

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Тамбовцев Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ
МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ**

Специальность 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Козлов Виктор Владимирович

Новосибирск – 2023

Содержание

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ	1
Введение	5
Глава I. Анализ современного состояния исследований струйных течений и процессов струйного диффузионного горения	13
1.1 Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения в макроструях	13
1.2 Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения в микроструях	17
1.3 Диффузионное горение общие сведения	20
1.4 Особенности диффузионного горения микроструи водорода	24
1.5 Воспламенение микроструи вблизи и на расстоянии от среза сопла	39
1.6 Особенности истечения и горения плоских микроструй водорода	45
Глава II: Диффузионное горение одиночной микроструи водорода.....	50
2.1 Экспериментальная установка и методы измерения.....	50
2.2 Результаты экспериментов воспламенение микроструи вблизи среза сопла	52
2.3 Результаты экспериментов при воспламенении на расстоянии от среза сопла.....	55
2.4 Обсуждение результатов	57
2.5 Выводы	61

Глава III. Исследование диффузионного горения микроструи водорода в спутной струе воздуха.....	63
3.1 Экспериментальная установка	63
3.2 Результаты экспериментального исследования диффузионного горения микроструи водорода окруженной потоком воздуха при воспламенении вблизи среза сопла	65
3.3 Диффузионное горение микроструи водорода в присутствии соосного потока воздуха, воспламенение на расстоянии от среза сопла	68
3.4 Обсуждение	70
3.5 Выводы	73
Глава IV. Исследование диффузионного горения спутной струи водорода в присутствии струи воздуха.....	75
4.1 Экспериментальная установка	75
4.2 Диффузионное горение одиночной струи водорода, истекающей из кольцевого сопла	76
4.3 Диффузионное горение струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии сверхзвуковой струи воздуха	78
4.4 Обсуждение	82
4.5 Выводы	83
Глава V: Взаимодействие двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения.....	85
5.1 Экспериментальная установка	86
5.2 Результаты экспериментов взаимодействие микроструй $d = 400$ мкм	87

5.3	Взаимодействие микроструй $d = 200$ мкм при воспламенении вблизи среза сопла.....	89
5.4	Взаимодействие микроструй $d = 200$ мкм, воспламенение на расстоянии от среза сопла.....	95
5.4	Обсуждение результатов	96
5.5	Выводы	98
	Заключение	100
	Список литературы	102

Введение

В современном мире при производстве энергии широко используются ископаемые углеводороды. В последние десятилетия активно развиваются альтернативные технологии, направленные на использование возобновляемых источников энергии, и водородная энергетика является одним из перспективных направлений в этой области. В отличие от углеводородных топлив, продукты сгорания водорода не содержат токсичных и вредных веществ, что придает ей экологическую привлекательность. Процессы производства водорода включают электролиз воды, риформинг углеводородных топлив, газификацию угля и биомассы. Несмотря на перспективы, водородная энергетика сталкивается с техническими проблемами, в частности, связанными с пожаро- и взрывоопасностью водорода. Эти аспекты ограничивают широкое применение данной энергетической системы. Водородная энергетика в настоящее время является областью, которая активно развивается и привлекает внимание многих стран. Этот процесс связан с рядом причин, среди которых:

1. Экологическая приемлемость: использование водорода в качестве источника энергии может привести к снижению выбросов парниковых газов, таких как углекислый газ, что способствует борьбе с глобальным потеплением и улучшению состояния атмосферы.
2. Экономическая эффективность: водород может использоваться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания, что позволяет увеличить их КПД и снизить выбросы вредных веществ.
3. Развитие технологий: современные технологии позволяют создавать эффективные и безопасные системы производства, хранения и использования водорода, что делает его применение более доступным и привлекательным.
4. Увеличение доли возобновляемых источников энергии: в связи с ростом использования возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце, возникает потребность в разработке технологий хранения и преобразования этой

энергии в форму, удобную для использования. Водород может служить одним из таких средств.

Для создания технологий водородной энергетики необходимы, в частности, исследования режимов горения струйных течений водорода, характерных для различного рода форсунок, горелок и сопел. Результаты таких исследований позволят предложить новые технологические решения для устойчивого и безопасного сжигания газообразного водорода, истекающего с дозвуковой скоростью (и вплоть до трансзвуковых скоростей), при горении в окружающей инертной среде (например, на входе в паровую турбину для повышения давления и поднятия температуры рабочего пара).

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании основных сценариев диффузионного горения водорода при его истечении, как из одиночной микроструи, так и при взаимодействии со спутными потоками воздуха, а также в исследовании сценариев взаимодействия одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения.

Основные задачи:

1. Экспериментальное исследование основных сценариев диффузионного горения одиночной микроструи водорода
2. Диффузионное горение струи водорода, истекающей из круглого микросопла, окруженной потоком воздуха, истекающей из концентрично расположенной щели;
3. Диффузионное горение струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии струи воздуха, истекающей через круглое микросопло.
4. Изучение взаимодействия двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения

Важно выявить характерные особенности процесса в таких условиях. Определить параметры течения, при которых в струе образуется «перетяжка» пламени, разделяющая ламинарную зону пламени от турбулентной. Также

необходимо было проследить особенности развития характерных областей пламени в зависимости от скорости истечения струй водорода и воздуха. Уделить внимание определению признаков, указывающих на дозвуковой или сверхзвуковой характеры течения. Изучить возможность стабилизации соосным потоком воздуха микроструйного горения водорода. Изучить влияние и условия взаимодействия двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения.

Научная новизна:

1. Обнаружены основные сценарии диффузионного горения микроструи водорода окруженной соосным потоком воздуха.
2. В работе впервые экспериментально показана возможность стабилизации процесса диффузионного горения микроструи водорода соосным потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели, обнаружен полезный эффект позволяющий поддерживать горение при воздействии на процесс диффузионного горения потока агрессивной среды на примере водяного пара.
3. Обнаружены основные сценарии диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из кольцевого сопла.
4. Впервые обнаружен эффект «запирания» процесса горения в узкой области конусовидной формы вблизи среза сопла при взаимодействии водорода, истекающего из кольцевого сопла, со сверхзвуковой струей воздуха, истекающей из соосно расположенного микросопла.
5. Впервые экспериментально показаны условия и особенности взаимодействия двух одиночных микроструй водорода.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что полученные экспериментальные открывают новые способы стабилизации процесса диффузионного горения микроструи водорода, что позволяет использовать полученные данные при создании горелочных устройств различного вида.

Основные результаты работы вошли в научно-технические отчеты по Соглашению проекта Министерства образования и науки № 075-15-2020-806 (договор № 13.1902.21.0014)

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований процесса диффузионного горения микроструи водорода, окруженной соосным потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели;
2. Результаты экспериментальных исследований процесса диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из кольцевого сопла при взаимодействии с до- и сверхзвуковым потоком воздуха, истекающим из соосно расположенного микросопла;
3. Результаты экспериментальных исследований условий и особенностей взаимодействия двух одиночных микроструй водорода, ориентированных под углом друг к другу, в процессе диффузионного горения

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается использованием проверенных измерительных приборов, современных аппаратных и программных средств для обработки данных, сопоставлением и согласованием полученных результатов с известными в литературе данными и результатами эталонных экспериментов.

Личный вклад автора. Все основные результаты работы получены при участии автора. При выполнении работ по теме диссертации, опубликованных совместно с научным руководителем и другими соавторами, диссертант принимал участие в выполнении тестовых опытов и основной программы экспериментов; проведении обработки и анализа результатов экспериментов; формулировке выводов; написании научных статей. Опубликовал основные результаты в рецензируемых журналах. Результаты работы были доложены автором на конференциях, в том числе международных.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались на многочисленных российских и международных научных конференциях:

1. 10th International Seminar on Flame Structure (9-13 Октября 2023, Новосибирск, Россия);
2. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (21 – 25 августа 2023, Санкт-Петербург, Россия);
3. Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», посвящённой 90-летию академика А.К. Реброва (28 – 31 августа 2023, Новосибирск, Россия)
4. XXIII Всероссийской научно-технической конференции Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2022 (Пермь, 16 – 18 ноября 2022, Пермь, Россия)
5. Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар», посвящённая 65-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (29 – 31 августа 2022, Новосибирск, Россия)
6. XI Всероссийскую конференцию с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (9 – 12 ноября 2021, Новосибирск, Россия);
7. Всероссийская конференция с международным участием и элементами научной школы для молодых учёных «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», посвящённая Году науки и технологий Российской Федерации и 60-летию первого полёта человека в Космос (14 – 16 сентября 2021, Новосибирск, Россия);
8. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвящённый 75-летию Заслуженного деятеля науки РФ Терехова В.И. (27 – 29 августа 2019, Новосибирск, Россия);
9. 56 международная научная студенческая конференция, (22-27 апреля 2018, Новосибирск, Россия).

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 6 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 32 наименования. Материал изложен на 105 страницах, содержит 63 рисунка и 3 таблицы.

Содержание работы:

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ современного состояния исследований, посвященных свободным микроструйным течениям, микроструйным течениям в процессе диффузионного горения, а также исследованиям процессов диффузионного горения водорода при его истечении из микросопел. В данной главе собраны результаты работ по экспериментальному и численному исследованию вопроса.

Во второй главе проведено исследование диффузионного горение одиночной микроструи микроструи водорода истекающей в затопленное воздушное пространство. В экспериментах использовалось сопло, представляющее собой тонкостенную металлическую трубку. Представлено описание экспериментальной установки, на которой проводилось исследование диффузионного горения одиночной микроструи водорода, визуализация проводилась с помощью теневого метода. В главе изложены результаты проведенного экспериментального исследования, обнаружены основные сценарии диффузионного горения и проведено сравнение с результатами, полученными в предыдущих работах.

В третьей главе экспериментально исследуется диффузионное горение микроструи водорода, истекающей из соплового аппарата, обеспечивающего одновременную подачу воздуха из соосно расположенного кольцевого сопла таким образом, что потоки смешиваются только на выходе из соплового аппарата. В главе приведено описание экспериментальной установки, изложены результаты проведенного экспериментального исследования, показан полезный практический эффект, позволяющий дополнительно стабилизировать процесс диффузионного горения при воздействии потока агрессивной среды, не поддерживающей горение (на примере потока водяного пара).

В четвертой главе экспериментально исследуются особенности горения спутной струи водорода в присутствии дозвуковой и сверхзвуковой струи воздуха. В экспериментах используется тот же сопловой аппарат, обеспечивающий независимую подачу газов, что и в третьей главе, при этом изменен способ подачи водорода и воздуха. Воздух подается через круглое микросопло, водорода подается через соосно расположенное кольцевое сопло. В главе представлено описание экспериментальной установки, на которой проводилось исследование изложены результаты проведенного экспериментального исследования, сделаны соответствующие выводы. Обнаружен эффект запираания процесса горения сверхзвуковой струей воздуха в узкой области вблизи среза сопла.

Пятая глава посвящена исследованиям взаимодействия двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения. Определены основные условия взаимодействия одиночных микроструй водорода, ориентированных под углом, друг относительно друга, в процессе диффузионного горения. В главе представлено описание экспериментальной установки, на которой проводилось исследование изложены результаты проведенного экспериментального исследования, сделаны соответствующие выводы.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н., проф. Козлову В. В за научное руководство работой, помощь в постановке задач диссертационного исследования, обсуждение и интерпретацию результатов.

Глава I. Анализ современного состояния исследований струйных течений и процессов струйного диффузионного горения

1.1 Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения в макроструях

Развитие технологий требует глубокого понимания физических процессов и развития как фундаментальных, так и прикладных знаний. В контексте исследования струйных течений, ключевым вопросом здесь является понимание ламинарно-турбулентного перехода, а одной из практически значимых задач является улучшение смешивания струйного потока с окружающим газом, что имеет важное значение для создания эффективных охлаждающих и горелочных устройств с низким уровнем шума и минимальными выбросами вредных веществ. Решение этих задач может основываться на знаниях, полученных в результате экспериментального изучения струйных потоков.

Для понимания механизма развития струйного течения, определения того, какие неустойчивости будут характерны для данного вида течения, необходимо установить влияние начальных условий, формирующихся в канале сопла на характер дальнейшего течения. Подробные экспериментальные исследования по этой тематике для струй, истекающих из круглых и плоских сопел проведены в [1 – 5]. Начальные условия в экспериментах с соплами создавались путем изменения длины канала сопла. С этой целью к выходу классического короткого сопла присоединялся прямой канал различной длины. Было обнаружено, что для микроструй круглого сечения параметр L/d (где L – длина канала, а d – выходной диаметр) влияет на формирование профиля скорости на выходе из сопла. При значениях параметра $L/d \leq 3$, что справедливо для сопел с небольшим удлинением, на выходе из сопла формируется П – образный профиль скорости. В таком случае наблюдается большой уровень пульсаций скорости вблизи стенок канала, что продемонстрировано на рисунке 1, взятом из работы [1].

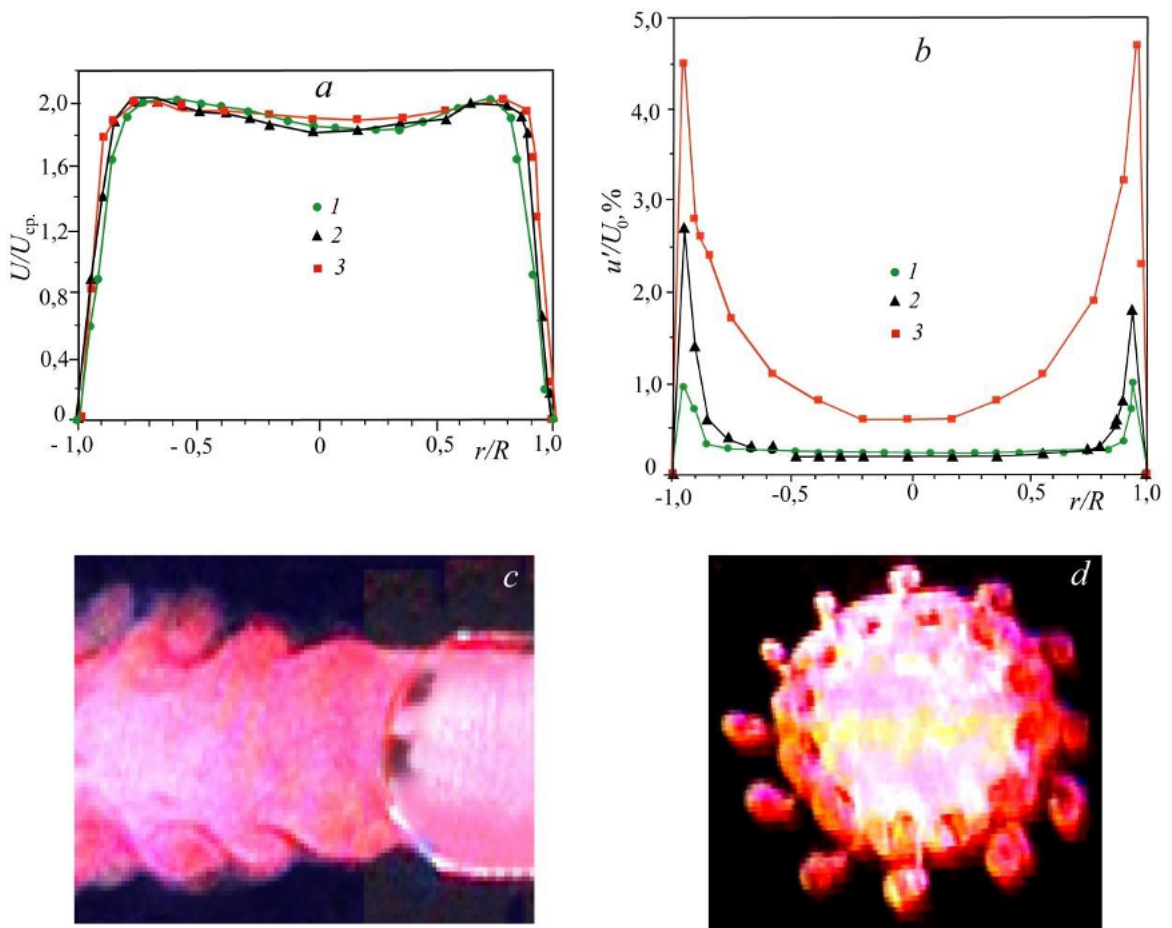


Рис. 1. Распределение средней скорости (а) и пульсаций скорости (б) в поперечном сечении классической круглой макроструи на различных расстояниях от среза сопла (1, 2, 3 – при $x = 2, 10, 20$ мм соответственно); картины дымовой визуализация струи вдоль (с) и поперек потока (д), скорость потока на оси струи $U_0 = 5$ м/с ($Re = U_0 \times d/\nu = 6667$) [1]

При указанных начальных условиях возникает первичная неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, инициирующая формирование вихревых колец, последовательно следующих друг за другом с определенной частотой в течении. Затем, в областях между этими вихревыми кольцами, образуются продольные структуры, их взаимодействие с кольцевыми вихрями приводит к деформации вихрей и появлению азимутальных трехмерных выбросов. Конечным результатом этого процесса является турбулизация струйного течения. В вышеописанных экспериментах на выходе из короткого соплового аппарата практически

отсутствовал ламинарный участок течения. Постепенное увеличение длины канала от эксперимента к эксперименту приводило к преобразованию профиля скорости в сторону параболического и к уменьшению уровня пульсаций скорости вблизи стенок канала. Одновременно с этим на выходе возникал протяженный ламинарный участок, и его протяженность увеличивалась при удлинении канала, а область ламинарно-турбулентного перехода сдвигалась вниз по потоку. При значениях параметра $L/d \geq 43,5$, профиль скорости приближается к параболическому (профиль скорости Хагена – Пуазейля), со значительно более низким уровнем пульсаций, чем в ситуации с П-образным профилем. Результаты измерений профиля скорости для сопла с самым большим удлинением в серии экспериментов $L/d = 200$, из работы [1] показаны на рисунке 2. Авторами отмечалось, что в этом случае на выходе из сопла формировался длинный ламинарный участок струи, протяженность которого достигала до десяти калибров. Турбулизация такой струи связана с неоднородностями в окружающем пространстве, в [3] было показано, что слабый поперечный поток способен приводить к возникновению неустойчивости.

