

**Ю. А. Литвиненко**

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

*litur@itam.nsc.ru*

## **УСТОЙЧИВОСТЬ ДОЗВУКОВЫХ МАКРО- И МИКРОСТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ И МИКРОСТРУЙНОЕ ГОРЕНИЕ (ОБЗОР)\***

В обзоре представлен цикл работ, посвященный экспериментальному исследованию истечения газовых струй в воздушное пространство. В качестве газа использовались воздух, пропан, водород. Исследования были проведены для различных размеров круглых сопел (от 23 до 0,2 мм) и плоских сопел (от  $3\,000 \cdot 1,5$  до  $0,7 \cdot 0,1$  мм), для различных скоростей истечения в диапазоне чисел  $Re$  для макроструй  $\sim 3\,000\text{--}5\,000$ , и для микроструй  $Re \sim 100\text{--}300$ . По результатам исследований определены механизмы, способствующие росту возмущений в круглой и плоской макроструях, а также способы подавления гидродинамических возмущений в струях. Показаны свойства микроструй при диффузионном горении различных газов, в том числе при акустическом возмущении струи. Показаны особенности диффузионного горения микроструи водорода с образованием так называемой перетяжки пламени и образования двух зон горения – ламинарной и турбулентной.

*Ключевые слова:* микроструя, диффузионное горение, пропан, водород, бифуркация струи, неустойчивость Кельвина – Гельмгольца.

Как известно, процессы, протекающие при истечении газа в затопленное пространство, неизменно связаны с развитием гидродинамической неустойчивости и переходом к турбулентности [1]. Управление такими процессами используется во многих отраслях промышленности, например, позволяет регулировать степень смешения различных газов в камерах сгорания, влиять на уровень шума турбин авиадвигателей и т. д. В практических задачах часто необходимо решить проблему интенсификации смешения струйного течения с окружающим течением газом. В частности, скорость и степень смешения влияют на эффективность горения, уровень тепло- и массопереноса, формиро-

вание загрязнителя, уровень шума струи [1]. Исследованию гидродинамической устойчивости макроструйных течений, процессам смешения и возможности управления такими течениями посвящено много теоретических и экспериментальных работ. Например, к одним из последних работ следует отнести монографию А. С. Гиневского и др. [1], а также обзор с визуализацией высокоскоростных струйных течений, представленный в альбоме В. Г. Пимштейна [2].

Неустойчивость круглой макроструи связана с так называемой неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца, т. е. с возникновением на выходе струи из сопла замкнутых кольцевых вихрей, развитие которых, ниже

---

\* Работа поддержана РФФИ (гранты № 16-08-00425, 16-07-00946), РНФ (грант № 16-19-10330) и частично профинансирована программой Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-8788.2016.1).

по течению, приводит к турбулентному разрушению струи. Большую роль в данном процессе как для дозвуковых, так и для сверхзвуковых струй может играть акустическое воздействие. Такое воздействие интенсифицирует процессы смешения и изменяет частоту генерируемого шума турбулентными струями. Детальные исследования устойчивости и управления турбулентными струйными течениями с помощью акустического воздействия приведены в работе [1]. Исследование процессов развития, взаимодействия и разрушения крупномасштабных возмущений (вихрей) в турбулентных струях при воздействии звука определенной частоты и высокой интенсивности ( $\sim 100\text{--}140$  дБ) представлено в работе [2]. Автор представил серию визуализаций показывающих, взаимодействие скачков уплотнения и других волновых процессов с гидродинамической неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца.

В данном обзоре представлены экспериментальные исследования устойчивости дозвуковых макро- и микроструйных течений и развития таких струй при диффузионном горении. В обзор вошли экспериментальные исследования струйных течений, выполненные за 10 лет. Более подробно некоторые из исследований представлены в работах [3–5].

### Круглая макроструя

Механизм турбулизации круглой макроструи и роль полосчатых структур в данном процессе представлены в работах [3; 4]. Установлено, что причиной возникновения кольцевых вихрей является ударный про-

филь скорости на срезе сопла. Ударный профиль скорости (английский термин «top-hat mean velocity profile») представляет собой область мощного градиента скорости на периферии струи и практически безградиентное течение в ядре струи. Именно наличие локальной области мощного градиента скорости на периферии струи и создает условия сворачивания истекающего из сопла газа в кольцевой вихрь. Показано, что взаимодействие полосчатых (продольных) структур с кольцевыми вихрями Кельвина – Гельмгольца приводит к образованию  $\Lambda$ - и  $\Omega$ -образных вихрей, вызванных трехмерным искажением двумерного кольцевого вихря. Воздействие полосчатых структур, генерируемых естественной или искусственной шероховатостью, внутренних стенок сопла, аналогично трехмерному искажению двумерной волны Толлмина – Шлихтинга на нелинейной стадии ее развития. Разрушение  $\Lambda$ - и  $\Omega$ -образных вихрей из-за их вторичной, высокочастотной неустойчивости приводит к турбулизации макроструи (рис. 1).

Установлено, что увеличение длины канала до выхода из сопла приводит к росту толщины пограничного слоя на стенке канала. В случае если нарастающий пограничный слой дойдет до оси симметрии канала, возникнет параболический профиль скорости, и безградиентное течение исчезнет. В данной ситуации исчезают условия для существования неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, генерация кольцевых вихрей прекращается, реализуется ламинарная струя большого удлинения ( $\sim 10\text{--}15$  калибров). Разрушение такой струи происходит значительно позже по сравнению со струей

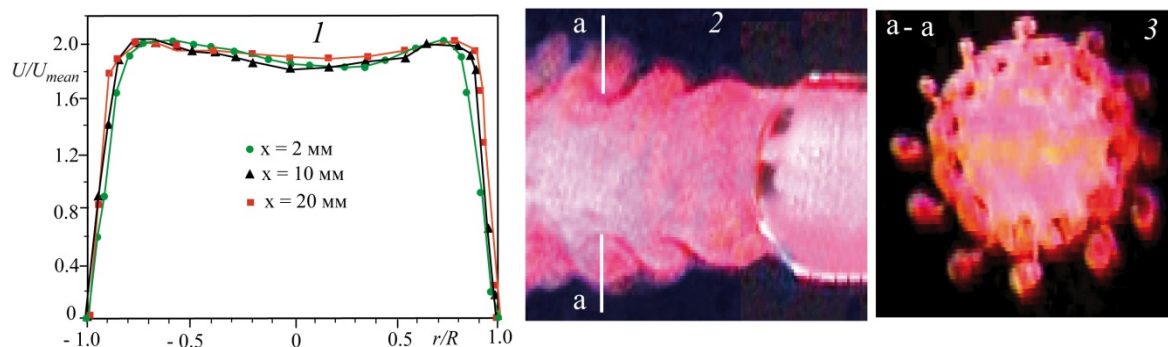


Рис. 1. Дозвуковая круглая струя с ударным профилем скорости на срезе сопла: 1 – профили скорости на различных расстояниях от среза сопла; 2 – картина визуализации дымом продольного сечения струи (кольцевые вихри); 3 – картина визуализации дымом поперечного сечения струи (азимутальные вихри)

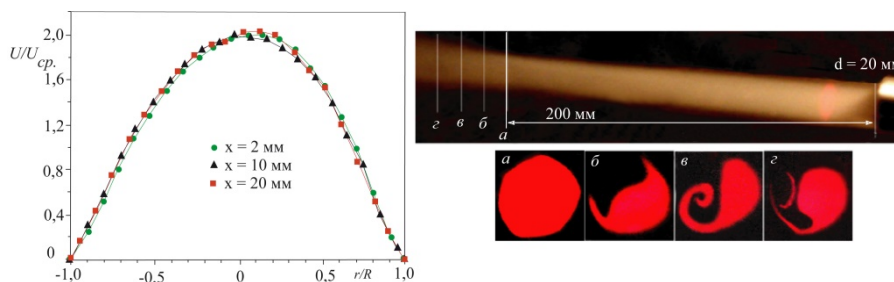


Рис. 2. Дозвуковая круглая струя с параболическим профилем скорости на срезе сопла: слева профили скорости на различных расстояниях от среза сопла; справа картина визуализации дымом общего вида струи и поперечных сечений струи в области начала ее турбулентного разрушения из-за неустойчивости к слабому поперечному потоку

