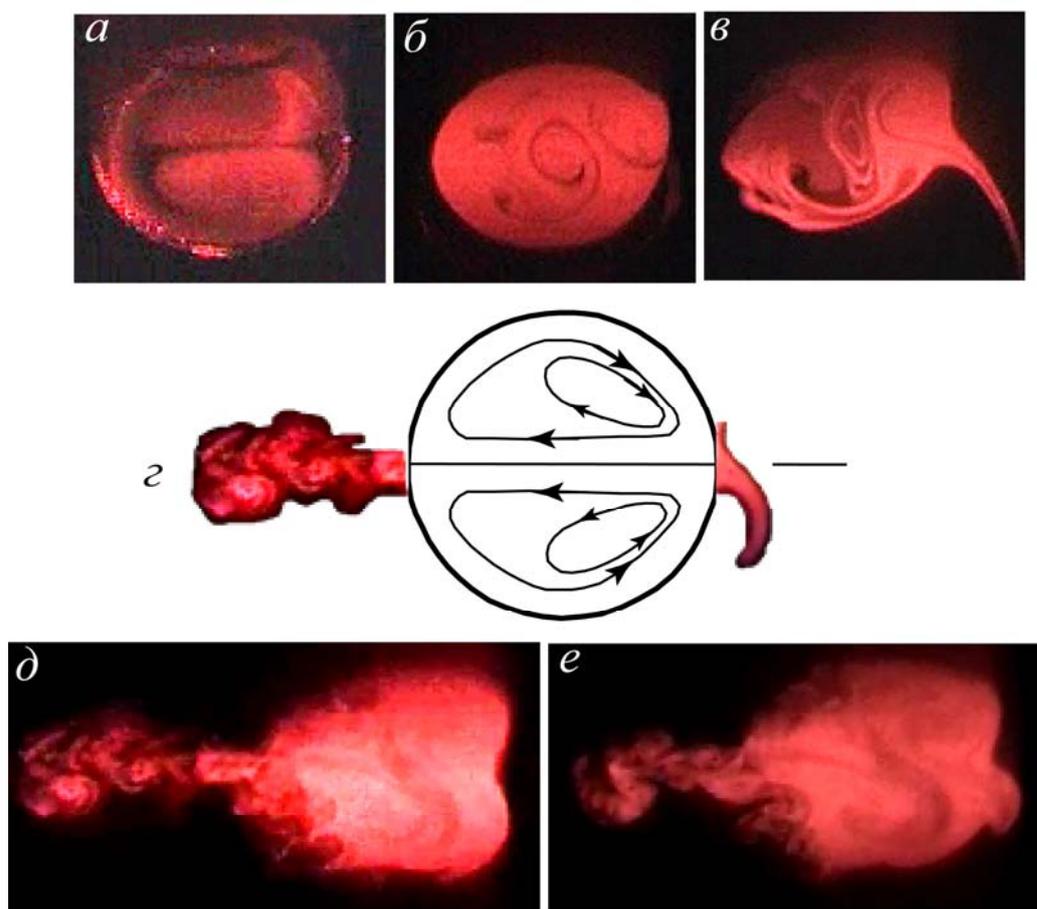


Рис. 2. Картины дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи с вихрями Дина непосредственно на срезе выходного отверстия криволинейного канала (а) и на различных расстояниях вниз по потоку (б–е), выбросы газа из струи показаны на схеме (г) [2]

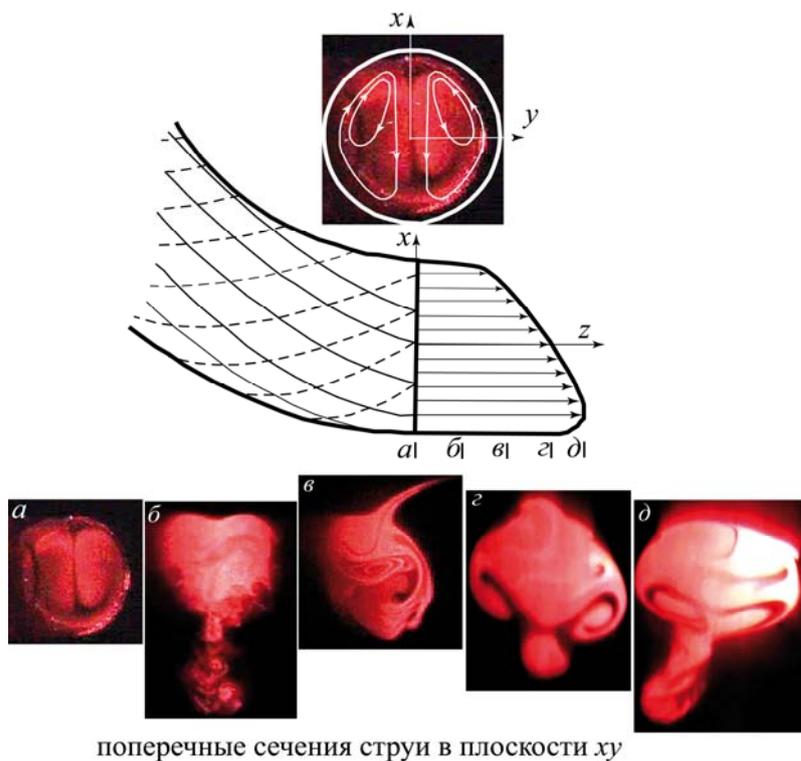


Рис. 3. Картины дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи с вихрями Дина в плоскости $xу$ на различных расстояниях вниз по потоку [2]