Хорошо известно, что неустойчивость ламинарных струй, истекающих из каналов с прямоугольным сечением связана с возникновением и развитием симметричной и антисимметричной мод неустойчивости [6], которые также ассоциируют с понятиями варикозной и синусоидальной модами соответственно. В случае П-образного профиля скорости на выходе из канала, две эти моды неустойчивости постоянно конкурируют друг с другом по мере развития течения вниз по потоку. По мере сужения ядра течения и постепенного перехода профиля скорости к параболической форме (профиль скорости Хагена – Пуазейля), антисимметричная мода становится доминирующей, как результат, такие плоские струи становятся подвержены колебаниям синусоидального типа [2].

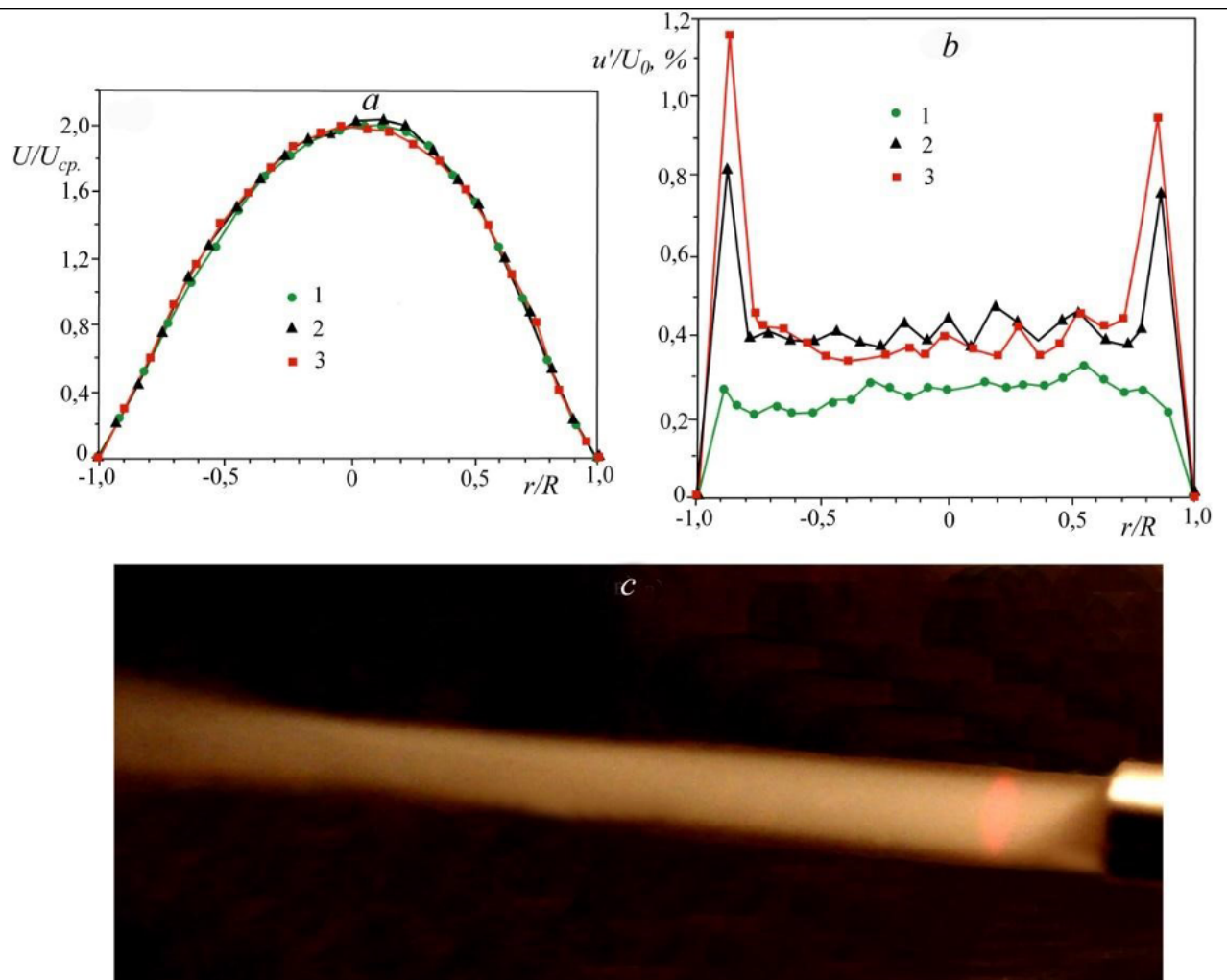


Рис. 2. Распределения скорости (*a*) и пульсаций скорости (*b*) в поперечном сечении круглой макроструи, сформированной при истечении из удлиненного канала длиной 4000 мм, на различных расстояниях вниз по потоку от среза канала (1, 2, 3 – при $x = 2, 10, 20$ мм соответственно); картина дымовой визуализации струи вдоль потока (*c*) из работы, скорость потока на оси струи $U_0 = 5$ м/с ($Re = U_0 \times d/\nu = 6667$) [1]

Другой важной особенностью развития струйных течений является их восприимчивость к акустическому воздействию. Упорядоченные вихревые структуры сильно восприимчивы к акустическим возмущениям, что было показано еще [7]. Как было показано в работе [5] акустическое воздействие на ламинарную струю, истекающую из сопла с круглым сечением, ведет к упорядочиванию схода

осесимметричных кольцевых вихрей. Частота акустического поля напрямую влияет на частоту схода вихревых структур. При этом также авторами [5] экспериментально было показано, что акустическое воздействие в широком диапазоне частот не оказывает влияния на ламинарную струю, истекающую из канала с круглым сечением и с большим удлинением $L/d \geq 200$.

Акустическое воздействие на низких частотах на струю, истекающую из канала прямоугольного сечения, приводит к образованию асимметричных вихревых структур, ускоряет ее турбулизацию и способствует увеличению угла распространения струи вниз по потоку. Увеличение частоты возбуждения струи приводит к нарушению синусоидальной периодичности вихревых структур, подавлению колебаний и разделению струи на две части. [5].

1.2 Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения в микроструях

До недавнего времени более широкое внимание уделялось исследованию макроструй, в силу их обширного применения в различных областях науки и техники. Однако развитие технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и возможность использования микроструй в процессах, таких как микроохлаждение и микроструйное горение, активизировали изучение микроструй.

При изучении струй, истекающих из микросопел с $d \leq 1$ мм было обнаружено, что вне зависимости от того, П-образный профиль у струи или параболический, в течении струи не возникает неустойчивости типичной для макроструй, никаких кольцевых вихрей не наблюдается, вместо этого – протяженный ламинарный участок, однако в случае струи с параболическим профилем скорости ламинарный участок значительно длиннее. На рисунке 3 показано течение в струях, истекающих

из микросопел с $d = 0,5$ мм в случае параболического профиля и П-образного из работы [8].

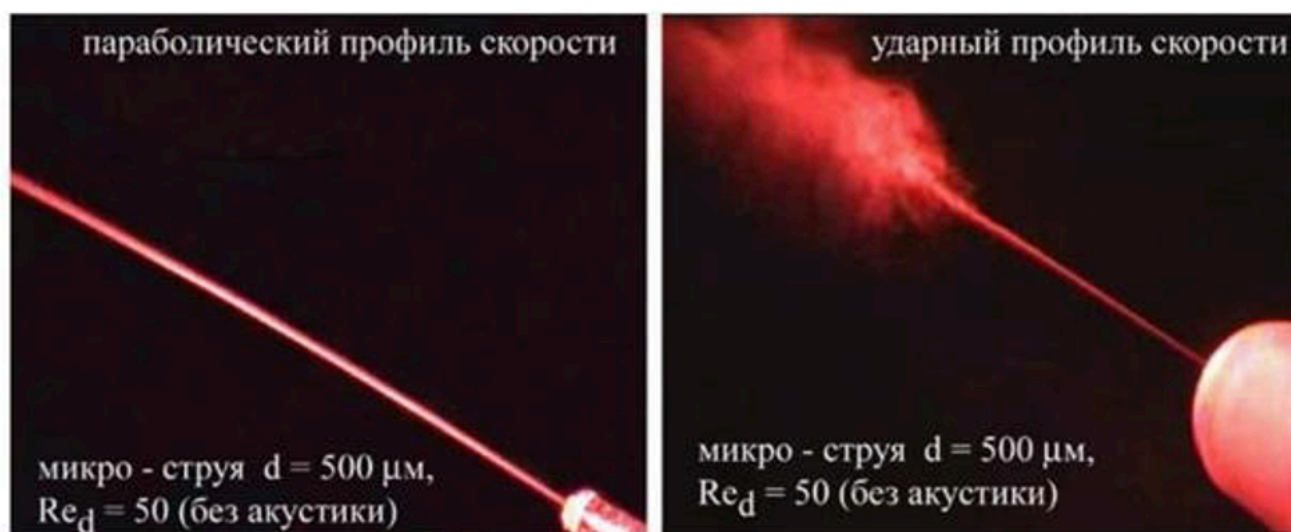


Рис. 3. Картины дымовой визуализации круглой микроструи с параболическим профилем скорости и с П – образным (ударным) [8]

В работе [9] проведено исследование свободных газовых дозвуковых струй воздуха и азота, истекающих из сопел с диаметрами 10 – 340 мкм, а также из сопел с большими диаметрами 0.5 – 8 мм. Основываясь на полученных данных, авторы разбили струи на несколько групп: более 65 мкм, 61,4 – 21,4 мкм и 16,1 – 10,4 мкм. Авторами была выявлена характерная для микроструй особенность – дальнобойность, это значительный по протяженности ламинарный участок струи в случае дозвукового истечения, а в случае сверхзвуковой струи – длина сверхзвуковой части. Полученные результаты также коррелируют с ранее описанными исследованиями, так авторами отмечалось, что для второй и третьей групп дальнобойность в несколько раз превышала дальнобойность макроструй.

В работе [8] авторам удалось провести термоанемометрические измерения профиля скорости и пульсаций на срезе сопла с внутренним диаметром $d = 1$ мм при малых числах Re . Сравнение результатов измерений П-образного (для

короткого канала) и параболического (для удлиненного канала) профиля скоростей на выходе из микросопла приведены на рисунках 4 и 5.

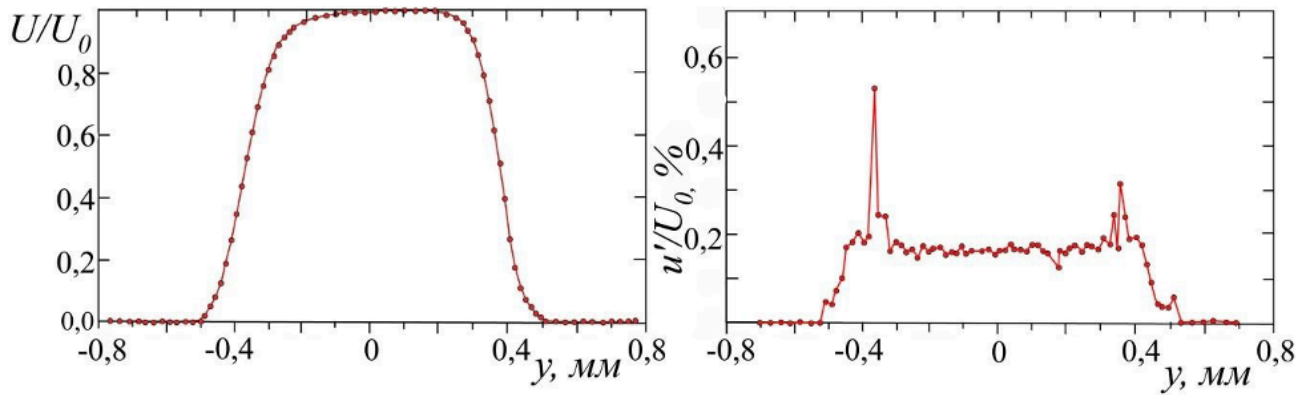


Рис. 4. Распределение средней (U) – слева и пульсационной (u') – справа составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая короткой длины канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/с [11]

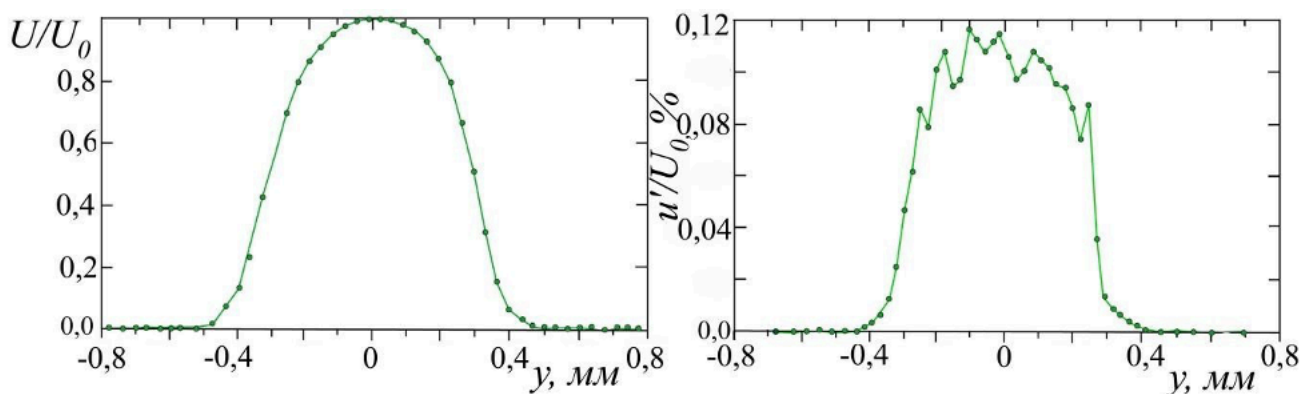


Рис. 5. Распределение средней (U) – слева и пульсационной (u') – справа составляющих продольной компоненты скорости в поперечном сечении круглой струи на расстоянии 0,3 мм от среза сопла для случая удлиненного ($l/d \geq 40$) канала сопла, скорость струи на оси струи $U_0 = 4$ м/сек [11]

В случае короткого канала микросопла реализовывался П-образный профиль скорости на срезе сопла с высоким уровнем пульсаций в пристеночной области. Для случая удлиненного канала микросопла профиль скорости на выходе становился параболическим. В отличие от струй, истекающих из макросопел,

струи, истекающие из микросопел как с П-образным, так и параболическим профилем скорости на срезе сопла подвержены лишь синусоидальной моде неустойчивости.