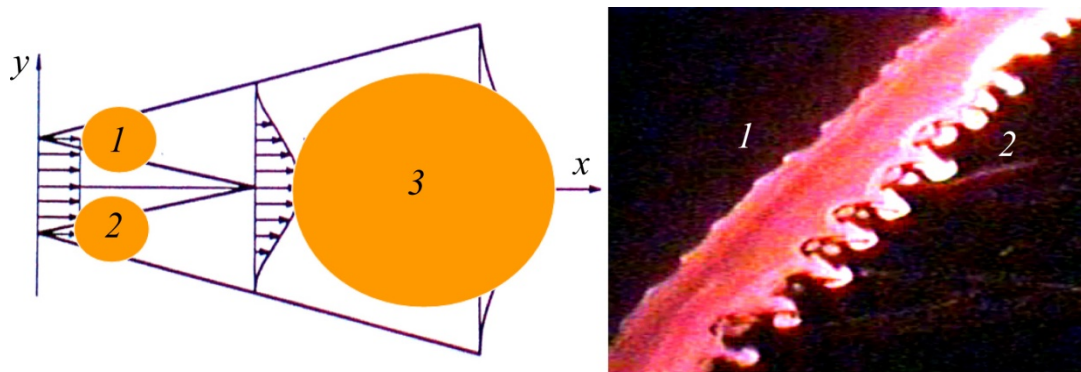


Рис. 3. Схема неустойчивости плоской струи с ударным профилем скорости на срезе сопла и картина дымовой визуализации ее поперечного сечения при генерации полосчатых структур в слое сдвига

с цилиндрическим (ударным) профилем на срезе сопла и связано с иным видом неустойчивости (рис. 2). Разрушение струи происходит из-за наличия неоднородностей в окружающем воздушном пространстве. Неустойчивость круглой макроструи к слабому поперечному потоку была детально исследована в работе [5].

### Плоская макроструя

Результаты исследований неустойчивости плоских макроструй представлены в работах [6–9]. В работе [6] приводятся результаты экспериментальных исследований влияния начальных условий (ударный и параболический профили скорости) на срезе сопла на структуру плоской струи, характеристики ее развития. Показаны особенности развития ламинарной и турбулентной плоских макроструй при одном и том же числе Рейнольдса. Установлено, что ламинарная и турбулентная макроструи на выходе из

плоского канала Хагена – Пуазейля приобретают колебательную моду в виде синусоидального колебательного движения. Также выявлены особенности развития как ламинарной, так и турбулентной струи при акустическом воздействии на них. Установлено, что искусственно генерированная симметричная мода неустойчивости ламинарной плоской струи подавляется несимметричной модой неустойчивости естественного происхождения (собственными колебаниями). Показано, что ламинарная плоская струя с ударным профилем скорости на срезе сопла имеет три вида неустойчивости: неустойчивость каждого из двух слоев сдвига (1, 2) и ниже по потоку синусоидальная неустойчивость всей струи в целом (3) (рис. 3).

Обнаружено, что взаимодействие полосчатых структур (продольная неоднородность), генерированных на одной стороне плоского сопла, с синусоидально модулированной ламинарной плоской струей, которая

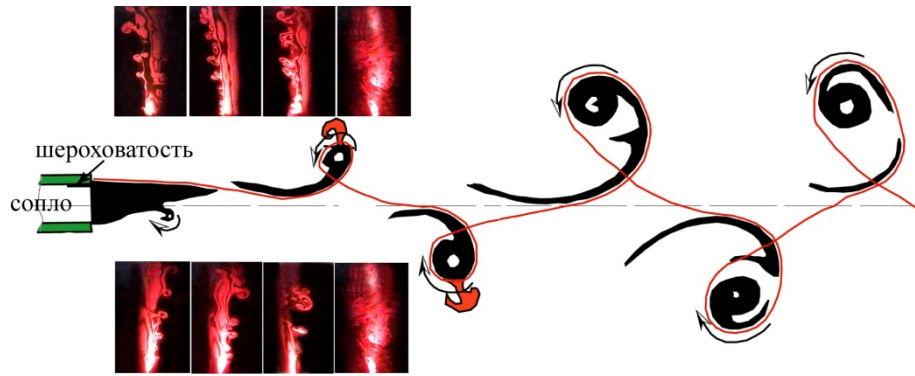


Рис. 4. Схема неустойчивости плоской струи с параболическим профилем скорости на срезе сопла и картины дымовой визуализации процесса взаимодействия полосчатых структур, генерированных на одной стороне сопла, с левыми (вверху) и правыми (внизу) цилиндрическими вихрями синусоидальной вихревой дорожки

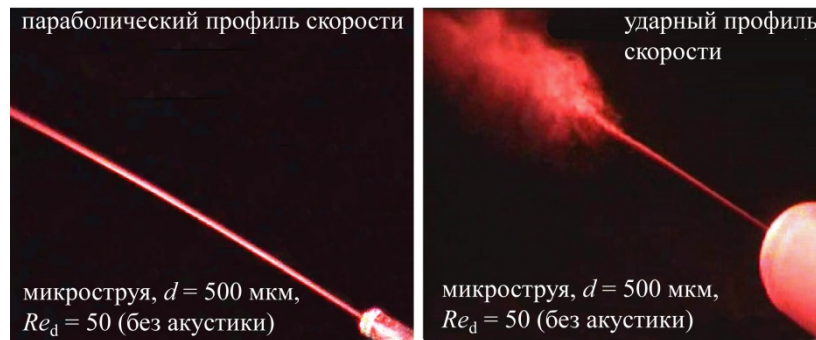


Рис. 5. Картины визуализации дымом развития круглой микроструи в отсутствие акустического поля

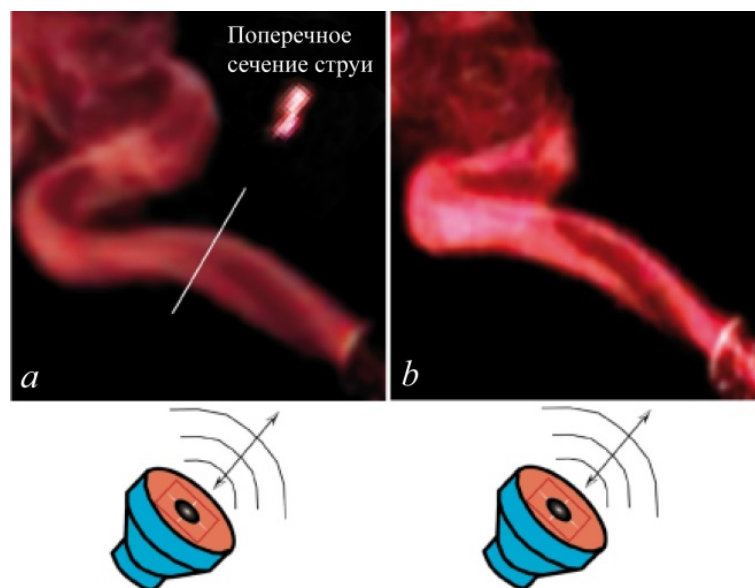


Рис. 6. Картины визуализации дымом развития и уплощения круглой микроструи в присутствии поперечного акустического поля ( $f = 40$  Гц (a) и 100 Гц (b), интенсивность звука 90 дБ)