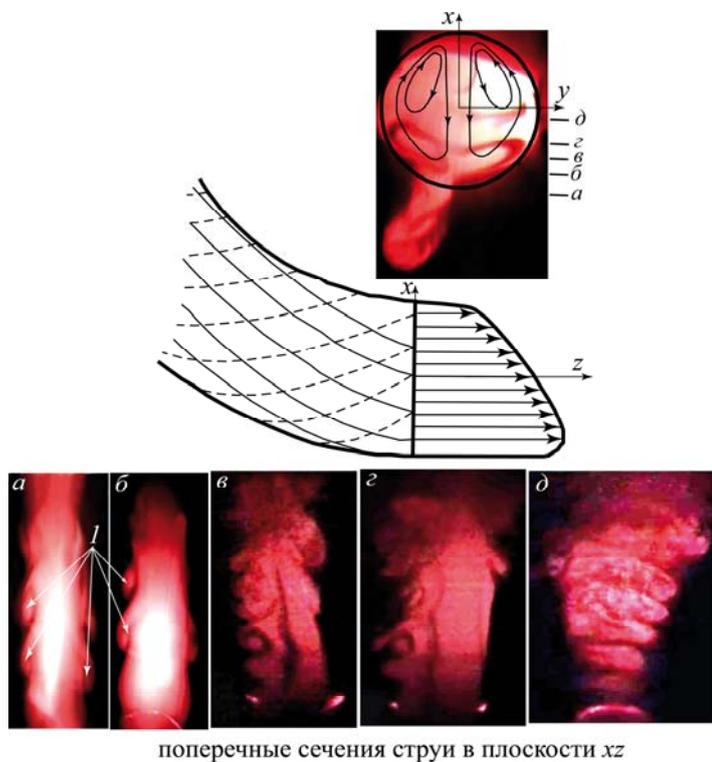


Рис. 4. Картины дымовой визуализации поперечного сечения круглой струи с вихрями Дина в плоскости xz в различных позициях ($a - д$); 1 – кольцевые вихри Кельвина – Гельмгольца, ($в - д$) – результат взаимодействия вихрей Дина с кольцевыми вихрями [2]

ку можно наблюдать определенную деформацию вихревых структур, тем не менее отчетливо видна пара вихрей (рис. 2, б). Более сложное вихревое движение внутри струи видим на рис. 2, в – с выбросом газа из струи (направление показано стрелкой на рис. 2, з). Еще далее вниз по потоку развитие струи характеризуется наличием двух вихревых структур внутри ядра потока и выбросом газа (см. рис. 2, д, е) как влево (см. рис. 2, з, д), так и вправо (см. рис. 2, з, е). Следует отметить, что если выброс вправо имеет ламинарный характер течения, то выброс влево представляет собой скорее вихревой предтурбулентный след.

На рис. 3 (взято из работы [2]) показана схема струи с вихрями Дина и картины дымовой визуализации струи в различных сечениях в плоскости $xу$. Ясно видны два противорвращающихся вихря Дина на срезе сопла (см. рис. 3, сечение «а»). Далее вниз по потоку, в сечениях «б–д», отображен сложный процесс взаимодействия вихрей Дина с кольцевыми вихрями, генерируемыми на выходе струи из сопла по причине ударного профиля скорости на его срезе (см. схему на рис. 3).

В сечениях «б, в» (промежутки между последовательностью кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца) ясно видны вихри Дина, а также ламинарный и вихревой выбросы из струи, как отмечалось выше. Сложный процесс взаимодействия кольцевых вихрей с вихрями Дина представлен на рис. 3, з, д. В середине картин можно выделить следы вихревой пары вихрей Дина. На периферии струи, по-видимому, идет процесс сворачивания кольцевого вихря в новую вихревую пару, расположенную непосредственно перед вихревым выбросом (см. рис. 3, д).