В случае макросопел с помощью акустических возмущений определенной частоты можно изменить периодичность следования вихревых колец, повысить скорость турбулизации, а в случае микроструи акустическое воздействие приводит к кардинальному изменению характера течения, возникновению в ней синусоидальной неустойчивости, типичной неустойчивости плоских струйных течений [8]. Низкочастотное акустическое воздействие на плоскую микрострую кроме формирования синусоидальной вихревой дорожки приводило к закрутке плоскости струи в противоположных направлениях на каждом периоде акустического воздействия, что в свою очередь приводило к раздвоению потока.

Таким образом, на основании экспериментальных данных, описанных в работах [5, 8] можно условно разделить течения на микро и макро по характерным механизмам возникновения неустойчивости в данных течениях. К первой группе - макротечениям стоит относить течения, в которых ламинарно-турбулентный переход происходит через образование кольцевых вихрей. А ко второй – микротечениям следует отнести струйные течения, в которых обладают характерной дальнобойностью течения – протяженным ламинарным участком на выходе из сопла, как в случае короткого, так и удлиненного канала сопла, а механизм турбулизации связан с азимутальными выбросами с периферии струи и отсутствием генерации вихрей Кельвина – Гельмгольца.

1.3 Диффузионное горение общие сведения

Следующий этап в изучении струйных течений связан с исследованием процессов горения. Различают кинетическое и диффузионное горение, в зависимости от того, была ли подготовлена горючая смесь заранее. При

кинетическом горении компоненты смешиваются предварительно, до начала реакции горения. При диффузионном горении горючее и окислитель первоначально разделены, образование горючей смеси происходит прямо в процессе горения. При воспламенении струи горючего, свободно истекающей в пространство, заполненное окислителем, например, воздухом образуется диффузионный факел. Концентрация горючего максимальна на оси факела, а окислителя в окружающем пространстве. Химические реакции горения протекают в тонком слое факела, в этой области концентрации окислителя и горючего падают до нуля, а концентрация продуктов сгорания максимальна. На поверхности пламени горючие и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении. В случае струйного истечения горючего, в зависимости от начальных условий (диаметра сопла, скорости струи, акустического воздействия) диффузионное горение может быть ламинарным и турбулентным. Ламинарное горение, характеризуется невозмущенным фронтом пламени, а также относительно невысокой скоростью распространения пламени, порядка нескольких метров в секунду. Турбулентное горение, характеризуемое неупорядоченным движением смесей горючего с окислителем, приводит к интенсивному смешению компонентов, в результате скорость турбулентного горения выше скорости ламинарного горения. Поднятые турбулентные пламена вызывают большой интерес ввиду фундаментальных механизмов, влияющих на стабилизацию и затухание пламени в горелках, применяемых в различных научно-технических приложениях. В связи с этим изучению процесса струйного горения в том числе и диффузионного посвящено большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ [10 – 13]. В [14] рассмотрены основные особенности развития диффузионного пламени, образующегося при поджигании струи, истекающей из длинного канала с небольшим внутренним диаметром в окружающую среду. На рисунке 6, приведена зависимость длины пламени от скорости истечения струи газа.

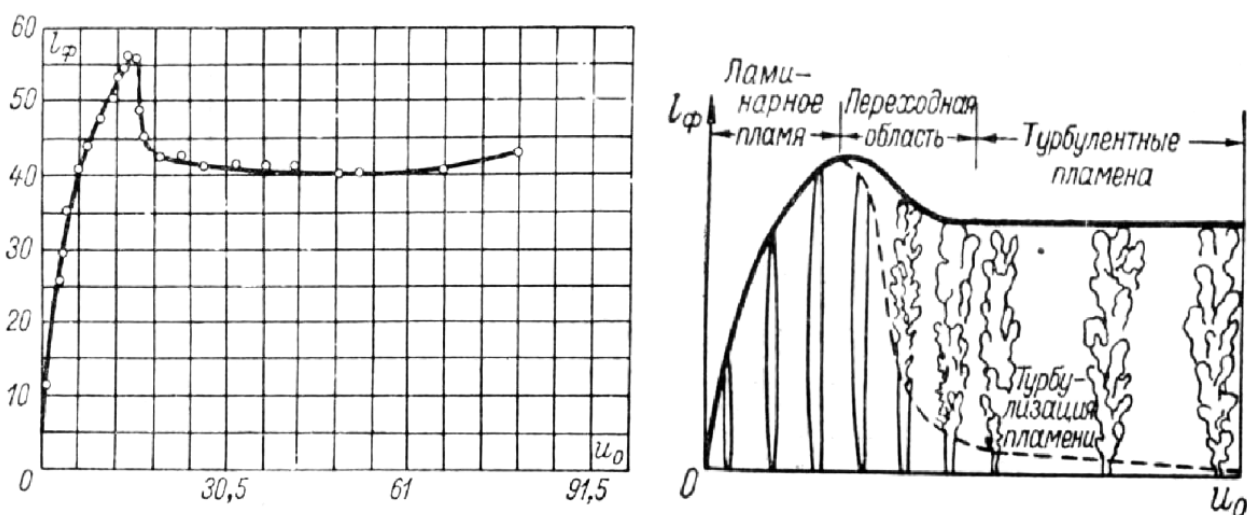


Рис. 6. Протяженность факела в процессе диффузионного горения в зависимости от начальной скорости струи [14]

При небольшой начальной скорости струи реализуется режим ламинарного горения, при этом граница пламени устойчива, а генерация шума струей практически не происходит. В таком режиме увеличение скорости истечения струи приводит к увеличению высоты пламени до определенного предела. После этого следует переходная область. В пламени, начиная от вершины возникает неустойчивость, затем она распространяется по направлению к выходу сопла, вместе с этим длина факела уменьшается. В режиме горения с развитым турбулентным пламенем, длина факела не зависит от скорости потока горючего. В такой ситуации, в пламени отмечаются резкие пульсации, а процесс горения сопровождается сильной генерацией шума.

С одной стороны, как было рассмотрено ранее, создание искусственных акустических воздействий может существенно модифицировать и контролировать развитие струйных течений, как это продемонстрировано в исследовании [5]. С другой стороны, акустические поля, обычно возникающие при горении, в свою очередь, создают новые условия для развития струйных течений и влияют на последующее формирование факела в процессе горения струи. Скорость распространения турбулентного пламени зависит от скорости потока и уровня

турбулентности. Кроме того, изменение температуры из-за горения также влияет на течение струи. Таким образом, струйное течение без горения отличается от горячей струи [15].

Как было показано в [16], по сравнению с углеводородными горючими, водород имеет наилучшие характеристики по стабилизации и скорости отрыва пламени, как видно из таблицы 1. Высота отрыва пламени и скорость для струй водорода, истекающих из сопел с различными диаметрами приведены на рисунке 7.

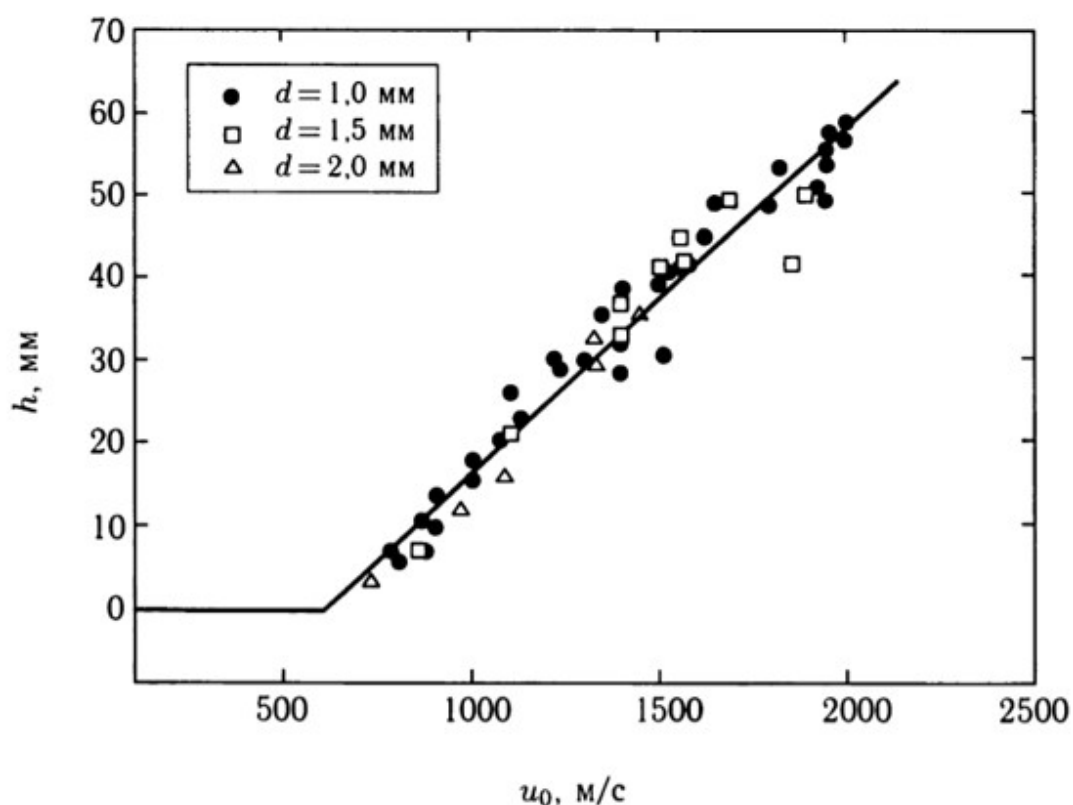


Рис. 7. Высота отрыва струйного диффузионного пламени [16]

Таблица 1[16]

Горючее	U^* (м/с)
H_2	~ 600
CH_4	~ 6
C_3H_8	~ 5

1.4 Особенности диффузионного горения микроструи водорода

Экспериментальное исследование устойчивости диффузионного пламени на примере водорода [17], выявляло существование точки перехода, где происходило разрушение ламинарного потока и течение становилось турбулентным. Также отмечалось, что неустойчивость, которая соответствует наблюдаемой точке перехода в пламени, возникает в струе очень близко к оси внутри поверхности пламени, а не во внешнем слое пламени.

Влиянию воздействия акустики на струйное горение различных газов посвящены работы [18 - 22]. В [22] проведены экспериментальные исследования диффузионного горения водорода при его истечении из плоских и круглых микросопел, воздействию внешнего источника акустических возмущений, а также проведено сравнение с горением пропана в микроструях, в тех же условиях. Так было выяснено, что при микроструйном горении водорода в поперечном акустическом поле, как и в ситуации с исследованием горения в плоской и круглой микроструях пропана в поперечном акустическом поле, было обнаружено явление раздвоения пламени, этот эффект показан на рисунках 8 и 9. Раздвоение факела при воздействии акустического поля коррелирует с результатами полученными для микроструй в отсутствии горения, которые были подвержены бифуркации при воздействии акустического поля.

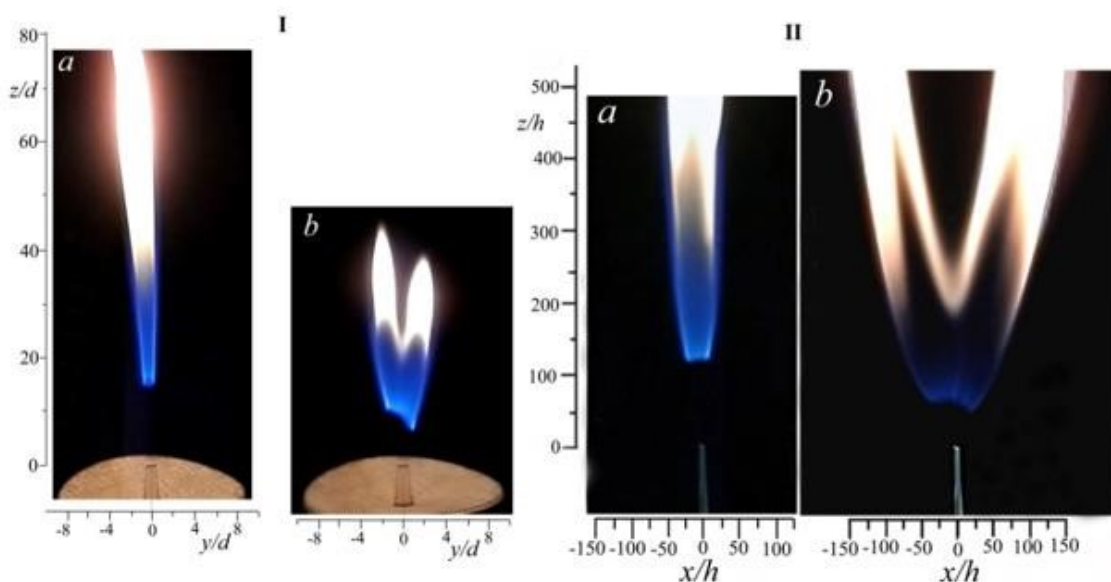


Рис. 8. Фотографии процесса диффузионного горения пропана при его истечении из круглого (I) и плоского микросопла (II), без воздействия акустического поля (a) и с акустическим воздействием (b). [22]

Для пропана эксперименты проводились с пламенем, приподнятым над срезом сопла, как уже упоминалось ранее скорость, при которой происходит отрыв пламени от среза сопла, относительно небольшая и составляет порядка 6 м/с. Хотя для водорода не удалось приподнять факел над срезом сопла при увеличении скорости истечения, тем не менее явление раздвоения пламени при акустическом воздействии определенной частоты наблюдалось в ситуации присоединенного факела. Однако, при этом была обнаружена новая особенность в структуре диффузионного пламени, не характерная для горения пропана и других ранее исследованных газов. При определенной скорости истечения в пламени водорода наблюдалась локальное уменьшение поперечного сечения факела, это явление отчетливо видно на рисунке 9. В пламени водорода формировалась двузонная структура. Вблизи среза сопла пламя имело сферическую форму, при определенной скорости истечения и не было восприимчиво к акустическим возмущениям, в то время как вторая зона пламени уширялась при воздействии акустического поля.

В [23] было уделено внимание характерным особенностям диффузионного горения водорода, истекающего из микросопел. Был сделан вывод, что пламя разделялось на две зоны – ламинарную и турбулентную. Зона вблизи среза сопла имеет сферическую форму и отсутствие на теневых картинах неупорядоченных вихревых структур приводит к выводу, что горение в этой области имеет ламинарный характер. В ламинарной зоне пламени на теневых картинах отчетливо просматривается течение ламинарной струи водорода. Ламинарный режим смешения водорода с воздухом в этой зоне обуславливает ее сферическую форму. Ламинарная область пламени захватывает срез сопла.