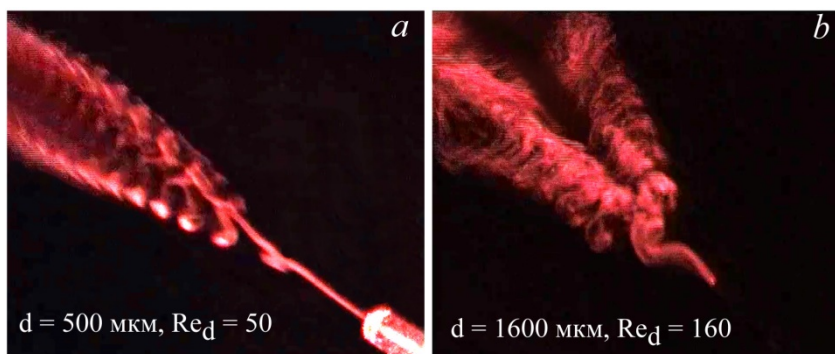


Рис. 7. Картины дымовой визуализации течения круглой струи с параболическим (а) и ударным (b) профилями скорости на срезе сопла с диаметром выходного отверстия 500 и 1 600 мкм

имеет на срезе сопла параболический профиль скорости, приводит к возникновению  $\Lambda$ - или  $\Omega$ -образных вихрей как на правой, так и на левой стороне (рис. 4).

### Круглая микроструя

Используя полученные знания о развитии круглой макроструи автор настоящей работы приступил к исследованию особенностей развития круглой микроструи с параболическим и ударным профилями скорости. Исследования проводились с использованием внешнего акустического поля в качестве метода воздействия на развитие струи. Установлено, что круглая микроструя имеет значительную протяженность участка ламинарного течения в отсутствие акустического поля, независимо от профиля скорости на срезе сопла (рис. 5). Следует отметить, что в случае круглой микроструи, в отличие от круглой макроструи с ударным профилем скорости на срезе сопла, неустойчивость Кельвина – Гельмгольца не обнаружена.

Воздействие поперечного акустического поля на микрострую оказалось значительно более сильным, чем в случае макроструи. Воздействие акустики на макрострую приводило лишь к изменению периодичности вихреобразования и ускорению ее турбулизации. Воздействие же поперечного акустического поля на микрострую вызывало как изменение ее структуры (из круглой струи она преобразовывалась в плоскую, рис. 6), так и раздвоение микроструи (рис. 7).

Преобразование круглой микроструи в плоскую под воздействием поперечного акустического поля приводило к ее развитию вниз по потоку, как и в случае плоской макроструи [7]. Обнаружено синусоидальное колебание микроструи как единого целого на начальной стадии ее разрушения. В случаях параболического и ударного профилей скорости на срезе сопла наблюдалось характерное разделение единой струи на две под воздействием поперечного акустического поля. Следует отметить, что данный эффект наблюдался и при низкой, и при высокой частоте акустического воздействия (от 40 до 1 500 Гц, рис. 9) независимо от выходного диаметра сопла (200, 400, 500 и 1 600 мкм, рис. 10).

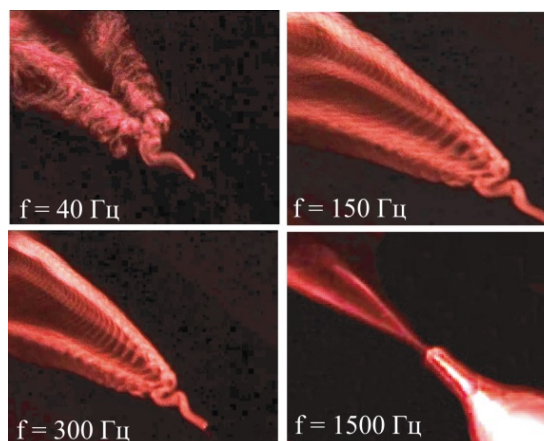


Рис. 8. Картины визуализации дымом процесса развития круглой микроструи (сопло с диаметром выходного отверстия 0,5 мм) в поперечном акустическом поле различной частоты

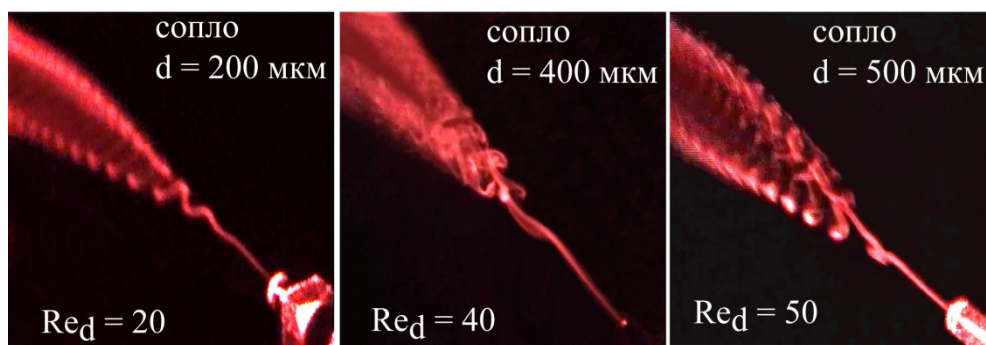


Рис. 9. Картины визуализации дымом процесса развития микроструи в поперечном акустическом поле частотой 200 Гц при различном диаметре сопла

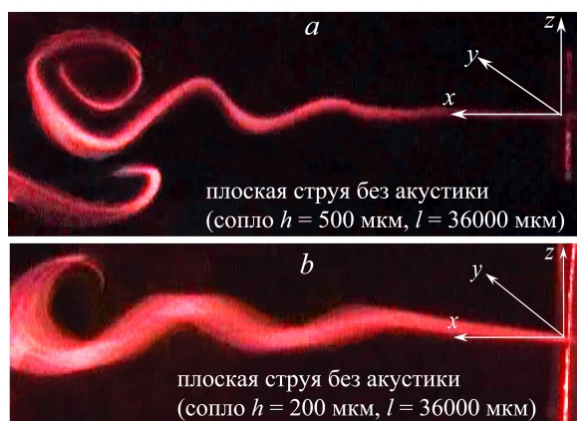


Рис. 10. Картина дымовой визуализации течения плоской микроструи без акустического воздействия: ширина выходного отверстия сопла 0,5 мм (а) и 0,2 мм (б)

### Плоская микроструя

В отсутствие акустики плоская микроструя была подвержена синусоидальному колебанию как единое целое (см. рис. 10), что совпадает с результатами наших наблюдений за развитием плоской макроструи. В случае воздействия на микрострую поперечного акустического поля на низких частотах (30–150 Гц) наряду с появлением синусоидальной вихревой дорожки можно было наблюдать и процесс закрутки плоскости струи на ее краях в направлении переменного вектора скорости потока, создаваемого акустическим полем. На рис. 11 хорошо видно, что под действием акустики интенсивностью 90 дБ четко прослеживает-

ся явление «концевого эффекта», заключающегося в сворачивании вихревой пленки струи в противоположных друг от друга направлениях на каждом периоде акустического воздействия. При этом на картинах дымовой визуализации течения струи (см. рис. 11) отчетливо видно, что если в центре струи (сечение 1) сохраняется синусоидальная вихревая дорожка колебания струи в целом, то в областях проявления концевых эффектов можно наблюдать раздвоение плоской струи (сечения 2 и 3).

Более детально результат воздействия поперечного акустического поля на плоскую микрострую на начальном этапе процесса можно наблюдать на рис. 12. Видно, что струя раздваивается в области, близкой к краю сопла, из-за краевого эффекта, вызванного поперечным акустическим полем.