Последовательность кольцевых вихрей в струе хорошо представлена на картине дымовой визуализации общего вида струи в сечении «а» в плоскости xz на рис. 4 (взято из работы [2]). Картины дымовой визуализации течения в струе в плоскости xz для различных позиций «б–д» в направлении оси y отражают следующие особенности течения. Ясно видна граница раздела между новой вихревой парой и областью деформированных вихрей Дина (см. рис. 4, в, з). Последовательность вихревых колец сохраняется, несмотря на их искажение в процессе взаимодействия с вихрями Дина (см. рис. 4, в–д). Можно также наблюдать разворот всей

струи из-за разности в распределении средней скорости на срезе сопла (см. рис. 4, д).

Следует отметить, что полученные качественные результаты экспериментального исследования течения в струе, формируемой на выходе из криволинейного канала, не могут дать полного и количественного представления о механизме ее развития, процессах сложного взаимодействия вихревых структур и ее турбулизации в итоге. Для этого необходимо провести детальные количественные измерения, например, с помощью термоанемометрии или PIV-методики. Проведение таких исследований запланировано.

В работе [3] установлено, что на выходе из криволинейного канала сохраняется двухвихревое вторичное течение, которое остается когерентным до 5–7 калибров ниже по течению. Показано, что затопленная круглая струя с вихрями Дина восприимчива к акустическому воздействию, в частности происходит модуляция течения частотой наложенного поля. Установлено, что в результате развития круглой струи с вихрями Дина возникают два выброса разной интенсивности и восприимчивости к акустическим колебаниям.

В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию поперечных акустических колебаний различной частоты на затопленные круглые дозвуковые струи, сформированные в криволинейном канале ($d = 20; 9; 1,5$ мм). При помощи лазерно-дымной визуализации получены мгновенные картины сечений струй, которые показали наличие в струях двух мод неустойчивостей (вихри Кельвина – Гельмгольца и вихри Дина) и их взаимодействие. Показано влияние частоты акустических колебаний на модуляцию струи, в частности на длину волны неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Сравниваются картины диффузионного горения струи пропана для сопла с диаметром $d = 1,5$ мм без акустического воздействия и с акустическим воздействием. Замечено, что пламя при диффузионном горении пропана подвержено трансформации под действием акустического поля и развивающихся в струе неустойчивостей.

Механизм микроструйного горения углеводородных газов (пропан, метан и др.) как при наличии, так и в отсутствие акустического воздействия детально рассмотрен в ра-

ботах [5–7]. Детальные особенности механизма диффузионного горения микроструи водорода выявлены в работах [8–10].

Цель данной работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из криволинейного микросопла с вихрями Дина.

Диффузионное горение водорода, истекающего из криволинейного канала с вихрями Дина

На рис. 5 показаны криволинейный канал и схема образования вихрей Дина на выходе из криволинейного канала при исследовании

диффузионного горения струи ($d=2$ мм) и микроструи ($d=0,4$ мм) водорода. В данной ситуации на выходе струи (микроструи) из короткого криволинейного канала на срезе сопла реализуется ударный профиль скорости с генерацией кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца [10]. Таким образом, на структуру и характеристики развития пламени при диффузионном горении струи могут оказывать влияние как два противовращающихся вихря Дина, так и кольцевые вихри. Используя методику теневой съемки (метод Теплера) и записывая процесс развития пламени при различной скорости истечения струи на цифровую видеокамеру, мы получили набор теневых картин (рис. 6).

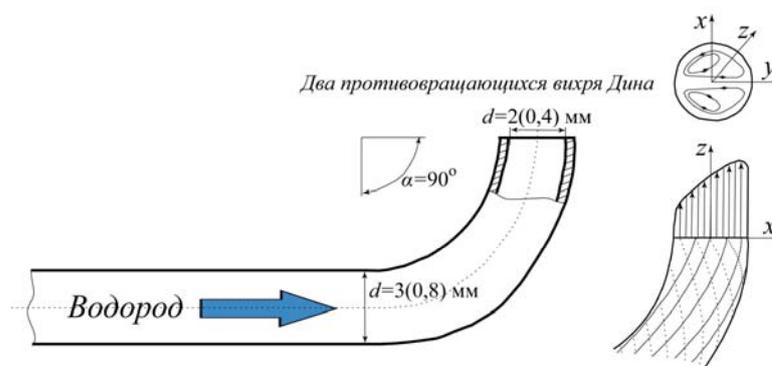


Рис. 5. Схема соплового аппарата для реализации горения водорода струи (микроструи) с вихрями Дина в экспериментах