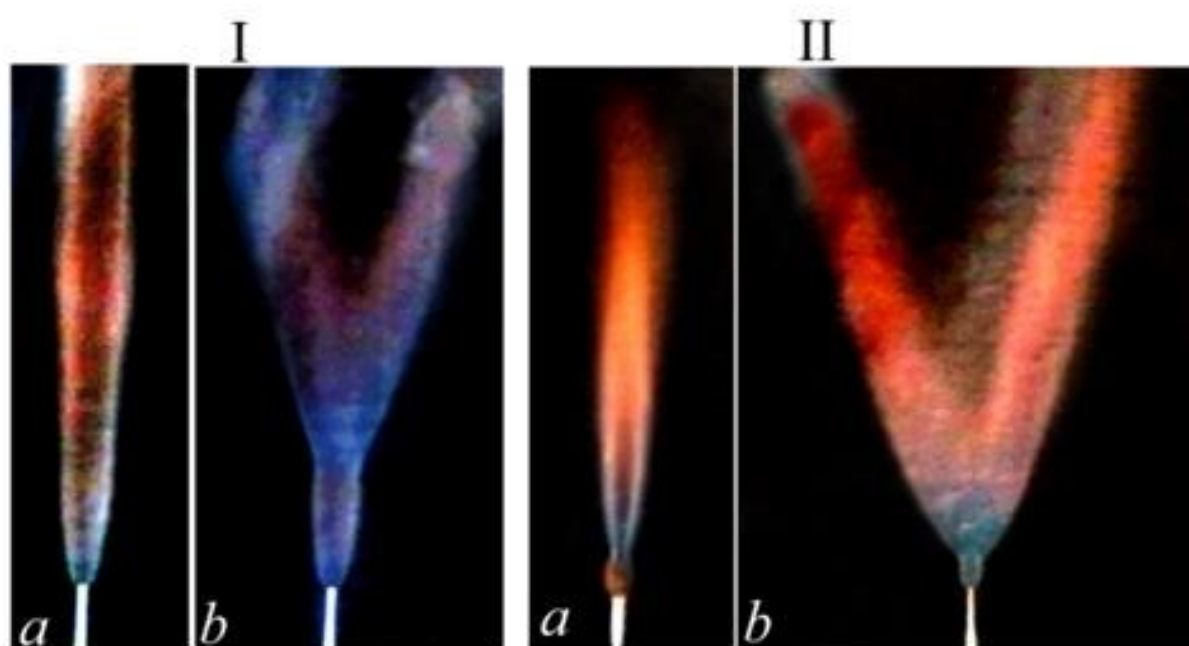


Рис. 9. Фотографии процесса диффузионного горения водорода при его истечении из круглого (I) и плоского микросопла (II), без воздействия акустического поля (a) и с акустическим воздействием (b). [22]

Область локального уменьшения пламени между ламинарной и турбулентной зонами была названа «перетяжкой». При увеличении скорости истечения микроструи пространственный размер области с ламинарным течением

и горением уменьшается. Проходя через зону перетяжки пламени ламинарный характер течения струи изменяется на турбулентный, при этом интенсивность смешения водорода с воздухом возрастает и пламя также становится турбулентным. Турбулентная зона пламени имеет конусообразную форму. Этот факт соотносится с другим исследованием [24], авторы которого методом цветной теневой фотографии в похожих условиях обнаружили, что факел имеет двузонную структуру, а именно – ламинарную вблизи среза сопла и турбулентную далее вверх по потоку после локального сужения факела, цветные теневые фотографии процесса горения представлены на рисунке 10.

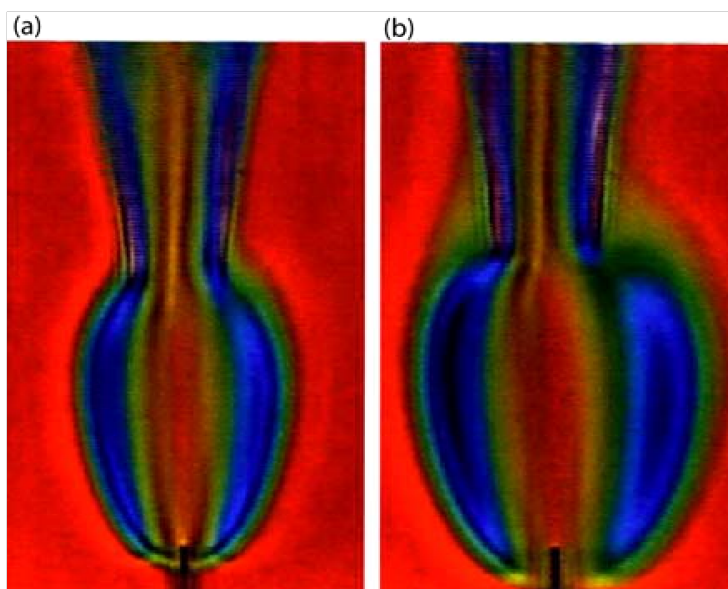


Рис. 10. Цветные теневые картины пламени ($d = 0,31$ мм, $Re = 1500$): а – земная гравитация, $Fr = 9,70 \cdot 10^7$; б – микрогравитация, $Fr = 9,70 \cdot 10^{11}$ (взято из [24])

В работе [25] авторами было выдвинуто предположение, что процесс смешения ламинарной микроструи водорода с воздухом, находящимся в окружающем пространстве, сопровождается образованием тороидального вихря, в результате чего формируется сферическая форма пламени в зоне, примыкающей к срезу сопла. Ламинарная область пламени захватывает срез сопла, в пределах этой

зоны струя и ее горение остаются ламинарными, на периферии струи происходит формирование вихревого движения, как показано на рисунке 11. Сферическая область течения окружена тонким слоем с большим градиентом плотности среды, при преодолении которого ламинарная струя разрушается и происходит переход к режиму турбулентного горения.

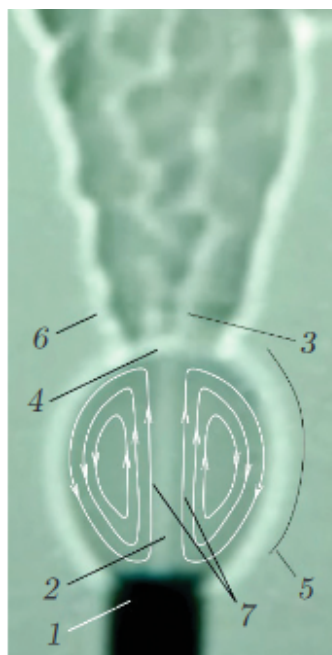


Рис. 11. Теневая фотография круглой микроструи водорода вблизи среза сопла: 1 – сопло; 2 – ламинарная струя; 3 – турбулентная струя; (4) градиент плотности середина; 5 – область «узкого места»; 6 – турбулентное пламя; 7 – тороидальные вихри [25]

Следует отметить еще одну важную особенность в развитии микроструи водорода в процессе диффузионного горения. На рисунке 12 из работы [26] показано сравнение теневых картин свободно истекающей микроструи и микроструи в процессе диффузионного горения. Сравнение показывает, что протяженность ламинарной зоны увеличивается в условиях горения увеличилась в четыре раза по сравнению с истечением микроструи в отсутствии горения. В этой работе и в [27] также уделялось внимание вопросу формирования двузонной

структуры пламени со сферической зоной факела, охватывающей срез сопла, при различной пространственной ориентации выхода сопла. Было показано, какие изменения в топологии пламени происходят в зависимости от скорости истечения струи, а также от того, как направлено сопло относительно вектора \mathbf{g} . Из рисунка 13, следует, что двузонная структура пламени в широком диапазоне скоростей сохраняется при ориентации сопла под углом 90° относительно вектора \mathbf{g} .

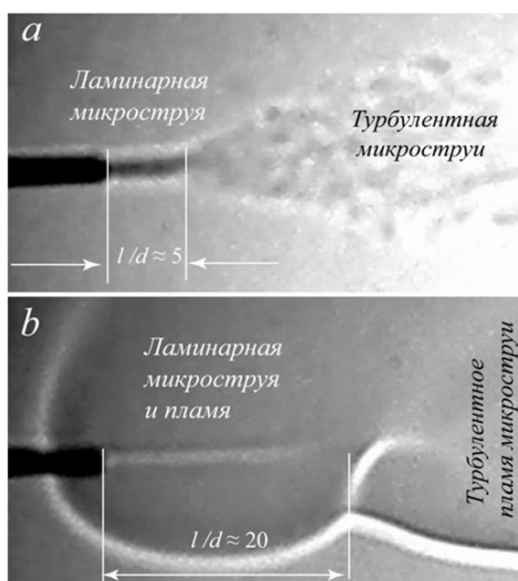


Рис. 12. Сравнение теневых картин развития круглой микроструи водорода без горения (a) и с горением (b), $d = 0,5$ мм, $U_0 = 357$ м/с [26]

В случаях, когда истечение микроструи происходит в противоположном направлении вектору \mathbf{g} и в случае, когда истечение микроструи происходит при ориентации сопла перпендикулярно вектору \mathbf{g} при высоких скоростях истечения микроструи происходит отделение пламени от среза сопла на турбулентном участке при сохранении пламени сферической формы вблизи среза сопла. Однако в случае, когда истечения струи сопла совпадает с вектором \mathbf{g} происходит отделение пламени на турбулентном участке при исчезновении пламени сферической формы вблизи среза сопла, что показано на рисунке 14, когда истечение происходит при

предельных скоростях истечения микроструй непосредственно перед полным срывом пламен.

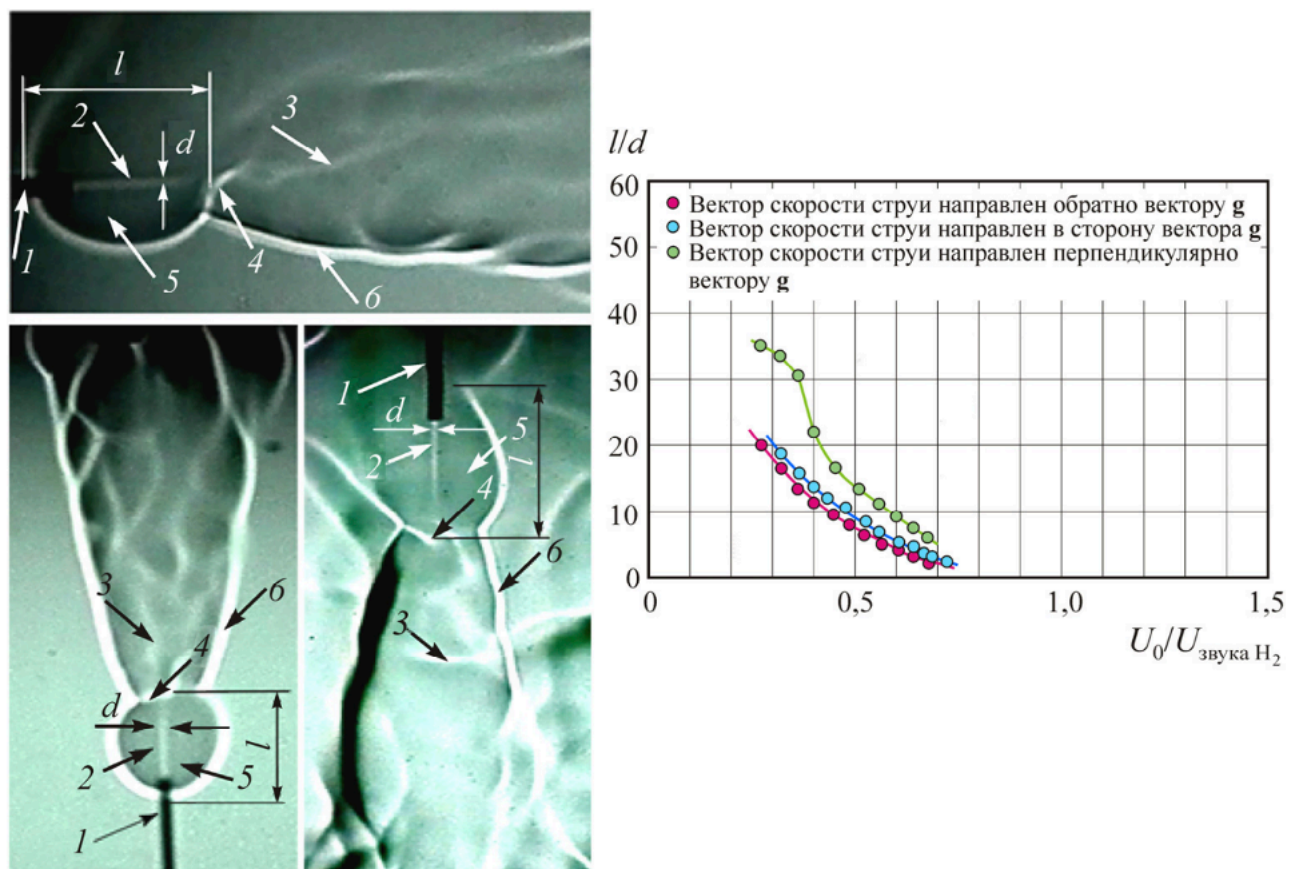


Рис. 13. Теневые картины области «перетяжки» пламени (слева): 1 – сопло; 2 – ламинарная струя водорода; 3 – турбулентная струя водорода; 4 – фронт горения водорода в сферической области с резким изменением плотности; 5 – сферическая область горения водорода в ближнем поле; 6 – пламя горения турбулентной струи водорода. Графики зависимостей размера ламинарной зоны пламени сферической формы при диффузионном горении микроструи водорода (диаметр сопла $d = 0,5$ мм) от направления и скорости ее истечения (справа) [27]

Полный срыв пламени также происходил при несколько меньших скоростях истечения струи в случаях, когда направление истечения противоположно и перпендикулярно направлению g , диапазоны существования горения в ламинарной области пламени и момент прекращения горения микроструи практически

совпадают, при этом сценарий горения с приподнятым пламенем не реализуется вовсе (если не учитывать поджигание вдали от выходного отверстия сопла).

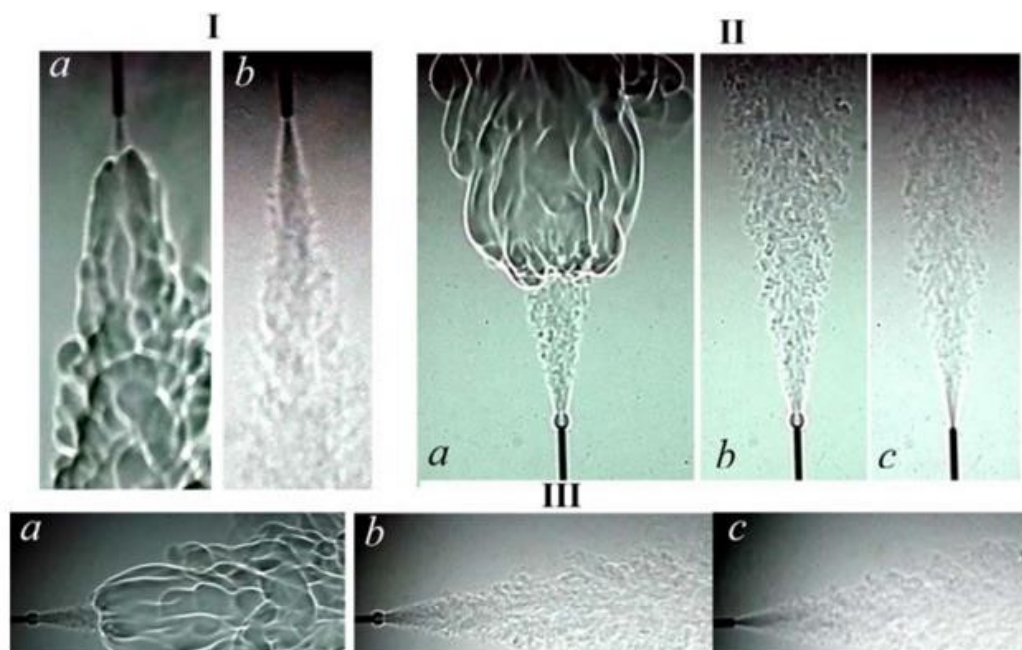


Рис. 14. Теневые картины отрыва пламени от среза сопла для различных пространственных направлений истечения микроструи водорода при ее диффузионном горении: I) а - 918- 1 097 м/с; б - 1 107 м/с; II) а - 867 м/с; б - 969 м/с; с - 1 020 м/с; III) а - 867м/с; б - 908-969 м/с; с - 1 020 м/с; сопло: $d = 0,5$, $l = 60$ мм [26]

Как уже отмечалось ранее, форма профиля скорости на срезе сопла в зависимости от отношения длины канала сопла к его выходному диаметру (L/d , где L - длина канала сопла, а d - его выходной диаметр) может быть П-образным или параболическим. Исследования проведенные в [25] показывают в условиях диффузионного горения микроструи водорода, как начальные условия влияли на сценарии течения и горения. В качестве начальных условий, кроме параболического и ударного профиля скорости, еще исследовалось влияние теплоемкости сопла. Рассматривалось тонкостенное цилиндрическое сопло и сопло с теплоемким материалом, установленным на выходе сопла. Было обнаружено, что для сопел с удлиненным каналом, способствующих формированию параболического профиля скорости, а также имеющих дополнительно

установленный теплоемкий материал вблизи среза сопла, диапазон скоростей, при которых результирующий факел имеет двузонную структуру (вблизи среза сопла ламинарное горение сферической формы и турбулентный далее вверх по потоку), максимальный, что показано на рисунке 15.