Под воздействием поперечного акустического поля на картине дымовой визуализации течения можно наблюдать процесс сворачивания струи из-за концевых эффектов (рис. 13, слева). Поперечное сечение микроструи (см. рис. 13, справа) демонстрирует синусоидальную вихревую дорожку большой протяженности, сохраняющей свою когерентную структуру в ограниченном по пространству канале, возникновение которого связано с процессом сворачивания микроструи.

Обнаружено, что процесс сворачивания микроструи приводит к остановке (ступору) развития микроструи вниз по потоку и препятствует ее дальнейшему развитию и турбулизации (рис. 14).

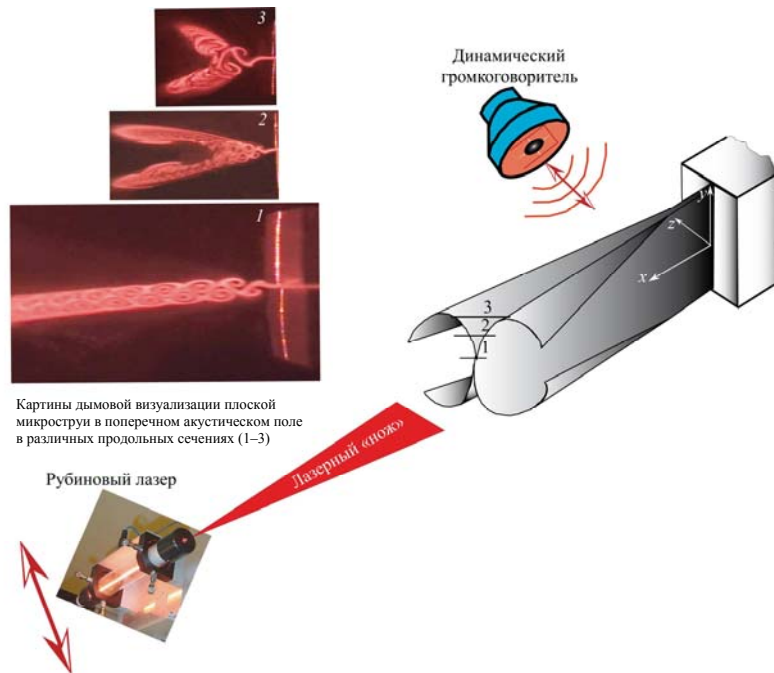


Рис. 11. Схема развития плоской микроструи (0,2 мм) под воздействием поперечного акустического поля ( $f = 150$  Гц, 90 дБ) и картины визуализации дымом струи в плоскости  $xz$  для различных позиций в направлении оси  $y$

Рис. 12. Картина визуализации дымом общего вида плоской микроструи ( $h = 200$  мкм,  $l = \pm 18$  мм), подверженной влиянию поперечного акустического поля ( $f = 150$  Гц, 90 дБ)

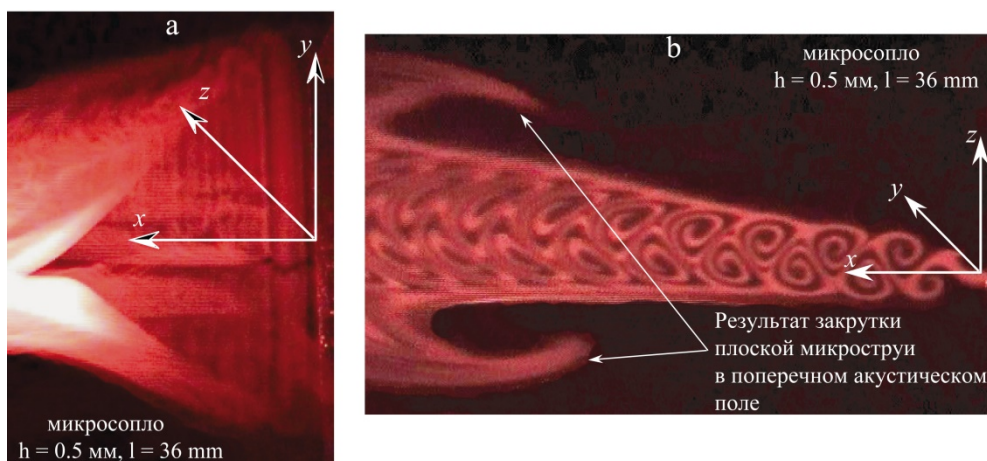
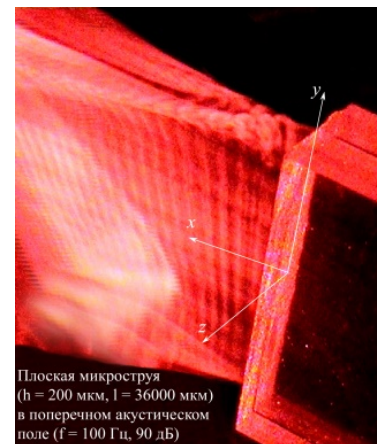


Рис. 13. Картины дымовой визуализации процесса развития плоской микроструи в поперечном акустическом поле ( $f = 100$  Гц): общий вид струи в плоскости  $xy$  (а) и продольное сечение струи в плоскости  $xz$  (б)



Рис. 14. Картина дымовой визуализации процесса развития плоской микроструи в поперечном акустическом поле ( $f = 100$  Гц)

### Диффузионное горение круглой и плоской микроструй пропана

Результаты детального изучения механизмов развития круглой и плоской макро- и микроструй в зависимости от начальных условий на срезе сопла и акустического воздействия дали возможность понять особенности наблюдаемых процессов и явлений в ситуациях диффузионного микроструйного горения.

В течение долгого времени процессы горения были в центре внимания только химической науки. Однако горение также включает в себя физические явления, такие как теплопередача и массоперенос, генерация и эволюция когерентных вихревых структур и т. д. Естественно, как химические, так и физические аспекты процессов горения необходимо рассматривать совместно. Например, можно сказать, что процесс непосредственного воспламенения гомогенной газовой смеси – химическая реакция; однако различные действительно наблюдаемые особенности самопроизвольного воспламенения вызваны физическими явлениями. Основные физические аспекты диффузионного горения и развития пламени связаны с процессами диффузии и смешения. Кроме того, важными факторами в процессе горения являются акустические эффекты. Как известно, когерентные вихревые структуры очень восприимчивы к аку-

стическим возмущениям [9]. Следовательно, искусственные возмущения могут использоваться для значительного изменения и даже управления эволюцией струй [9], например, для снижения уровня турбулентности [10; 11]. С другой стороны, акустические волны обычно вовлекаются в процессы горения, воздействуя на окружающую среду пламени. В случае ламинарного диффузионного горения воздействие акустических колебаний на поведение приподнятого пламени исследовано в работе [12]. В случаях приподнятого струйного пламени акустические волны могут быть использованы для снижения выбросов загрязнителей и эмиссии  $\text{NO}_x$  [13]. В работе [14] показано, что высота приподнятости пламени уменьшается при ее возбуждении на собственной частоте струи, однако важность трехмерной неустойчивости не была подчеркнута. В работе [15] исследовано раздвоение пламени под воздействием поперечного акустического поля при горении метана в круглой и плоской микроструях. Продемонстрировано, что раздвоение пламени из-за акустического принуждения – в основном двумерное явление. Однако сам механизм раздвоения остается неясным. В работе [16] показано, что раздвоение пламени приводит к снижению концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах горения в результате снижения оксидов через «тепловой и быстрый механизмы Зельдовича» (т. е. из-за снижения температуры пламени).

Воздействие поперечного акустического поля на механизм развития пламени при диффузионном горении круглой и плоской микроструй пропана детально исследовано и представлено в работах [17–21].