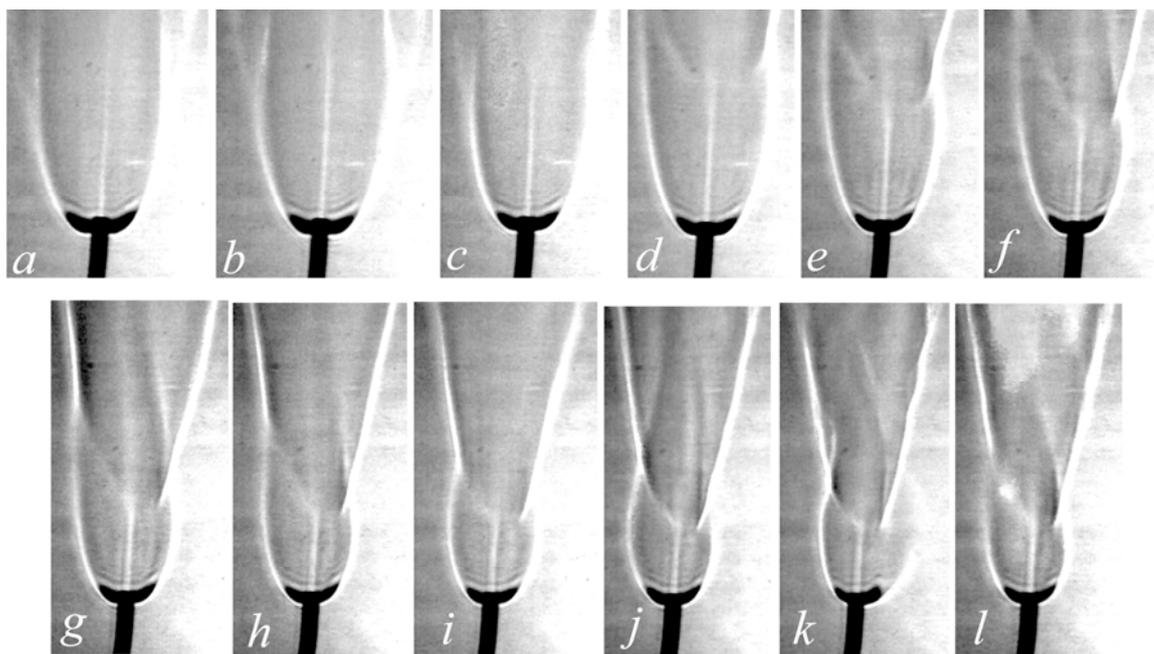


Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из сопла с диаметром выходного отверстия $d = 2$ мм, при различной скорости истечения газа (м/с): $a - 25,5$; $b - 40$; $c - 52,5$; $d - 58$; $e - 70$; $f - 78$; $g - 86$; $h - 92$; $i - 100$; $j - 107$; $k - 115$; $l - 120$

Как видно из рис. 6, область перетяжки пламени, обычно наблюдаемая при диффузионном дозвуковом горении круглых и плоских микроструй водорода, истекающих из прямых сопел [11–16], наблюдается и в данном случае, т. е. при горении микроструи водорода с вихрями Дина. Причем, как и в ситуациях, описанных в [11–16], с ростом скорости истечения микроструи размер области перетяжки пламени уменьшается.

Однако можно наблюдать и определенные изменения в структуре и характеристиках развития пламени, связанные, вероятно, с воздействием на процесс взаимодействующих друг с другом вихрей Кельвина – Гельмгольца и Дина. Во-первых, можно наблюдать искривление фронта градиента плотности (3) между ламинарным горением водорода в области перетяжки пламени и его турбулентным горением (см. рис. 6, 7).

Во-вторых, сама конфигурация и размер области перетяжки пламени подвержены искажению: это явно видно на рис. 7 (слева), где границы и размер области перетяжки пламени в районе максимальной и минимальной скорости на срезе сопла отличаются друг от друга в два раза. С другой стороны, область перетяжки пламени в ситуации прямого сопла (на рис. 6, справа) сохраняет сферическую форму при наличии параболического профиля скорости на срезе сопла и в отсутствие как вихрей Кельвина – Гельмгольца, так и вихрей Дина.

Значительно более высокие скорости истечения микроструи с вихрями Дина при диффузионном горении в ней водорода были достигнуты при диаметре выходного отверстия микросопла $d = 0,4$ мм (рис. 8). Все характеристики развития пламени, рассмотренные в предыдущей ситуации, сохраняются и в данном случае. Однако с ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать и новые явления. При скорости микроструи $u = Q/S = 952$ м/с (см. рис. 8, g), где Q – объемный расход водорода, а S – площадь поперечного сечения выходного отверстия микросопла, можно наблюдать искажение области турбулентного пламени еще при наличии области перетяжки пламени. Далее, с ростом скорости истечения микроструи, область перетяжки пламени исчезает, пламя постепенно отрывается от среза сопла, но искажение области турбулентного пламени сохраняется (см. рис. 8, h–l). Следует заметить, что позиция этого

искажения находится в районе максимальной скорости в профиле скорости на срезе сопла, данное искажение явно связано с воздействием вихрей Дина и кольцевых вихрей.

Исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла (см. рис. 8, h–m) указывают на переход дозвукового диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина к сверхзвуковому горению [17].