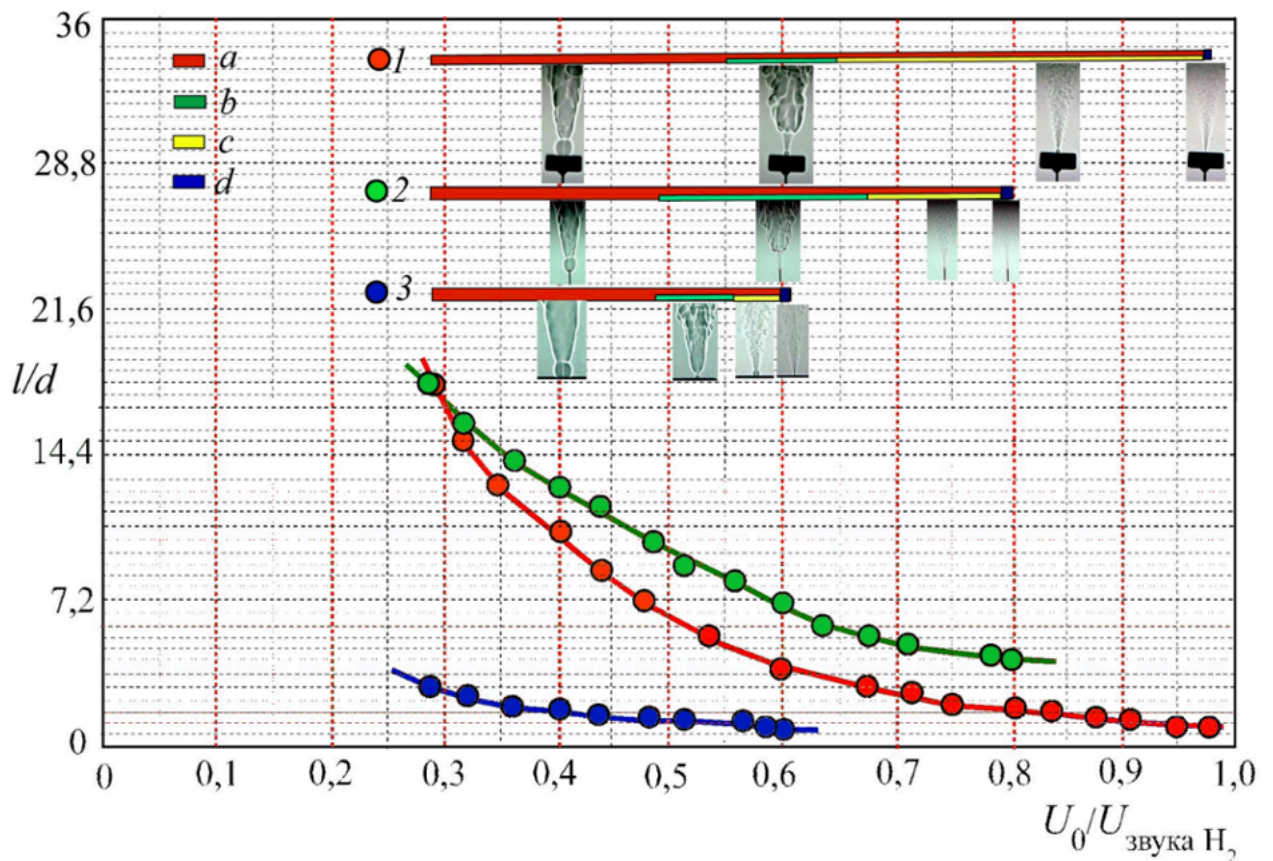


Рис. 15. Сравнение графиков изменения размера области «перетяжки» пламени (l/d) при диффузионном горении круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения (U/U_0), изменения начальных условий на срезе сопла: параболического (1, 2) или ударного (3) профиля скорости, а также конструктивных особенностей самого соплового аппарата. Диапазоны скоростей истечения микроструи: а - наличие области «перетяжки» пламени; б - отрыв пламени; с - наличие горения в области «перетяжки» пламени и его отсутствие в турбулентной микроструе; д - прекращение горения микроструи. [27]

Свободно истекающие струи можно разделить на макро и микроструи в зависимости от типа неустойчивостей, которые возникают в течении при истечении потока из сопел различных диаметров. Так в микроструях, независимо от начального профиля на срезе сопла, возникал протяженный ламинарный участок и не формировалось кольцевых вихрей (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца). Поэтому важно понять, как можно разделить макро и микросопла уже в условиях диффузионного горения для этого требуется рассмотреть сценарии диффузионного горения при истечении из сопел макро и микродиаметров с точки зрения свободно истекающих струй.

В работе [18] было обнаружено, что для микроструи истекающей из сопла диаметром $d \sim 30$ мкм горение факела является ламинарным с небольшим углом распространения ~ 5 градусов при любых скоростях истечения, вплоть до скорости при которой происходит срыв потока и горение не поддерживается. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи, истекающей из сопла с $d = 30$ мкм представлены на рисунке 16.



Рис. 16. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи, истекающей из сопла с $d = 30$ мкм [22]

Наибольшее количество различных сценариев диффузионного горения водорода с широким диапазоном скоростей, в которых формируется двузонная структура пламени, характерно для микросопел с диаметрами от 250 мкм. Так по результатам работ [23, 25 - 27] для водорода, истекающего из сопел больших диаметров $d = 250 \div 500$ мкм при воспламенении микроструи вблизи среза сопла и постепенном увеличении расхода или скорости истечения U_0 (большая часть которых в показана на рисунке 17 и в области высоких скоростей на рисунке 18) последовательно реализуются следующие сценарии горения:

1) Ламинарное горение, с протяженным ламинарным факелом, угол распространения которого менее 5 градусов;

2) Разделение пламени «перетяжкой» пламени на две зоны, образование сферической зоны, охватывающей срез сопла, в которой просматривается ламинарная струя и резкой турбулизацией пламени далее вверх по потоку, рисунок 13 (а - i). Такой режим горения существует в широком диапазоне скоростей, а протяженность ламинарного участка пламени уменьшается с увеличением скорости истечения водорода;

3) Отделение турбулентного участка пламени от зоны перетяжки при сохранении горения в ламинарной зоне. При этом между первой ламинарной зоной пламени и вторым турбулентным участком пламенем находится не воспламенённый участок, рисунок 13 (j - k);

4) Горение в ламинарной области пламени и турбулентное течение водорода далее по потоку, горение в турбулентной зоне не поддерживается. Скорость истечения микроструи, при которой сохраняется горение в ламинарной зоне, близка к трансзвуковой, рисунок 14 (а - с);

5) Срыв факела в турбулентной зоне, прекращение горения, рисунок 14 (а - d).

Таким образом горение в двух зонах может происходить независимо, а также стоит отметить, что горение в первой зоне является стабилизатором всего

горения в целом. Так при увеличении скорости истечения микроструи происходит переход от сценария 1 к сценарию 4, а уменьшение скорости истечения приведет к обратному переходу от 4 к 1. Горение из первой зоны, охватывающей срез сопла, при понижении скорости истечения микроструи водорода, распространяется на вторую зону. В приведённых случаях для микросопел с диаметрами $d = 250 \div 500$ мкм параметр L/d находится в диапазоне 20 - 240, т.е. на срезе сопла всегда формируется профиль скорости, близкий к параболическому.

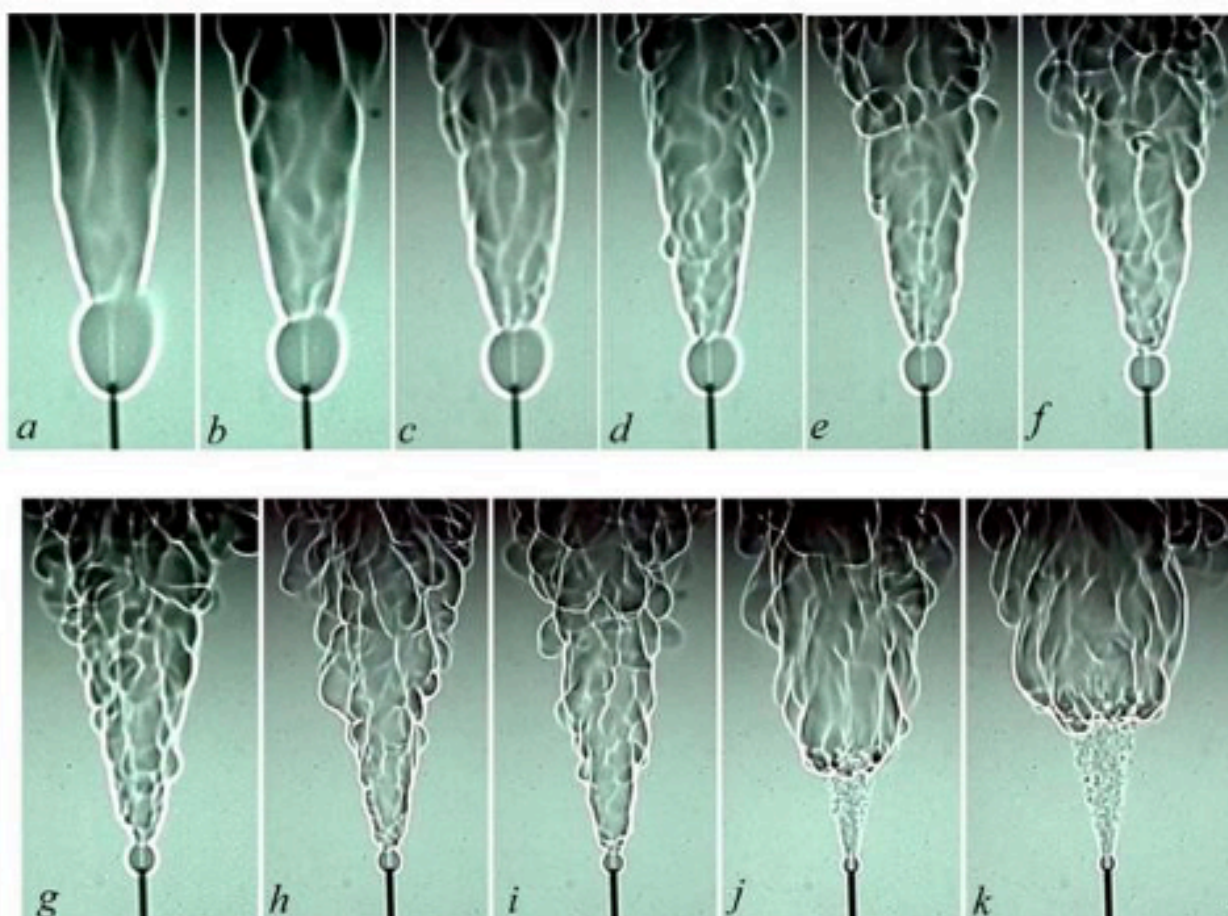


Рис. 17. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (U_0 , м/с): а - 357; б - 408; в - 459; д - 510; е - 561; ф - 612; г - 663; h - 714; и - 765; к - 867 [25]

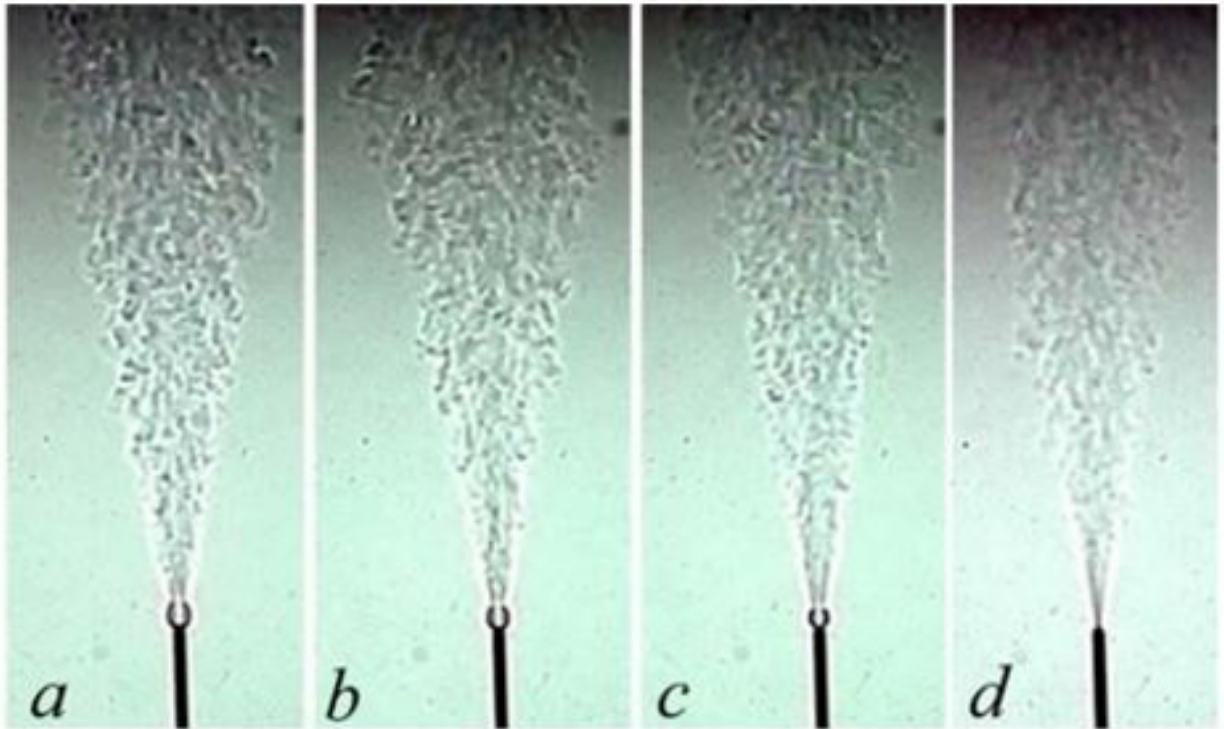


Рис. 18. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из круглого отверстия диаметром 500 мкм, при различной скорости истечения струи (U_0 , м/с): а - 887; б - 918; с - 969; d - 1 020 [25]

Наличие сценария горения с ламинарной зоной сферической формы, оканчивающейся перетяжкой, которая отделяет турбулентное пламя, является характерной особенностью водорода, при его истечении из микросопел. Таким образом, существует некоторый предел для диаметра сопла, при котором будет наблюдаться данный сценарий.

Для струй с $d = 1200$ мкм в области высоких скоростей истечения струи не реализуется сценарии 3 и 4 [28]. Вместо этих сценариев реализуется горение с турбулентным факелом, оторванным от среза сопла рисунке 19, постепенное увеличение скорости истечения микроструи в этом случае приводит к увеличению промежутка между срезом сопла и турбулентным факелом.



Рис. 19. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из круглого сопла с $d = 1200$ мкм при увеличении скорости истечения: a-h - от 40 до 1340 м/с [23]

В [23] было обнаружено, что для сопел существенно больших размеров вплоть до $d = 3000$ мкм, при определенной скорости истечения водорода реализуются сценарии 1 и 2, что показано на рисунке 20.

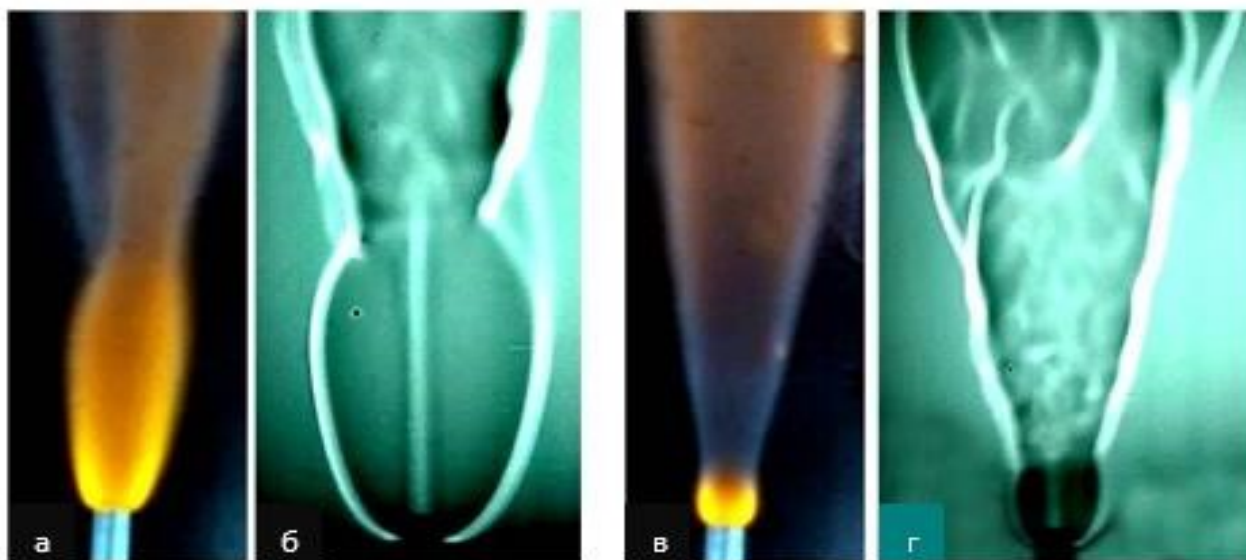


Рис. 20. Фотография пламени (а, в) процесса диффузионного горения круглой струи водорода и его теневая картина (б, г) в ближнем струи (диаметр сопла $d = 3$ мм): а, б - $U = 95$ м/с; в, г - $U = 125$ м/с [23]

Для сопел с внутренним диаметром $d = 5$ мм формирование структуры результирующего факела связано с случаем классического ламинарно-турбулентного перехода. При увеличении скорости истечения струи в потоке возникают характерные Λ -структуры из-за варикозной неустойчивости на границе потока. В дальнейшем эти структуры трансформируются в турбулентные пятна, что приводит к турбулизации потока в целом, что продемонстрировано на рисунке 21.