Установлено, что поперечное акустическое поле приводит к раздвоению пламени как круглой, так и плоской микроструи пропана при их диффузионном горении. Причем показано, что раздвоение пламени круглой микроструи связано с синусоидальной неустойчивостью, вызванной ее уплощением в поперечном акустическом поле и приобретением свойств, типичных для развития плоских микроструй, о чем сказано выше. Этот факт позволил объяснить механизм раздвоения пламени круглой микроструи в поперечном акустическом поле [15]. Синусоидальная неустойчивость уплощенной круглой микроструи в поперечном акустическом поле приводит к ее раздвоению (разрыву) на две развивающиеся независимо



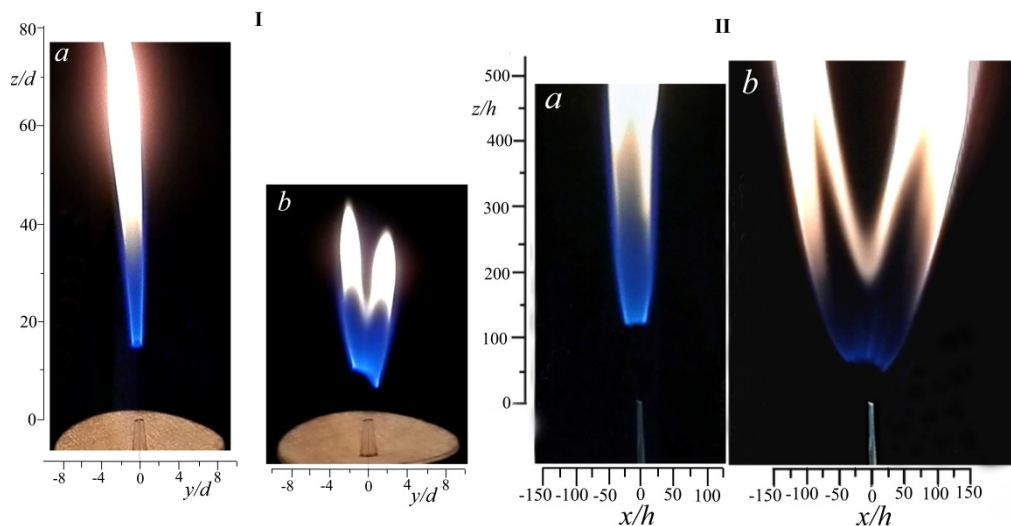


Рис. 15. Картины раздвоения пламени в поперечном акустическом поле в ситуации диффузионного горения круглой (I) и плоской (II) микроструй пропана (*a* – без акустики, *b* – с акустикой)

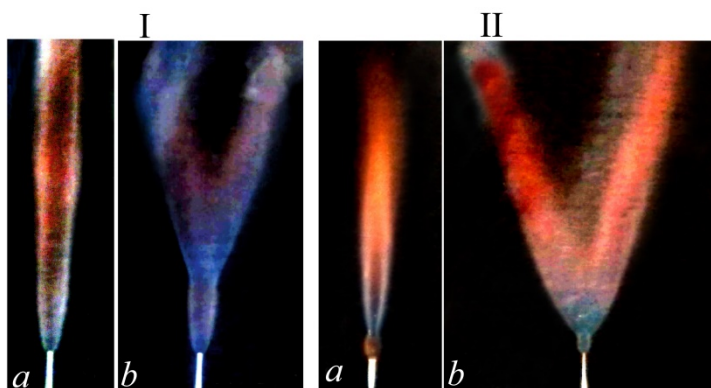


Рис. 16. Картины раздвоения пламени в поперечном акустическом поле в ситуации диффузионного горения круглой (I) и плоской (II) микроструй водорода (*a* – без акустики, *b* – с акустикой)

друг от друга микроструи, по когерентным структурам каждой из них и распространяется пламя, как и в ситуации раздвоения пламени плоской микроструи при ее диффузионном горении (рис. 15).

#### Диффузионное горение круглой и плоской микроструй водорода

Результаты экспериментальных исследований особенностей горения водорода в круглой и плоской микроструях в поперечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса показали, что явление раздвоения пламени наблюдается и в данной ситуации [22–30].

Ранее было показано, что поднятое над срезом сопла пламя при диффузионном го-

рении пропана в круглой микроструе, находящееся под воздействием поперечного акустического поля, подвержено раздвоению. Это явление связано с развитием синусоидального колебательного процесса, возникающего при воздействии поперечного акустического поля. В случаях горения круглой и плоской микроструй водорода поднять пламя над срезом сопла не удалось, однако эффект его раздвоения проявился и в данной ситуации (рис. 16).

Наряду с обнаружением раздвоения пламени при диффузионном горении круглой и плоской микроструй водорода при акустическом воздействии на выходе микроструи из сопла наблюдалось некое образование, которое было условно названо «область перетяжки пламени». Эта область представ-

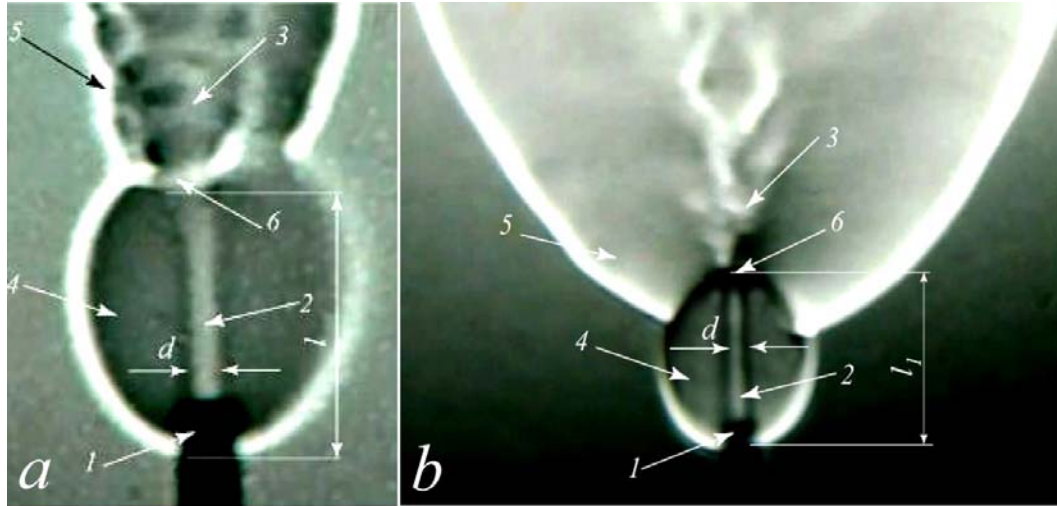


Рис. 17. Теневые картины процесса диффузионного горения круглой (а) и плоской (б) микроструи водорода в ближнем поле: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 5 – пламя горения турбулентной струи водорода; 6 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности ( $d$  – диаметр ламинарной струи,  $l$  – размер сферической области перетяжки пламени)