На рис. 9, 10 показаны графики зависимости изменения размера области перетяжки пламени (l/d) и динамики развития отрыва пламени в отсутствие области перетяжки пламени от скорости ($U/U_{звук}$), а также объемного (см. рис. 9) и массового (см. рис. 10) расхода газа при истечении микроструи водорода с вихрями Дина. Символом l обозначена ситуация наличия вихрей Дина

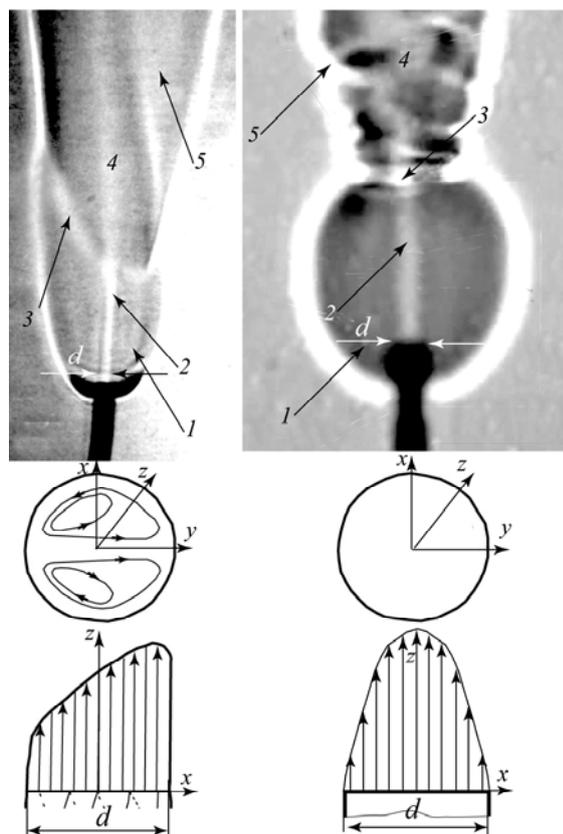


Рис. 7. Сравнение теневых картин диффузионного горения водорода, истекающего из криволинейного (слева) и прямого (справа) круглого микросопла: 1 – область перетяжки пламени; 2 – ламинарная микроструя; 3 – область градиента плотности газа; 4 – турбулентная микроструя; 5 – турбулентное пламя. Схемы течения с профилями скорости на срезе сопла

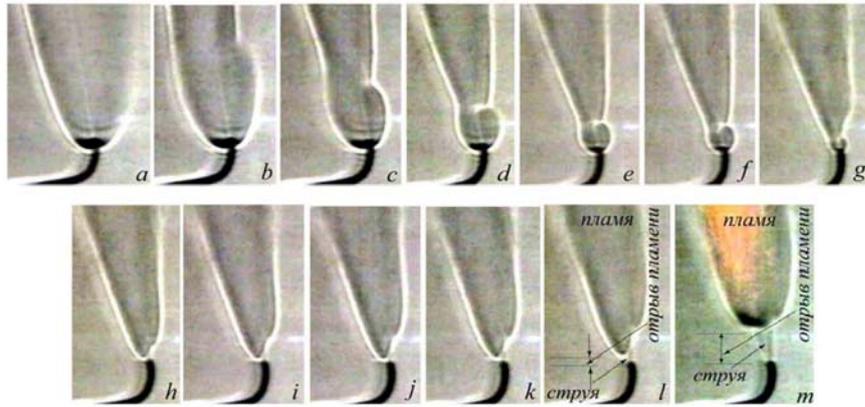


Рис. 8. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из сопла с диаметром выходного отверстия $d = 0,4$ мм, при различной скорости истечения газа (м/с): $a - 484$; $b - 548$; $c - 587$; $d - 635$; $e - 873$; $f - 921$; $g - 952$; $h - 1032$; $i - 1040$; $j - 1111$; $k - 1151$; $l - 1190$; $m - 1309$