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что формирование перетяжки пламени при горении круглой струи водорода в воздухе является характерным для струи, истекающей из сопел с диаметром $\sim 250 \div 3000$ мкм. Вероятно, распределение средней скорости на срезе сопла в этом диапазоне диаметров способствует созданию двузонной структуры пламени.

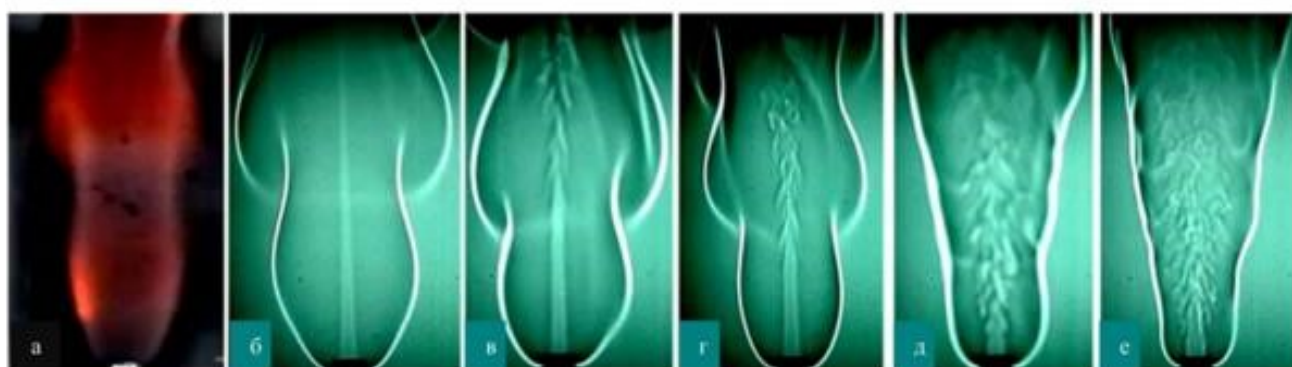


Рис. 21. Фотография пламени (а) процесса диффузионного горения круглой струи водорода и его теневые картины (б-е) в ближнем поле мини-струи при различной скорости струи (м/с): а - 10; б - 10; в - 30; г - 50; д - 70; е - 80; $d = 5$ мм [23]

Наибольшее количество сценариев диффузионного горения реализуется для микроструй истекающих из сопел диаметрами $250 \div 500$ мкм, включая сценарий при котором поддерживается горение в двух зонах с невоспламененным промежутком между ними, а также сценарий при котором горение поддерживается только в первой зоне вблизи среза сопла при отсутствии горения во второй зоне. Начиная с диаметра по-крайней мере $d = 1,2$ мм удастся реализовать сценарий

диффузионного горения с факелом, отошедшим от среза сопла при повышении скорости истечения струи (не прибегая к способу воспламенения микроструи на расстоянии от среза микросопла).

1.5 Воспламенение микроструи вблизи и на расстоянии от среза сопла

В предыдущем разделе обсуждалось, что сценарии диффузионного горения для струй, истекающих из микросопел с диаметрами $250 \div 500$ мкм и $1,2$ мкм отличаются в области высоких скоростей истечения водорода. Исследованию возникновения эффекта запираания при микроструйном горении струи водород посвящена работа [29]. В ней было установлено, что наличие сферической области пламени с ламинарным характером течения и горения в ней, охватывающей верхнюю часть сопла, способствует стабилизации процесса горения в микроструе водорода, при этом происходит нагрев стенок сопла, что приводит к возникновению эффекта “запираания”, и скорость истечения остается в дозвуковой области. Однако для сопел достаточно больших диаметров, по крайней мере с $d = 1200$ мкм, удастся реализовать режим с факелом, отошедшим от среза сопла, как показано на рисунке 22, взятом из работы [28]. В этом случае в течения можно скачки уплотнений, что свидетельствует о переходе к сверхзвуковому режиму истечения струи.

Также для струй истекающих из сопел меньших диаметров в [30] было показано, что при поджигании струи на расстоянии от среза сопла реализуется сценарий горения с приподнятым пламенем и в таком случае, течение в струе может перейти в сверхзвуковой режим, о чем свидетельствует наличие характерных скачков уплотнений в структуре пламени струи, что показано на рисунке 22.

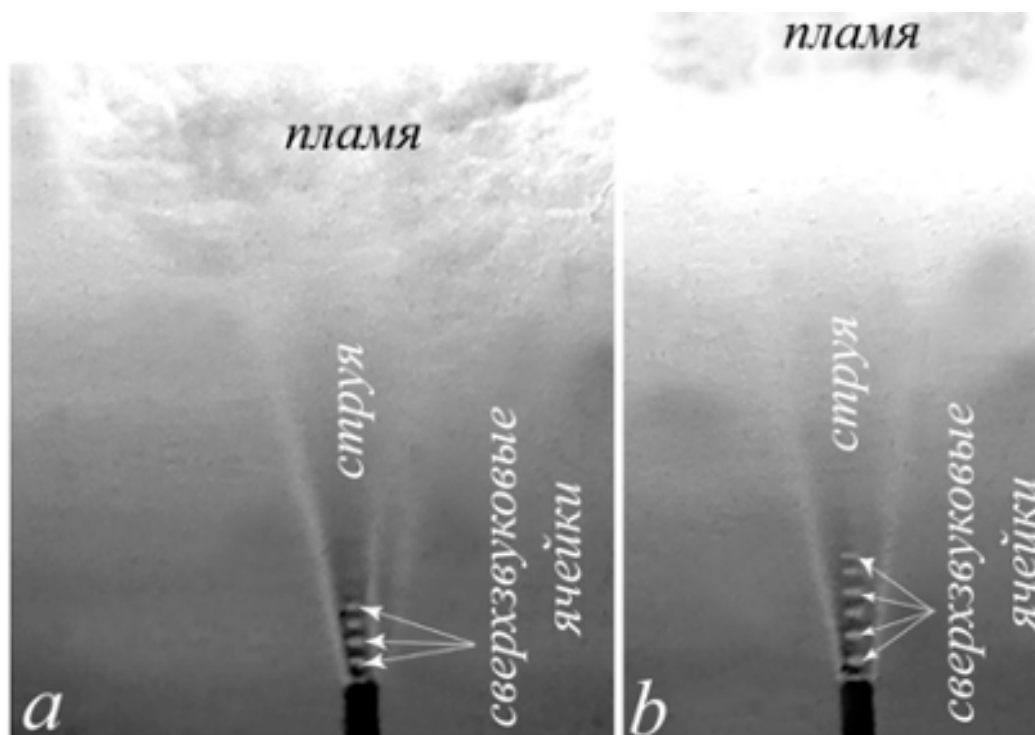


Рис. 22. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из круглого микросопла с $d = 1200$ мкм: $U_0 \approx 1225$ м/с (а) и $U_0 \approx 1300$ м/с (б), величина отрыва пламени $h \approx 30$ (а), 35(б) мм соответственно [28]

В предыдущем разделе обсуждалось, что сценарии диффузионного горения для струй, истекающих из микросопел с диаметрами $250 \div 500$ мкм и $1200 \div 3000$ мкм отличаются в области высоких скоростей истечения водорода и реализовать режим горения с факелом отошедшим от среза сопла при повышении скорости истечения водорода удастся только для второй группы микросопел. Тем не менее для первой группы микросопел удастся реализовать сценарий с отошедшим от среза сопла факелом при поджигании микроструи на некотором расстоянии от среза сопла. В таком случае реализуется горение с турбулентным факелом, отошедшим от среза сопла и отсутствует первая зона факела сферической формы.

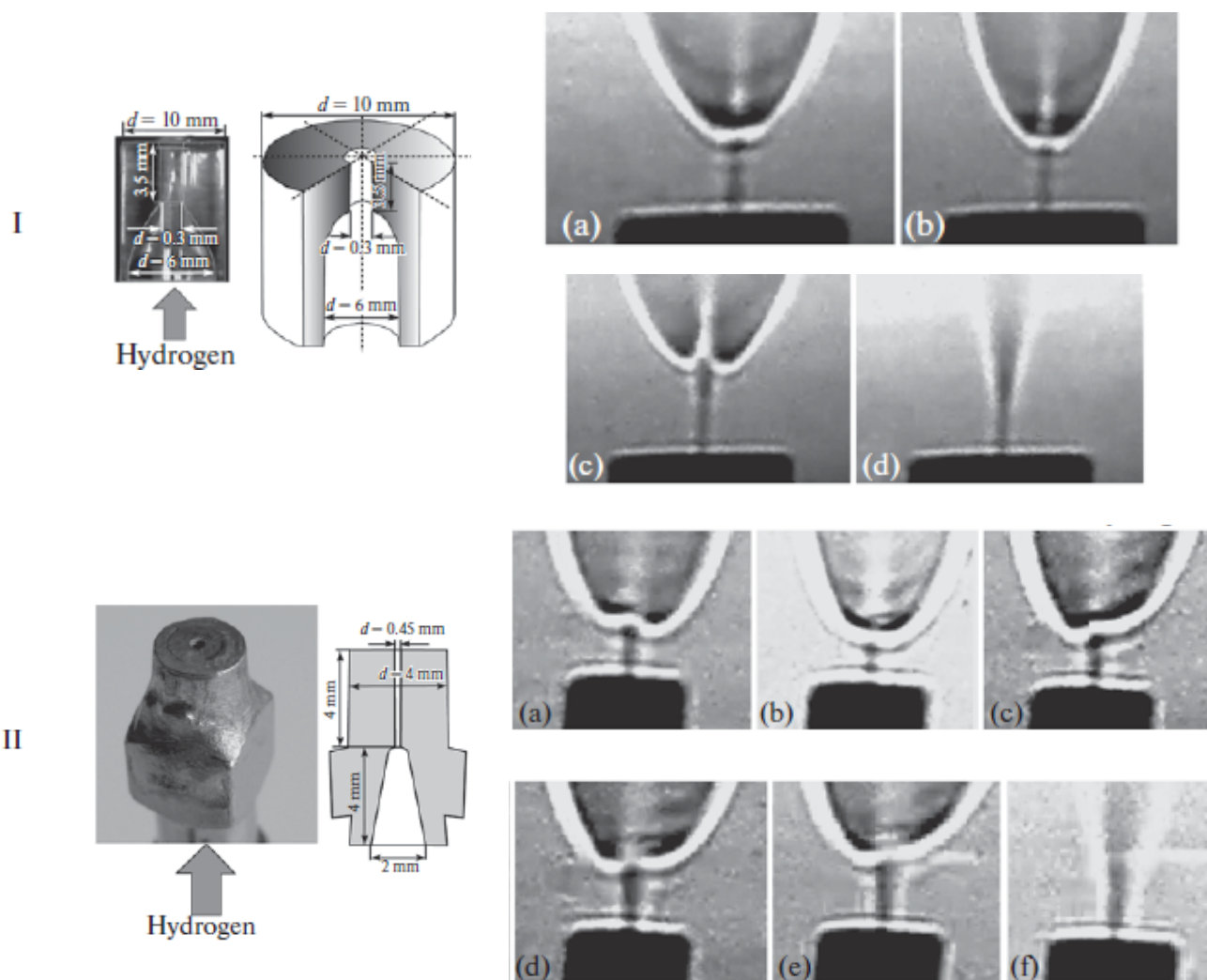


Рис. 23. Теневые картины эволюции пламени при диффузионном горении водородных микроструй при их воспламенении вдали от среза сопла в $(U, \text{м/с}) = 846 \div 1268$ (I) и $1270 \div 1826$ (II) м/с [30]

Однако, в ситуации, когда поджигание струи производится вдали от среза сопла, при некоторой скорости истечения газа, позволяющей при этом поддерживать горение приподнятого факела, при дальнейшем уменьшении скорости истечения микроструи можно вернуться к сценарию горения с присоединенным факелом, и в пламени будет наблюдаться двузонная структура. Однако при этом скорость струи, при которой факел вновь присоединяется к срезу сопла, будет меньше, чем в ситуации, когда мы поджигаем струю газа при малой скорости и переходим с повышением скорости истечения на режим горения с приподнятым факелом. Другими словами, скорости истечения микроструи, при

которых происходят переходы от присоединенного факела к приподнятому и обратно, от поднятого к присоединенному, различны. Наблюдается гистерезисный цикл, он был описан в работах [28, 30] для круглых и плоских микроструй в случае сопел с достаточно большим диаметром для реализации режима горения с факелом, отошедшим от среза сопла при увеличении скорости истечения. Пример гистерезисного цикла из [26] показан на рисунке 24.

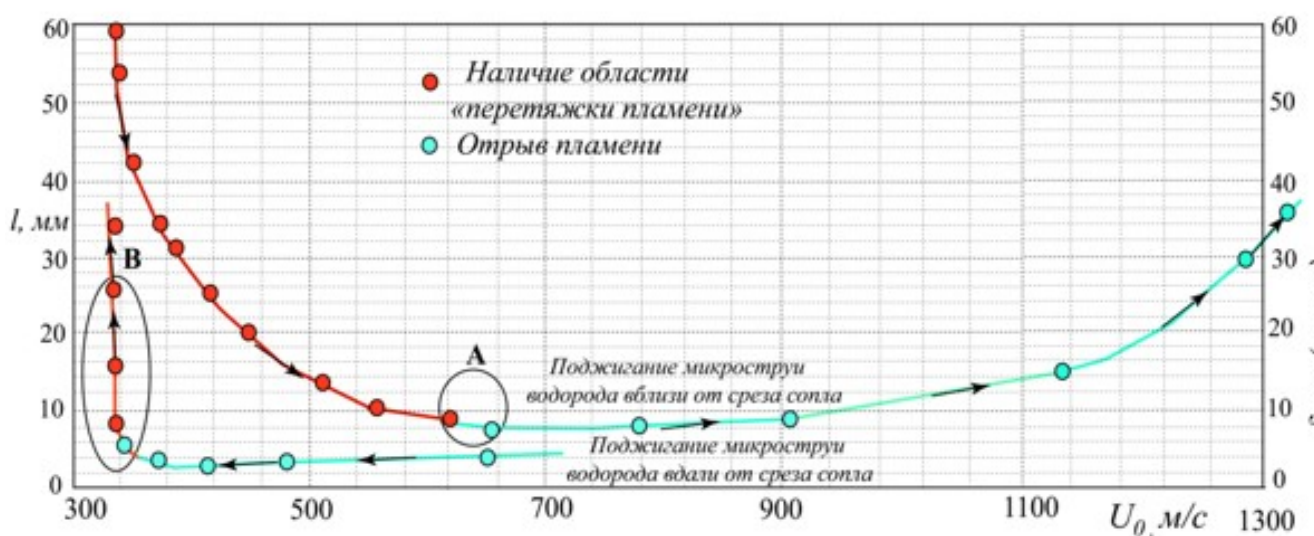


Рис. 24. График (гистерезис) зависимости процесса развития пламени микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения и способа поджигания (вблизи / вдали от среза сопла), диапазон скорости исчезновения области перетяжки пламени и начало отрыва пламени (A) и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления области перетяжки пламени (B). Стрелками указано направление изменения скорости микроструи (повышение / уменьшение) [26]

В работах [26, 28] в зависимости от способа поджигания микроструи водорода в непосредственной близости от среза сопла или на удалении обнаружен механизм стабилизации диффузионного горения. При поджигании микроструи в непосредственной близости к выходному отверстию сопла в роли стабилизатора выступает горение в ламинарной области пламени. Ламинарная область пламени,

охватывающая верхнюю часть сопла вблизи среза, при диффузионном горении водорода присутствует в широком диапазоне скоростей истечения. В зависимости от геометрических параметров сопла, пространственной ориентации, начальных условий для профилей скорости на срезе сопла диапазон скоростей, при которых она существует, разный. Тем не менее, при существовании она охватывает верхнюю часть сопла, нагревая ее.