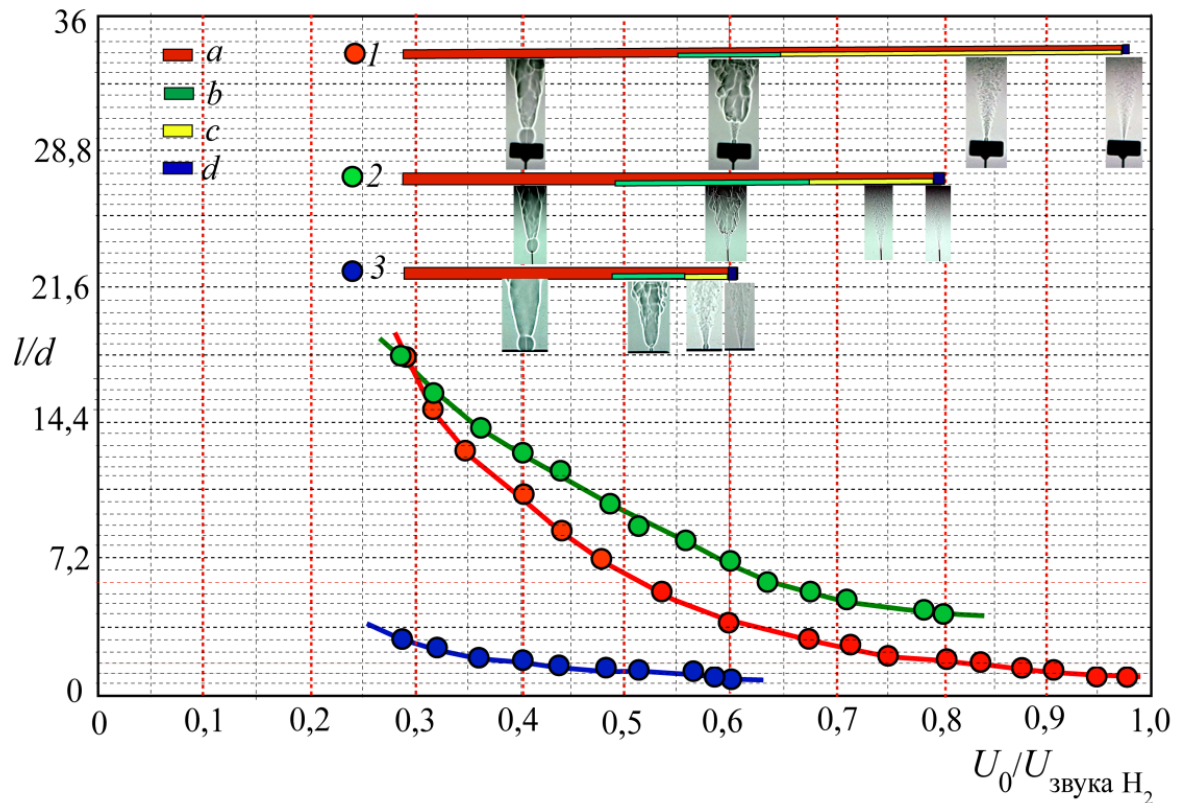


Рис. 18. Сравнение графиков зависимости изменения размера области перетяжки пламени ( $l/d$ ) при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения ( $U/U_0$ ), изменений начальных условий на срезе сопла: параболического (1, 2) или ударного (3) профилей скорости, а также конструктивных особенностей самого соплового аппарата. Диапазоны скорости истечения микроструи при: а – наличии области перетяжки пламени, б – отрыве пламени, в – наличии горения в области перетяжки пламени и его отсутствии в турбулентной микроструе, д – прекращении горения микроструи

ляла собой сферическое образование, существование которого не связано с акустическим воздействием. С ростом скорости истечения микроструи форма и пространственный размер области перетяжки пламени подвергались существенным изменениям. Форма области перетяжки пламени менялась от овальной до сферической, а пространственный размер уменьшался. Данное явление наблюдали авторы работы [31], однако детального его исследования не проводили.

Детальные экспериментальные исследования характеристик развития и особенностей такого феномена, как область перетяжки пламени, представлены в работах [22–30]. Показано, что область перетяжки пламени представляет собой замкнутую сферическую область горения смеси водорода с воздухом в ближнем поле горячей струи (вблизи выходного сопла). Область перетяжки пламени окружена мощным градиентом плотности. Обнаружено, что ламинарная струя водорода в этой области преодолевает градиент плотности газа, становится турбулентной, и далее вниз по потоку можно наблюдать как процесс турбулентного смешения водорода с окружающим воздухом, так и наличие турбулентного пламени (рис. 17). Диаметры выходного отверстия круглого микросопла ( $d = 1; 0,5; 0,25$  мм), параметры выходной щели плоского микросопла ( $l$  – длина щели 0,7; 2; 3 мм,  $h$  – ширина щели 0,125; 0,3; 0,1 мм), диаметр выходного отверстия скошенного под  $45^\circ$  круглого микросопла  $d = 0,44$  мм.

Выявлены особенности диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода с метаном, гелием и азотом [28]. Установлено, что механизм и характеристики развития микроструи и пламени при диффузионном горении смесей водорода с метаном, гелием или азотом связаны с образованием области перетяжки пламени, как и в ситуации диффузионного горения микроструи чистого водорода. Обнаружено, что процесс диффузионного горения смеси водород / метан в круглой микроструе сопровождается поэтапными стадиями отрыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени, срыва пламени при сохранении горения в области перетяжки пламени и, наконец, прекращения горения, что коррелирует с процессом горения аналогичной микроструи чистого водорода. Установ-

лено, что вышеперечисленные стадии горения смеси водород / метан реализуются в диапазоне значительно меньших скоростей истечения микроструи, чем в аналогичной ситуации горения микроструи чистого водорода. Показано, что при диффузионном горении смеси водорода с метаном, гелием или азотом в круглой микроструе для стабилизации горения с ростом скорости истечения микроструи необходимо увеличивать долю водорода (или уменьшать долю примеси) в смеси газов.

Определено влияние начальных условий на срезе микросопла на диффузионное горение водорода (рис. 18) [32]. Показано, что профиль скорости и наличие / отсутствие массива теплоемкого материала на срезе сопла играют существенную роль на структуру пламени и сам процесс горения круглой микроструи водорода. Установлены диапазоны скоростей существования диффузионного горения круглой микроструи водорода, отрыва пламени и области перетяжки пламени для случая ударного профиля скорости на срезе сопла и двух случаев параболического профиля скорости с наличием и отсутствием массива теплоемкого материала на срезе сопла. Показана зависимость размера области перетяжки пламени от скорости истечения микроструи для случая ударного профиля скорости на срезе сопла и двух случаев параболического профиля скорости с наличием и отсутствием массива теплоемкого материала на срезе сопла. Определены декременты уменьшения размера области перетяжки пламени с ростом скорости истечения микроструи для трех ситуаций изменения начальных условий на срезе сопла.

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей диффузионного горения круглой параболической микроструи водорода при различной пространственной ориентации вектора скорости ее истечения относительно направления вектора ускорения силы тяжести земли –  $g$  [25]. Особое внимание было уделено исследованию характеристик развития так называемой области перетяжки пламени и ее роли в процессе диффузионного горения микроструи водорода в настоящих условиях. Обнаружено, что при диффузионном горении водорода в круглой микроструе в условиях направленности вектора скорости истечения микроструи обратно и перпенди-

кулярно вектору ускорения земной гравитации ( $g$ ) основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи практически совпадают. Кроме того, установлено, что в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающем с направлением вектора ускорения земной гравитации ( $g$ ), основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи резко отличаются от двух предыдущих случаев (рис. 19). Сокращается диапазон существования области перетяжки пламени, отрыв пламени происходит в отсутствие области перетяжки пламени, и момент прекращения горения микроструи наступает при значительно большей скорости ее истечения.

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей диффузионного горения круглой микроструи водорода с ударным профилем скорости на

срезе сопла при различной пространственной ориентации вектора скорости ее истечения относительно направления вектора ускорения силы тяжести земли –  $g$  (рис. 20) [33]. Обнаружено, что в условиях направленности вектора скорости истечения микроструи обратно и перпендикулярно направленности вектора земной гравитации ( $g$ ) основные характеристики развития пламени в зависимости от расхода ( $Q$ ) газа (или скорости ( $U$ ) истечения микроструи) достаточно близки друг к другу. К этим характеристикам относятся диапазоны наличия области перетяжки пламени, отрыва пламени при наличии области перетяжки пламени, наличия области перетяжки пламени, но в отсутствие горения турбулентной части микроструи и момента прекращения горения микроструи.