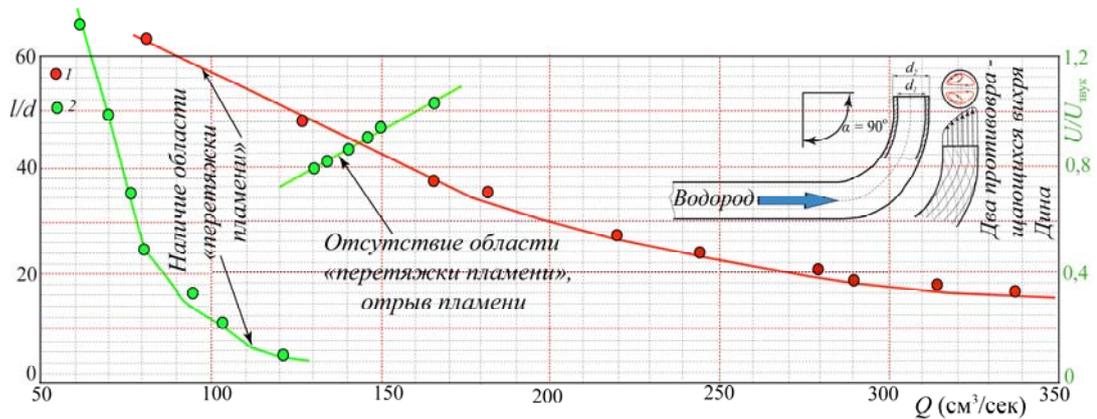


Рис. 9. График зависимости изменения размера области перетяжки пламени (l/d) и динамики развития отрыва пламени в отсутствие области перетяжки пламени от скорости ($U/U_{\text{звук}}$) и объемного расхода газа (Q) при истечении струи и микроструи водорода с вихрями Дина: 1 – наличие вихрей Дина и области перетяжки пламени, $d_1 = 2$ мм ($d_2 = 3$ мм); 2 – наличие вихрей Дина с областью перетяжки пламени и отрыв пламени при отсутствии области перетяжки пламени, $d_1 = 0,4$ мм ($d_2 = 0,6$ мм)

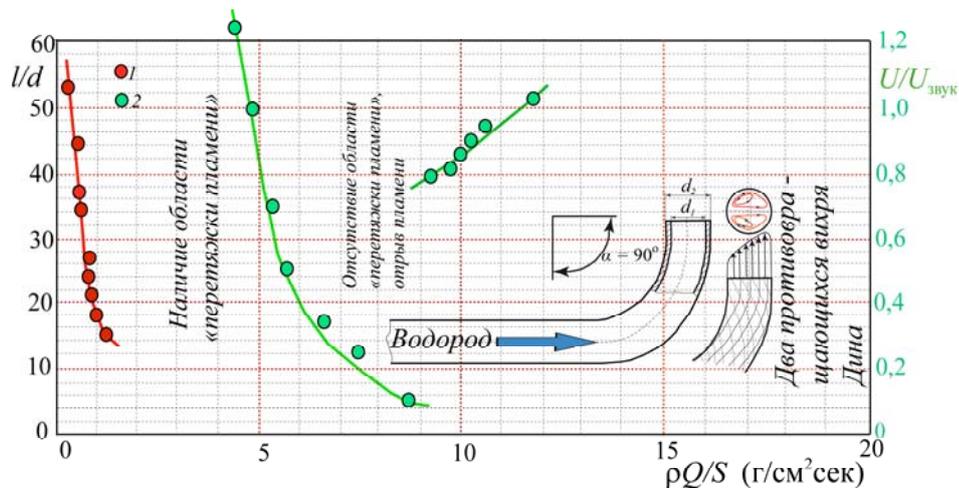


Рис. 10. График зависимости изменения размера области перетяжки пламени (l/d) и динамики развития отрыва пламени в отсутствие области перетяжки пламени от скорости ($U/U_{\text{звук}}$) и массового расхода газа ($\rho Q/S$) при истечении струи и микроструи водорода с вихрями Дина: 1 – наличие вихрей Дина и области перетяжки пламени, $d_1 = 2$ мм ($d_2 = 3$ мм); 2 – наличие вихрей Дина с областью перетяжки пламени и отрыв пламени в отсутствие области перетяжки пламени, $d_1 = 0,4$ мм ($d_2 = 0,6$ мм)

и области перетяжки пламени при диаметре выходного отверстия сопла $d_1 = 2$ мм ($d_2 = 3$ мм), $S_{\text{сопла}} = 0,0314$ см². Символом 2 обозначена ситуация наличия вихрей Дина с областью перетяжки пламени и отрыва пламени при отсутствии области перетяжки пламени при диаметре выходного отверстия сопла $d_1 = 0,4$ ($d_2 = 0,6$ мм), $S_{\text{сопла}} = 0,00126$ см².

Следует заметить, что скорость истечения микроструи, если ее рассчитывать по соотношению $U = Q/S$, составляет примерно от 0,8 до 1,02 от скорости звука для водорода при расходе водорода $Q = 130\text{--}165$ см³/с (см. рис. 8, *h, m*), т. е. достаточно близко к трансзвуку. Однако этот факт не отражает реальной скорости микроструи, поскольку при таком определении скорости не учитываются многие факторы, влияющие на трансзвуковую скорость течения газа. По-видимому, резкое изменение в характеристиках развития процесса горения (исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени) по сравнению с тем, что наблюдалось в ситуации наличия области перетяжки пламени (см. рис. 8, *a-g*), а также в работе [18] на дозвуковой скорости истечения микроструи, в данной ситуации все указывает

на то, что мы имеем дело со сверхзвуковым истечением и горением микроструи водорода с вихрями Дина. Данное предположение можно подтвердить при более детальном рассмотрении картины горения микроструи водорода в области близкой к срезу микросопла (см. рис. 8). Можно наблюдать процесс роста величины отрыва пламени от среза сопла с увеличением объемного расхода водорода ($Q = 130\text{--}165$ см³/с).