В работе [30] было проведено измерение температуры микросопла и пламени горячей микроструи водорода. В работе [30] с помощью термопары проведено измерение температуры нагрева стенки микросопла в процессе диффузионного горения при различных скоростях истечения микроструи водорода, результаты представлены на рисунке 25. При низких скоростях истечения микроструи водорода температура стенки микросопла колеблется в диапазоне от 350 до 500 °С.

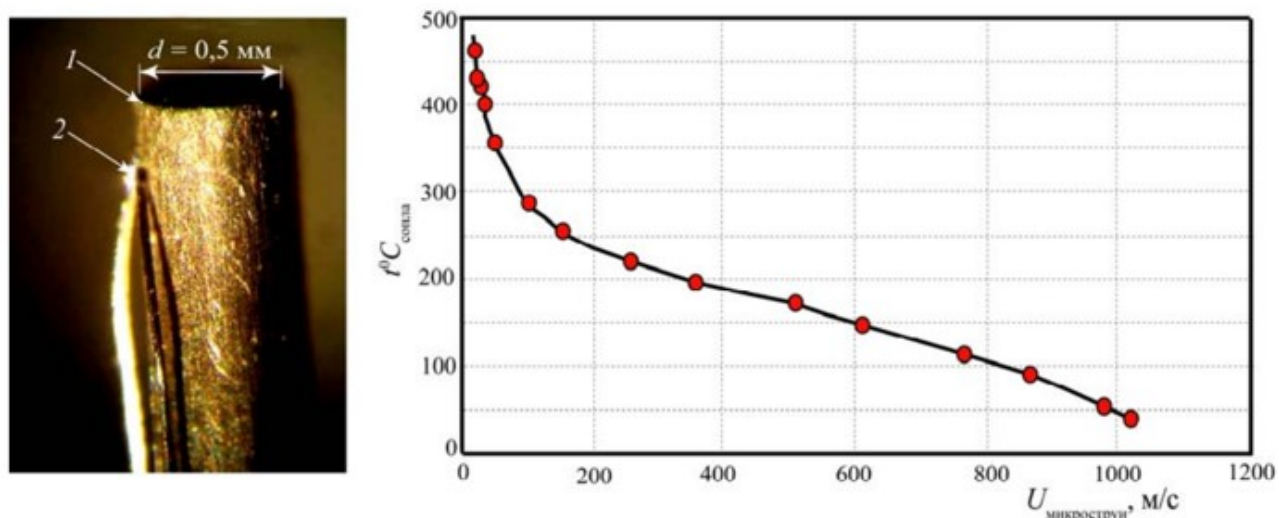


Рис. 25. Фотография микросопла с термопарой: 1 - микросопло; 2 - позиция термопары (слева) и график зависимости температуры на стенке микросопла от скорости истечения микроструи (справа)

При увеличении скорости истечения температура монотонно снижается. Это объясняется увеличением отвода тепла из внутренней стенки трубки и уменьшением подвода тепла на внешнюю стенку из-за уменьшения ламинарной

зоны горения. График, указывающий на монотонное уменьшение температуры стенки сопла, коррелирует с данными работ [26, 28] в которых приведены графики зависимости протяженности ламинарной зоны пламени, охватывающей срез сопла, от скорости истечения водорода, которые указывают на монотонное уменьшение протяженности сферической зоны пламени, охватывающей срез сопла. Таким образом можно объяснить монотонное уменьшение температуры стенки сопла с увеличением скорости истечения водорода двумя факторами: увеличением отвода тепла от внутренней стенки трубки за счет увеличения протекающего через канал водорода и уменьшением подвода тепла на внешнюю стенку из-за уменьшения ламинарной зоны пламени, охватывающей срез сопла. Нагрев сопла способствует передаче тепла проходящему по нему потоку водорода, осуществляется рекуперация тепла из пламени в истекающее через микросопло топливо.

Также в [31] с помощью пневматического зонда были проведены измерения температуры продуктов сгорания в пламени микроструи водорода, результат измерений показан на рисунке 26. Авторами отмечалось, что результаты измерений вышеописанными методами дают заниженные по сравнению с реальными значениями температуры, поэтому в большей степени их стоит, прежде всего, рассматривать как качественную картину распределения температуры в пламени. При внесении в пламя зонда происходило его оплавление, учитывая температуру плавления материала, из которого он изготовлен. Из этого косвенного факта можно заключить, что температура пламени $T > 1700$ °С. Другой механизм стабилизации проявляется при поджигании микроструи водорода вдали от выходного отверстия сопла. Приподнятость пламени также является немаловажным фактором, так как предотвращает нагревание сопла. Соотношение скорости истечения струи и скорости химической реакции определяет, какой сценарий горения будет реализован при поджигании вдали от выходного отверстия сопла. Если поджигание микроструи вдали от сопла происходит при малой скорости истечения микроструи, то пламя разделяется на турбулентную и ламинарную зону, охватывающую и нагревающую срез сопла. Это означает, что скорость химической реакции процесса

горения преобладает над скоростью истечения микроструи. Режим горения с приподнятым факелом реализуется при равенстве скоростей, либо при преобладании скорости истечения микроструи. Однако значительно большая скорость истечения микроструи приведет к тому, что горение не будет поддерживаться.

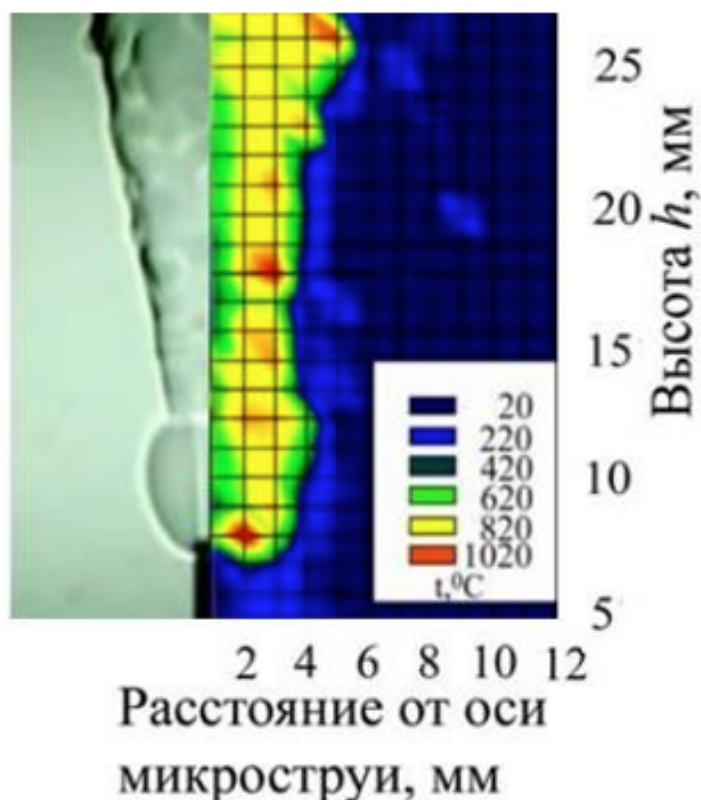


Рис. 25. Распределение температуры при горении микроструи водорода истекающей из сопла с $d = 500$ мкм, $U_0 = 500$ м/с [31]

1.6 Особенности истечения и горения плоских микроструй водорода

Особенностью микроструй, истекающих из сопла с плоским отверстием, является возникновение синусоидальной неустойчивости. Как уже говорилось ранее, микроструи, истекающие из микросопел с круглым сечением в определенных условиях проявляют свойства, характерные для плоских

микроструй. Так, например, при воздействии поперечного акустического поля, круглая поля уплощается и также становится подвержена синусоидальной неустойчивости. При воздействии поперечного акустического поля как плоская, так и круглая микроструи подвержены бифуркации. Микроструи расщепляются на две расходящиеся под определенным углом микроструи в которых наблюдается возникновение высокочастотных вихревых структур. Именно поэтому мы наблюдаем раздвоение пламени в акустическом поле. При этом угол расхождения вихревых структур в ситуации струи, истекающей из плоского сопла, больше, чем в ситуации с круглым соплом. В работе [32] было установлено, что сценарии горения микроструи, кроме всего прочего, еще зависят от отношения l/h , где l – длина отверстия, а h – ширина. Так для микросопел с небольшим удлинением отверстий $l/h = 5,44$ ($l = 680$ мкм, $h = 125$ мкм), рис 24, и $l/h = 6,7$ ($l = 2000$ мкм, $h = 300$ мкм), рисунок 27, все сценарии диффузионного горения, справедливые для микроструи водорода, истекающей из сопла с круглым сечением с диаметрами $d = 250 - 500$ мкм.

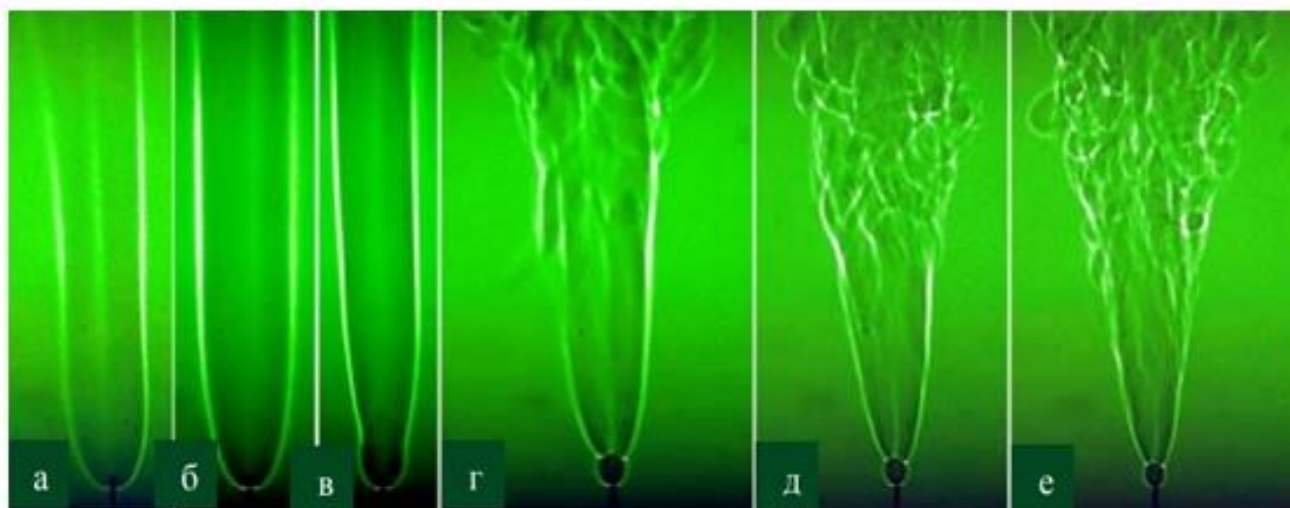


Рис. 27. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи (м/с): а - 118; б - 235; в - 353; г - 470; д - 588; е – 706 [32]

При этом для микросопел с большим удлинением отверстия $l/h = 30$ (длина сопла $l = 3\ 000$ мкм, ширина $h = 100$ мкм), характерного для круглых микросопел сценария с ламинарным пламенем сферической формы, заканчивающимся перетяжкой и турбулентным пламенем далее вверх по течению не наблюдалось, вне зависимости от скорости истечения струи, теневые картины процесса диффузионного горения представлены на рисунке 28.

Оторвать во всех этих случаях факел от среза сопла (не применяя поджигание вдали от среза сопла) не удавалось. На рисунке 29 из [32] представлены сценарии горения для микроструи водорода, истекающей из плоского микросопла со следующими параметрами: длина отверстия сопла $l = 2,45$ мм, ширина $h = 0,37$ мм. По площади выходного отверстия это плоское микросопло близко к круглому микросоплу с $d = 1,2$ мм (S плоского = $0,9$ мм, S круглого = $1,1$ мм) и в нем также при увеличении скорости истечения струи реализуется сценарий с приподнятым факелом. Также стоит отметить, что при воспламенении такой плоской микроструи на расстоянии от среза микросопла при высоких расходах водорода течение переходило в сверхзвуковой режим, о чем свидетельствует наличие скачков уплотнений в течении невоспламененной микроструи непосредственно на выходе из плоского сопла, рисунок 30.

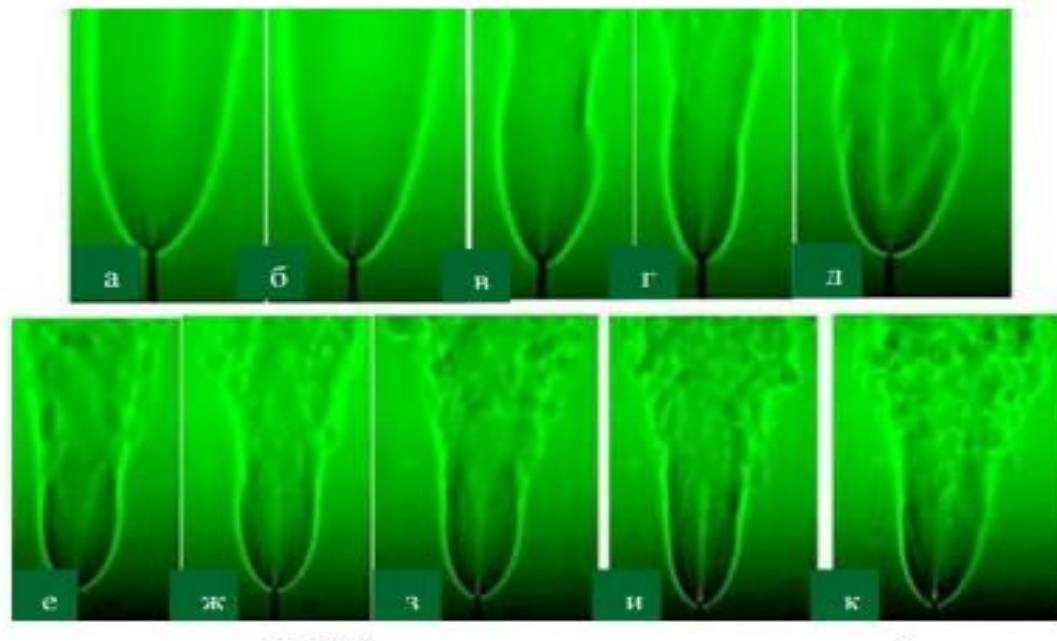


Рис. 28. Теневые картины диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от скорости истечения струи: а - 133; б - 150; в - 166; г - 183; д - 200; е - 233; ж - 266; з - 300; и - 333; к - 367; размер выходного сопла $l = 3\ 000$ мкм, $h = 100$ мкм, присоединенная пламя, вид с узкой стороны сопла [32]



Рис. 29. Фотографии пламени при диффузионном горении микроструи водорода, истекающей из плоского ($l = 2,45$ мм, $h = 0,37$ мм) микросопла в ситуации нарастания скорости ее истечения: а-г - значение U_0 от 40 до 1340 м/с, вид с узкой (h) стороны микросопла [32]