Наоборот, в ситуации диффузионного горения водорода в круглой микроструе при направлении вектора скорости истечения струи, совпадающем с направлением вектора

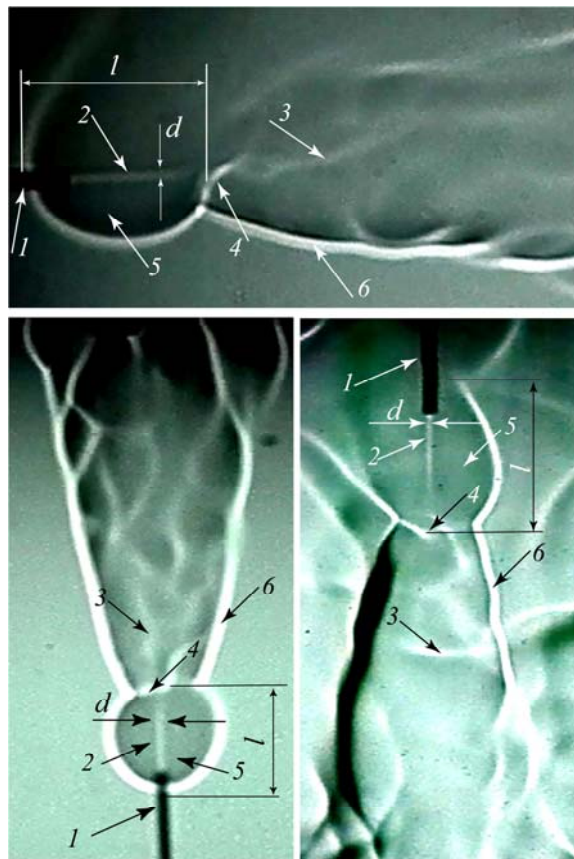
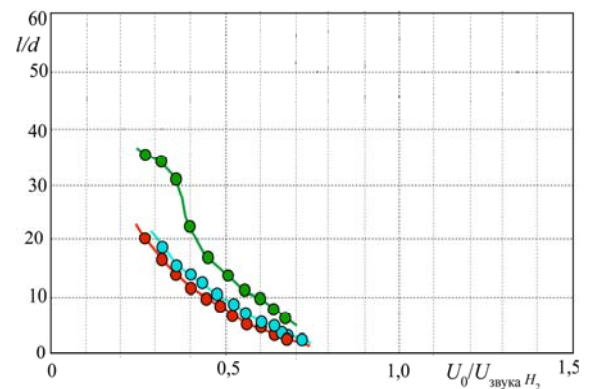


Рис. 19. Теневые картины области перетяжки пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода. Графики зависимости размера области перетяжки пламени при диффузионном горении микроструи водорода (сопло  $d = 0,5$  мм) от направления и скорости ее истечения (справа)



Направление вектора скорости струи:  
 ● обратно вектору  $g$   
 ● в сторону вектора  $g$   
 ● перпендикулярно вектору  $g$

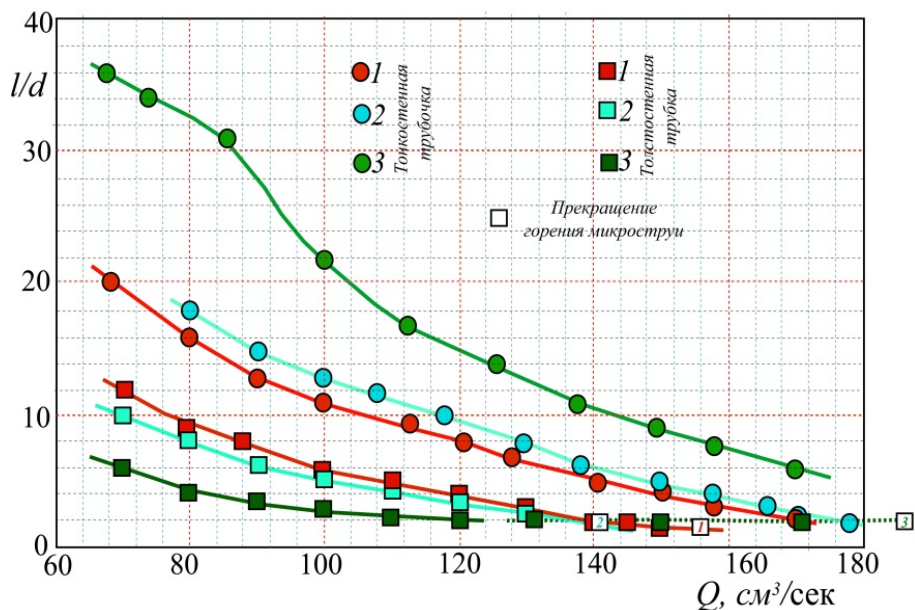


Рис. 20. Сравнение графиков зависимости изменения размера области перетяжки пламени с ростом расхода (скорости) истечения газа и направления вектора скорости истечения водорода относительно  $g$  (вектора ускорения свободного падения) для ситуаций параболического (тонкостенная трубочка) и «ударного» (толстостенная трубка) профилей скорости на выходе микроструи из сопла: 1 – против  $g$ , 2 – перпендикулярно  $g$ , 3 – в направлении  $g$

ускорения земной гравитации ( $g$ ), основные характеристики развития пламени в зависимости от скорости истечения струи резко отличаются от двух предыдущих случаев. Сокращается диапазон существования области перетяжки пламени, отрыв пламени происходит в отсутствие области перетяжки пламени, полностью отсутствуют ситуации горения в области перетяжки пламени при наличии отрыва турбулентного пламени и прекращения горения турбулентной области микроструи. Момент полного прекращения горения микроструи происходит при значительно большей скорости ее истечения.

#### Особенности диффузионного горения круглой микроструи водорода при дозвуковом (присоединенное пламя) и сверхзвуковом (приподнятое пламя) течении и роль в этом процессе температурного фактора

Представлен сценарий дозвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода (рис. 21) [34]. 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 скорости ее истечения, близкой к трансзвуковой. Установлено, что нагрев толстостенного микросопла от области перетяжки пламени при его большой теплоемкости оказывает существенное влияние на характеристики развития микроструйного горения водорода и приводит к запираанию 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 прекращается.

Представлен сценарий сверхзвукового диффузионного горения круглой микроструи водорода (рис. 22) [35]. Показаны основные признаки сверхзвукового диффу-

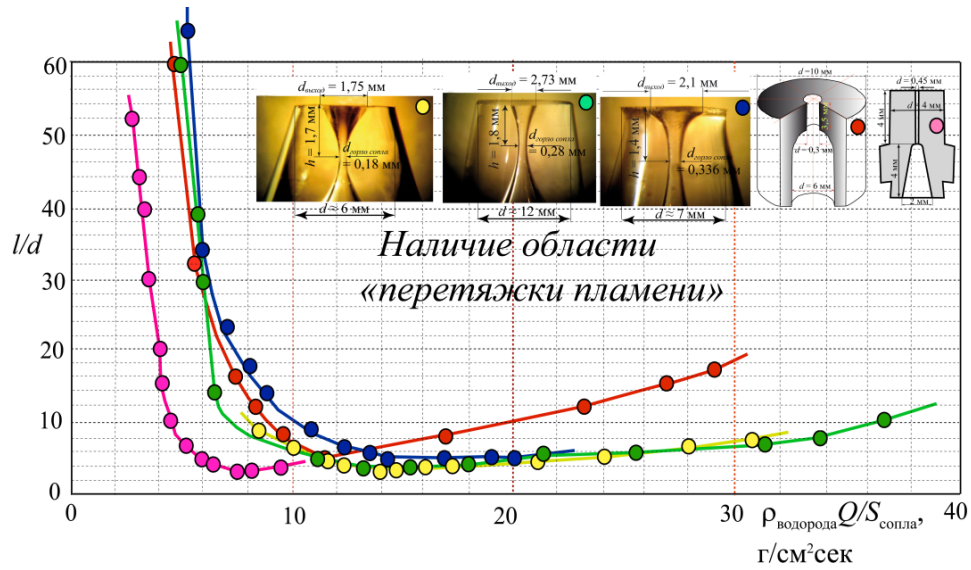


Рис. 21. Сравнение графиков зависимости изменения размера ( $l/d$ ) области перетяжки пламени с ростом скорости истечения микроструи, рассчитанной по массовому расходу ( $\rho Q/S$ ) газа