Также можно высказать предположение о возможности существования сверхзвуковых бочек на микроструе водорода, как это наблюдается при сравнении теневых картин сверхзвукового истечения воздуха из прямого и искривленного под углом 90° и 180° микросопла (рис. 11). Наличие сверхзвуковых бочек наблюдалось при горении микроструи водорода как на струе, так и пламени в работе [17], а вероятность их наличия при горении микроструи водорода, истекающей из криволинейного сопла с вихрями Дина, демонстрирует сравнение теневых картин на рис. 12.

Таким образом, по наблюдаемым косвенным признакам можно утверждать, что в данной ситуации скорость истечения микроструи водорода и ее диффузионное

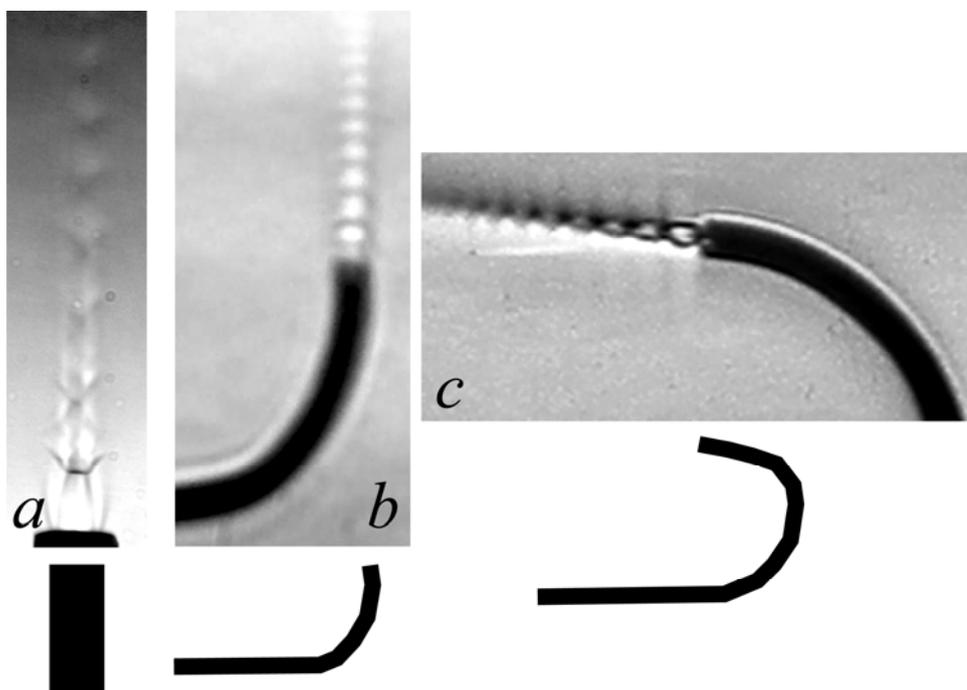


Рис. 11. Теневые картины наличия сверхзвуковых бочек при сверхзвуковом истечении воздуха из прямого (*a*, взято из работы [18]) и искривленного под углом 90° (*b*) и 180° (*c*) микросопла с вихрями Дина, $d_{\text{сопла}} = 0,4$ мм

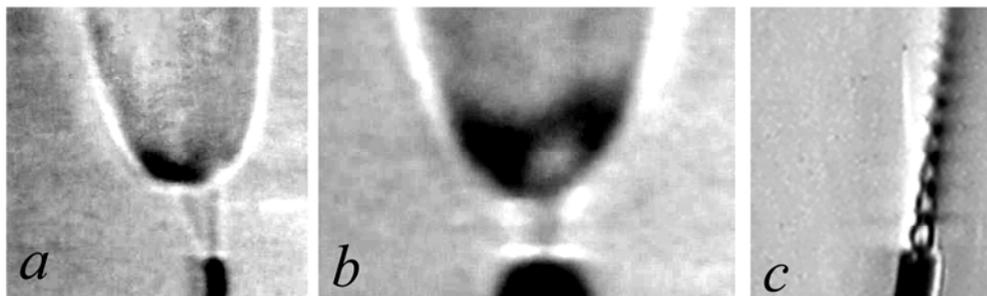


Рис. 12. Теневые картины отрыва пламени от среза микросопла при сверхзвуковом горении микроструи водорода, истекающей из искривленного микросопла с вихрями Дина (*a*) и тонкостенного квазимикросопла Лавалья (*b*, взято из работы [17]). Сверхзвуковые бочки при сверхзвуковом истечении воздуха из искривленного микросопла с вихрями Дина (*c*), $d_{\text{сопла}} = 0,4$ мм

горение вышли на сверхзвуковую скорость, хотя ее величина и не измерена. Одна из причин выхода на сверхзвуковое течение связана с температурным фактором, а именно с нагревом тонкостенного металлического микросопла малой теплоемкости, которое способно быстро охлаждаться в потоке окружающего воздуха, о чем детально рассказано в работах [17; 18].

Выводы

1. Обнаружено наличие области перетяжки пламени при горении микроструи водорода, истекающей из криволинейного микросопла с вихрями Дина, как и в ситуациях горения микроструй водорода, истекающих из прямолинейных круглых и плоских микросопел.

2. Показано, что взаимодействие кольцевых вихрей Кельвина – Гельмгольца с вихрями Дина приводит как к искажению самой области перетяжки пламени, так и к искривлению фронта градиента плотности между ламинарным горением водорода в области перетяжки пламени и его турбулентным горением.

3. Установлено, что с ростом скорости истечения микроструи можно наблюдать искажение области турбулентного пламени еще при наличии области перетяжки пламени.

4. Показано, что позиция этого искажения находится в районе максимальной скорости в профиле скорости на срезе сопла, и данное искажение явно связано с воздействием вихрей Дина и кольцевых вихрей.

5. Обнаружено, что с ростом скорости истечения микроструи область перетяжки пламени исчезает, пламя постепенно отрывается от среза сопла, но искажение области турбулентного пламени сохраняется.

6. Исчезновение области перетяжки пламени и отрыв пламени от среза сопла указывают на переход дозвукового диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина к сверхзвуковому горению и возможному появлению сверхзвуковых бочек.

Список литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Козлов В. В., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Физические аспекты развития дозвуковых струйных течений // Успехи механики сплошных сред: Сб. науч. тр. к 70-летию академика В. А. Левина. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 331–351.
3. Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Козлов Г. В., Вихорев В. В. Экспериментальное исследование затопленной круглой струи с вихрями Дина // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 2. С. 128–135.
4. Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Вихорев В. В., Козлов Г. В. Влияние акустических колебаний на круглые струи, сформированные в криволинейном канале // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 67–72.
5. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // J. Fluid Mech. 1992. Vol. 245. P. 643–668.

6. Brancher P., Chomaz J. M., Huerre P. Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets // *Phys. Fluids*. 1994. Vol. 6. P. 1768–1774.
7. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука // *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170, № 7. С. 713–742.
8. Козлов В. В., Грек Г. Р., Лефдаль Л. Л., Чернорай В. Г., Литвиненко М. В. Роль продольных локализованных структур в процессе перехода к турбулентности в пограничных слоях и струях (обзор) // *Прикладная механика и техническая физика*. 2002. Т. 43, № 2. С. 62–76.
9. Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р. Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.
10. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.
11. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // *Вестн. НГУ. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 27–41.
12. 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. НГУ. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 52–66.
13. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Диффузионное горение водорода (круглое скошенное сопло) // *Вестн. НГУ. Серия: Физика*. 2015. Т. 10, вып. 2. С. 42–51.
14. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // *Докл. РАН*. 2016. Т. 470, № 2. С. 166–171.
15. 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>
16. 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>
17. 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.
18. 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. Присоединённое пламя, дозвуковое течение) // *Сибирский физический журнал*. 2017. Т. 12, № 2. С. 27–45.

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

¹ *Khristianovich 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*

*grek@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru, litmar.nsu@gmail.com
litur@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru*

DIFFUSION COMBUSTION OF THE ROUND HYDROGEN JET EFFLUX FROM CURVED CHANNEL WITH THE DEAN'S VORTICES

Results of the experimental studies of the round hydrogen jet efflux from curved micronozzle with Dean's vortices are presented in this work. Existence of the «bottleneck flame region» is revealed, as well as in situations of the hydrogen microjet combustion efflux from linear round and plane micronozzles. It is shown that interaction of the Kelvin – Helmholtz ring vortices with Dean's vortices leads to distortion of the «bottleneck flame region» and curvature of front of the gas density gradient between laminar combustion of hydrogen in «bottleneck flame region» and its turbulent combustion. It is found that with growth of the microjet efflux velocity it is possible to observe already and distortion of a turbulent flame region in presence of the «bottleneck flame region». It is shown that position of this distortion is placed in region of the velocity maximum in mean velocity profile at the nozzle exit and obviously this distortion is connected with influence of the Dean's and ring vortices. Further growth of the microjet efflux velocity leads to «bottleneck flame region» disappearance and flame detachment from the nozzle exit, but distortion of the region of a turbulent flame remains. Disappearance of the «bottleneck flame region» and a flame separation from the nozzle exit indicate transition of subsonic diffusion combustion of a hydrogen microjet with Dean's vortices to supersonic diffusion combustion and possible emergence of supersonic cells.

Keywords: round hydrogen microjet with Dean's vortices, diffusion combustion, «bottleneck flame region», interaction of the Dean's vortices with Kelvin – Helmholtz ring vortices, flame deformation, subsonic and supersonic combustion.