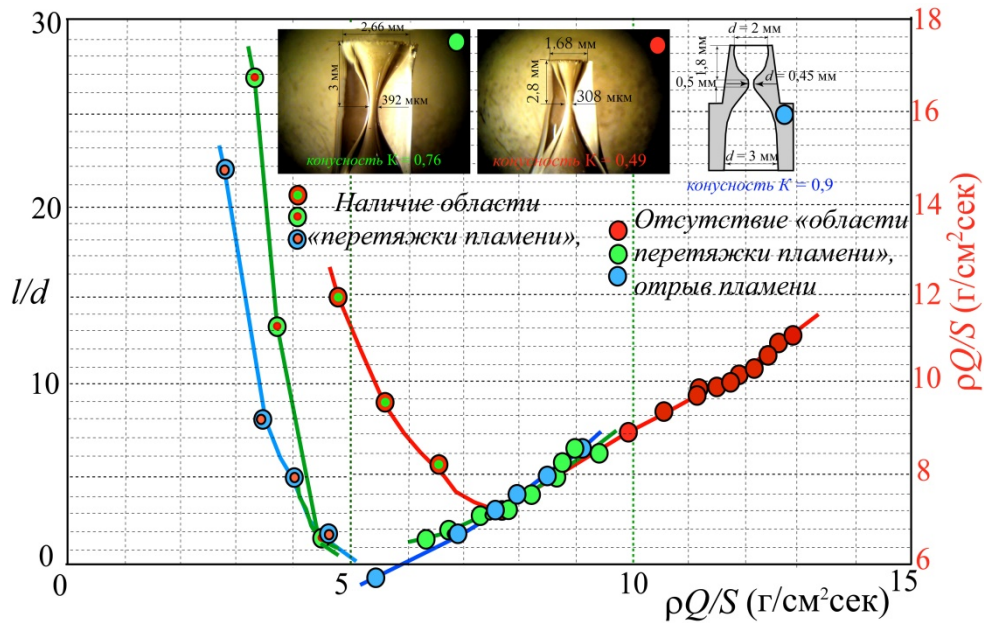


Рис. 22. Сравнение графиков зависимости изменения размера ( $l/d$ ) области перетяжки пламени от скорости массового расхода водорода ( $\rho Q/S$ ) и зависимости скорости массового расхода водорода ( $\rho Q/S$ ) в ситуации развития горения микроструи в отсутствие области перетяжки пламени и отрыва от среза сопла турбулентного пламени для трех различных сверхзвуковых квазимикросопел

зионного 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. С ростом температуры нагрева микросопла от области перетяжки пламени

при одной и той же скорости истечения микроструи обнаружен рост ее пространственного размера (*l/d*).

### Список литературы

1. Ginevsky A. S., Vlasov Y. V., Karavosov R. K. Acoustic Control of Turbulent Jets. Springer, 2004. 240 p.
2. Пимштейн В. Г. Альбом. Аэроакустические взаимодействия в турбулентных струях: Учеб. пособие. М.: Физматлит, 2010. 84 с.
3. Литвиненко М. В., Козлов В. В., Козлов Г. В., Грек Г. Р. Влияние продольных полосчатых структур на процесс турбулизации круглой струи // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 50–60.
4. 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.
5. Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 1. С. 14–24.
6. Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 25–37.
7. 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.
8. Huerre P., Monkewitz P. A. Local and global instabilities in spatially developing flows // Annu. Rev. Fluid Mech. 1990. Vol. 22. P. 473.
9. Crow S. C., Champagne F. H. Orderly structure in jet turbulent // J. Fluid Mech. 1971. Vol. 48. P. 547.
10. Zaman K. B. M. Q., Hussain A. K. M. Turbulent suppression in free turbulent shear flows by controlled excitation // J. Fluid Mech. 1981. Vol. 103. P. 133.
11. Hussain A. K. M., Hasan M. A. Z. Turbulent suppression in free turbulent shear flows under controlled excitation. Part 2 // J. Fluid Mech. 1985. Vol. 150. P. 159.
12. Hertzberg J. R. Conditions for a split diffusion flame // Combust Flame. 1996. Vol. 109. P. 49.
13. Chao Y. C., Yuan T., Tseng C. S. Effects of flame lifting and acoustic excitation on the reduction on NO<sub>x</sub> emission // Combust. Sci. Technol. 1996. Vol. 113. P. 49.
14. Chao Y. C., Yuan T., Jong Y. C. Measurement of the stabilization zone of a lifted jet flame under acoustic excitation // Exp. Fluids. 1994. Vol. 17. P. 381.
15. Suzuki M., Ikura S., Masuda W. Comparison between acoustically-excited diffusion flames of tube and slit burners // Proc. of the 11<sup>th</sup> Asian Symposium on Visualization. Niigata, Japan, 2011. P. 1–6.
16. Кривокорытов 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.
17. 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. НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 98–119.
18. 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.
19. 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.
20. 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). ISBN 978-5-4437-0062-5.
21. 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).
22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Влияние направления вектора ускорения силы тяжести земли на диффузионное горение микроструи водорода // Вестн. Перм. нац. исслед. ун-та. 2016. С. 175–192.

26. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Горение истекающей в воздух высокоскоростной микроструи водорода // ДАН. 2016. Т. 470, № 2. С. 166–171.

27. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air // Doklady Physics. 2016. Vol. 61. Iss. 9. P. 457–462.

28. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Диффузионное горение круглой микроструи смесей водорода с метаном, гелием и азотом // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 2. С. 56–76.

29. 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>

30. 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>

31. Ajay K. Agrawal, Burt W. Albers, Khalid N. Alammari. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas – jet diffusion flames // Combustion Science and Technology. 2005. Vol. 177. No. 2. P. 305–322.

32. Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Влияние начальных условий на срезе микросопла на диффузионное горение водорода // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2016. Т. 11, вып. 3. С. 34–45.

33. Грек Г. Р., Литвиненко М. В., Козлов Г. В., Вихорев В. В. Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного сопла с ударным профилем скорости на его срезе // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 1. С. 66–78.

34. 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.

35. 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.



**Yu. A. Litvinenko**

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

*litur@itam.nsc.ru*

**STABILITY OF SUBSONIC MACRO- AND MICROJET FLOWS  
AND MICROJET COMBUSTION  
(REVIEW)**

In this review series of works of experimental study of the outflow of gas jets into air are presented. Air, propane, hydrogen were applied as gas of jet. Investigations were carried out for different sizes of round nozzles (from 23 to 0.2 mm) and flat nozzles (from 3000·1.5 to 0.7·0.1 mm), for different velocities in the range of Re numbers for macro-jet ~ 3000–5000, and for micro-jet Re ~ 100–300. Based on the results of the research, the mechanisms of the growth of perturbations in a round and flat macro-jet are determined, and also methods for reduction of hydrodynamic perturbations in jets. The properties of micro jets in the diffusion combustion of various gases are shown, including acoustic excitation of the jet. The features of the diffusion combustion of hydrogen with formation of so-called «constriction» of the flame and two combustion zones are shown.

*Keywords:* micro jet, diffusion combustion, propane, hydrogen, bifurcation of jet, Kelvin – Helmholtz instability.