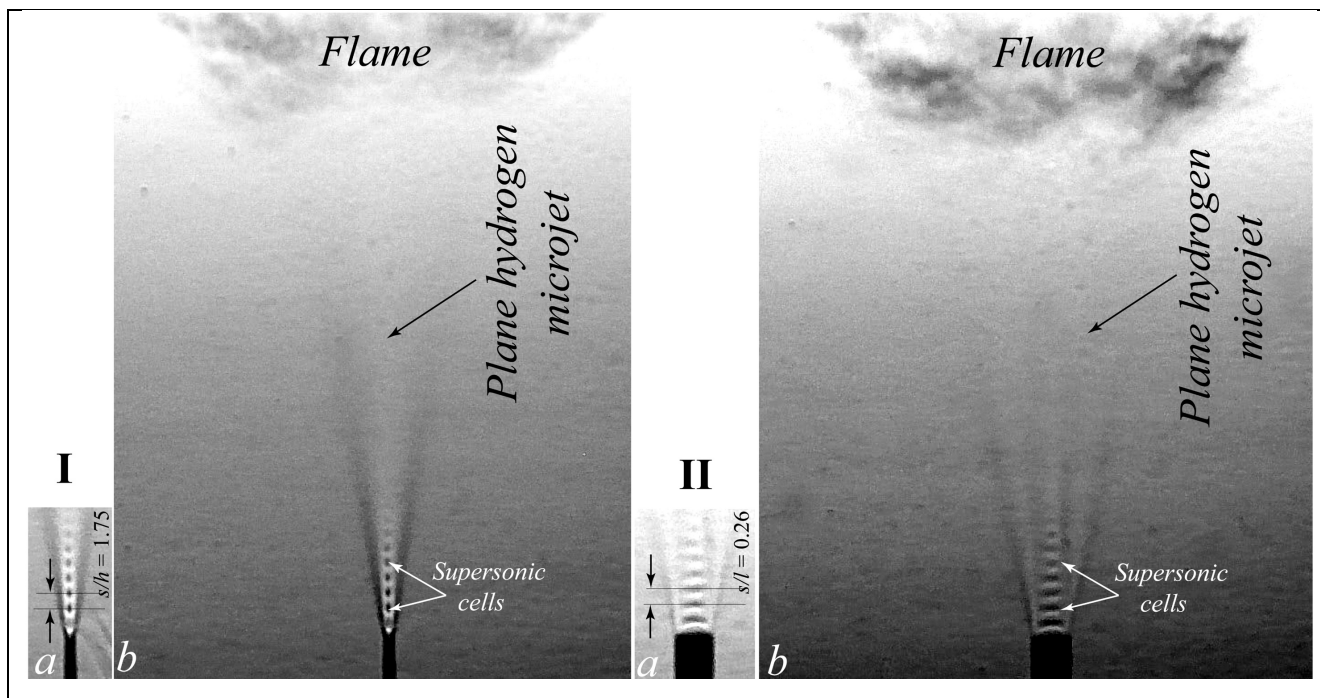


Рис. 30. Теневые изображения диффузионного горения плоской водородной микроструи при $U_0 = 1484$ м/с, видимые с узкой (I) и широкой (II) сторон микроструи: *a* – без горения, *b* – с горением [32]

Основное отличие, в сравнении с горением струи, истекающей из круглого микросопла, заключается в протяженности турбулентного участка пламени, так как в случае плоского сопла он значительно короче.

Глава II: Диффузионное горение одиночной микроструи водорода

В главе представлены результаты экспериментальных исследований сценариев диффузионного горения одиночной микроструи водорода, истекающей из тонкостенного микросопла с диаметром $d = 200$ мкм при воспламенении вблизи и на расстоянии от среза сопла. Необходимость проведения экспериментов с одиночной микроструей обусловлена необходимостью дальнейших исследований взаимодействующих микроструй, истекающих из сопел с таким же внутренними диаметрами. Несмотря на то, что сценарии диффузионного горения одиночной микроструи изучены подробно в работах [25 – 28] перед проведением экспериментальных исследований диффузионного горения микроструи водорода при взаимодействии с как с соосным потоком воздуха, так и другой микроструей водорода, необходимо было удостовериться в объективности полученных ранее данных, а именно проверить наличие описанных в предыдущих работах сценариев диффузионного горения водорода, связанных с наличием двузонной структуры пламени при воспламенении вблизи среза сопла, реализация отошедшего от среза сопла факела при истечении микроструи водорода с достаточно высокой скоростью и воспламенении на расстоянии от среза сопла, определить диапазоны существования сценариев в зависимости от безразмерных чисел Рейнольдса, рассчитанных по диаметру Re_d , а также провести сравнение с ранее проведенными экспериментами.

2.1 Экспериментальная установка и методы измерения

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 31. Сопло представляет собой тонкостенную металлическую трубку с внутренним диаметром 200 мкм, удлинение канала 20 мм. Из баллона (1) газ попадет в сопло (4) через клапан регулятора массового расхода газа (1179B MKS Instruments) (2), который обеспечивает точность измерений в пределах 0,7 %. Управление объемным

расходом газов осуществлялось при помощи блока управления (PR 4000B-F MKS Instruments) (3). Поджигание микроструи производилось как вблизи среза микросопла, так и на расстоянии от него – для реализации режима горения с факелом, оторванным от среза сопла. Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451 (5), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (6).

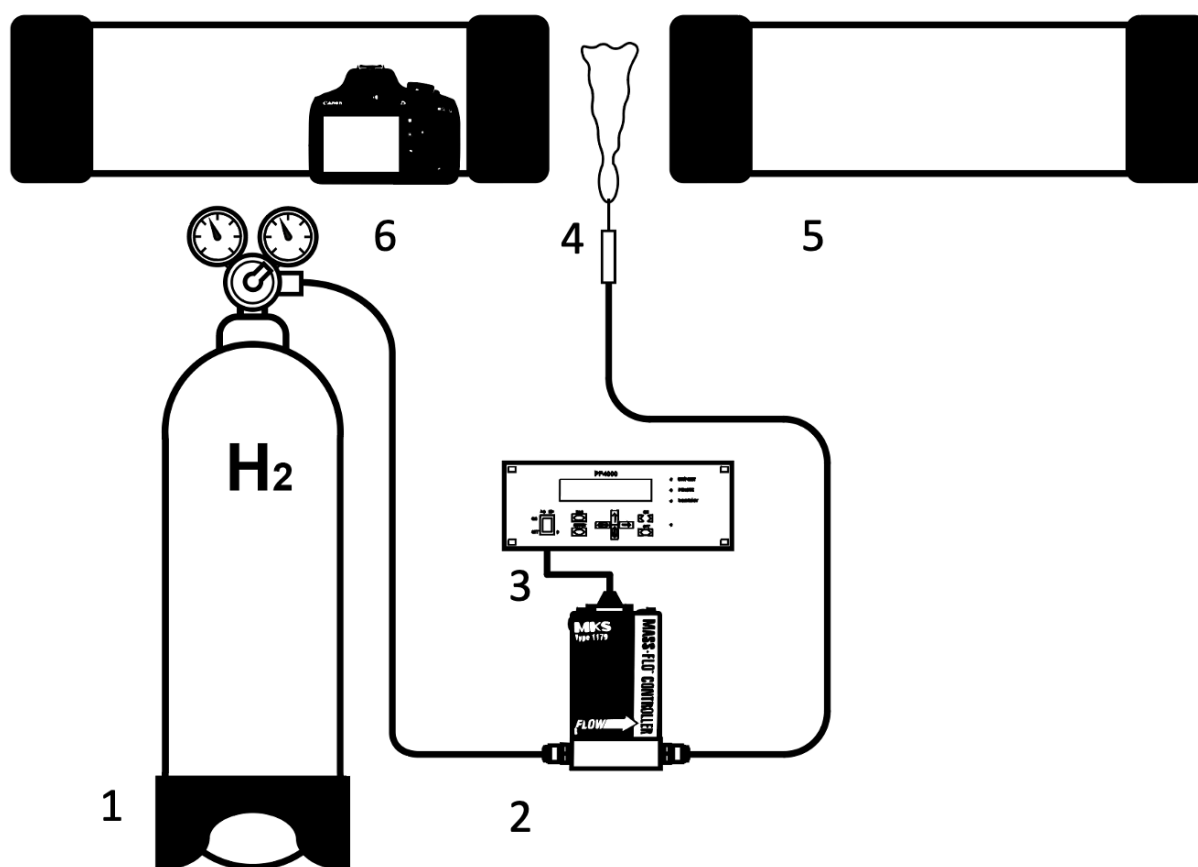


Рис. 31. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом 2 – клапан расходомера (1179В MKS Instruments), 3 – контроллер расходомера (PR 4000В-F MKS Instruments), 4 – сопло, 5 – теневой прибор ИАБ-451, 6 – фотоаппарат

2.2 Результаты экспериментов воспламенение микроструи вблизи среза сопла

На рисунке 32 показаны результаты теневой визуализации картины процесса диффузионного горения микроструи водорода в диапазоне расходов $Q = 29,7\text{--}37,3$ $\text{см}^3/\text{с}$.

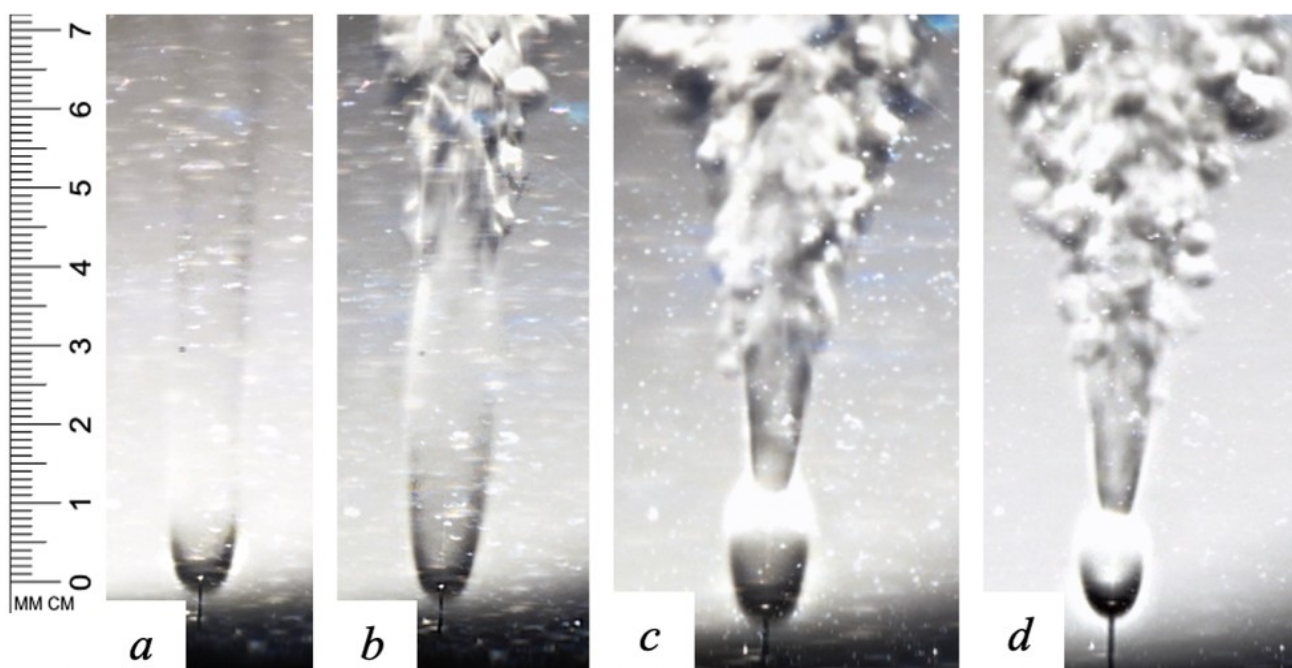


Рис. 32. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 305 м/с; б) 913 м/с; с) 1 066 м/с; d) 1188 м/с

Вплоть до среднерасходной скорости истечения микроструи $U \approx 650$ м/с наблюдается ламинарный режим горения с протяженным ламинарным факелом с небольшим углом раскрытия. О ламинарном характере течения свидетельствует отсутствие вихревых структур на теневой визуализации. При скорости $U = 913$ м/с турбулизация пламени начинается сверху и постепенно спускается ближе к срезу сопла. При скорости $U = 1066$ м/с формируется перетяжка, отделяющая ламинарный участок от турбулентного. Факел приобретает двузонную структуру.

Первый участок пламени вблизи среза сопла приобретает характерную сферическую форму. Ламинарный режим смешения водорода с воздухом в зоне вблизи среза сопла обуславливает ее сферическую форму. Во втором участке факела происходит интенсивная турбулизация потока и активное перемешивание водорода с воздухом. Второй участок факел приобретает конусообразную форму. При этом обнаружено, что дальнейшее увеличение среднерасходной скорости истечения водорода приводит к уменьшению пространственных размеров сферического участка пламени, как видно из рисунка 33.

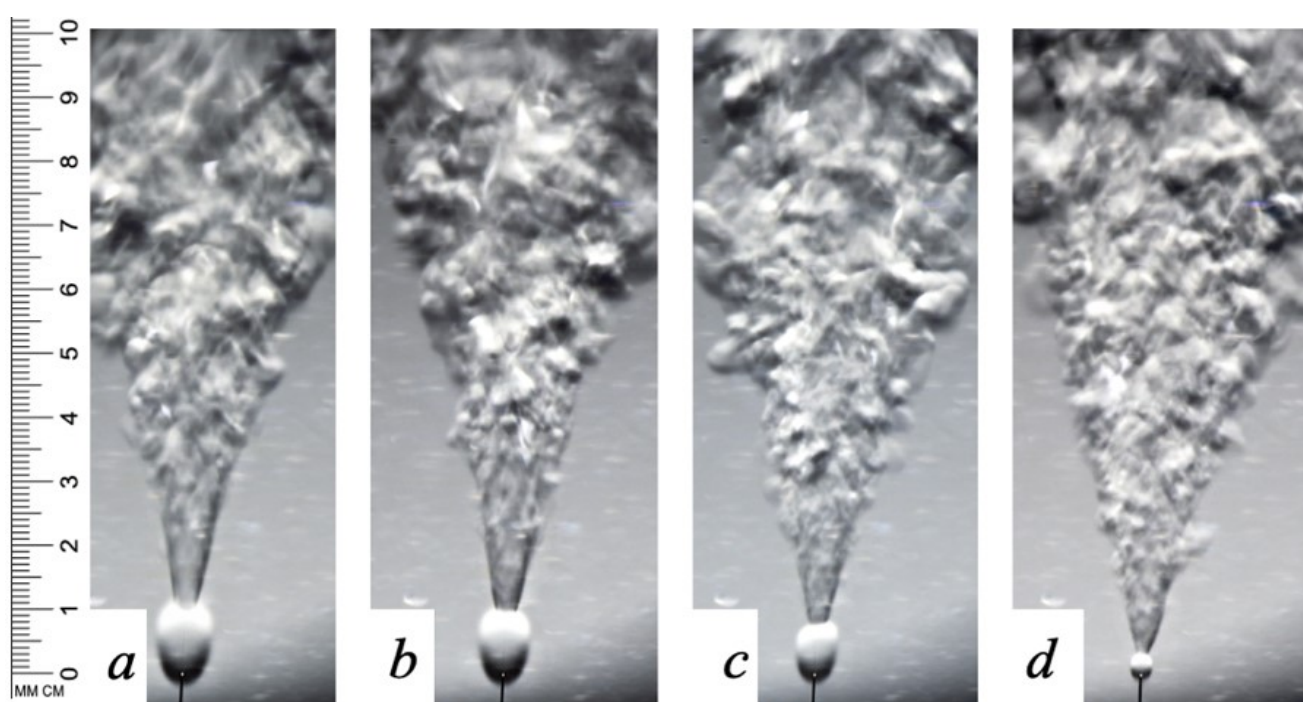


Рис. 33. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 1248 м/с; б) 1370 м/с; в) 1706 м/с; д) 2010 м/с

При увеличении скорости истечения от $U = 1066$ м/с до 2010 м/с протяженность ламинарного участка пламени уменьшается в пять раз.

Дальнейшее увеличение расхода или скорости истечения водорода приводит к срыву турбулентного участка пламени. На рис. 34а показан режим, когда горение

существует только вблизи среза сопла и имеет сферическую форму ($U = 2132$ м/с), далее по потоку происходит выброс невоспламененного водорода. Если продолжить увеличивать скорость истечения микроструи, то произойдет срыв факела и из области вблизи среза сопла. Двухзонная структура пламени обеспечивает стабилизацию процесса горения в широком диапазоне скоростей истечения водорода. При уменьшении расхода или в пересчете на среднерасходную скорость от $U = 2132$ м/с до $U = 2040$ м/с происходит восстановление процесса горения в турбулентной области. Сначала при скорости истечения $U = 2040$ м/с происходят проскоки пламени и горение в турбулентной области не стабильно, но при дальнейшем снижении скорости до $U = 1980$ м/с горение полностью восстанавливается и стабилизируется.

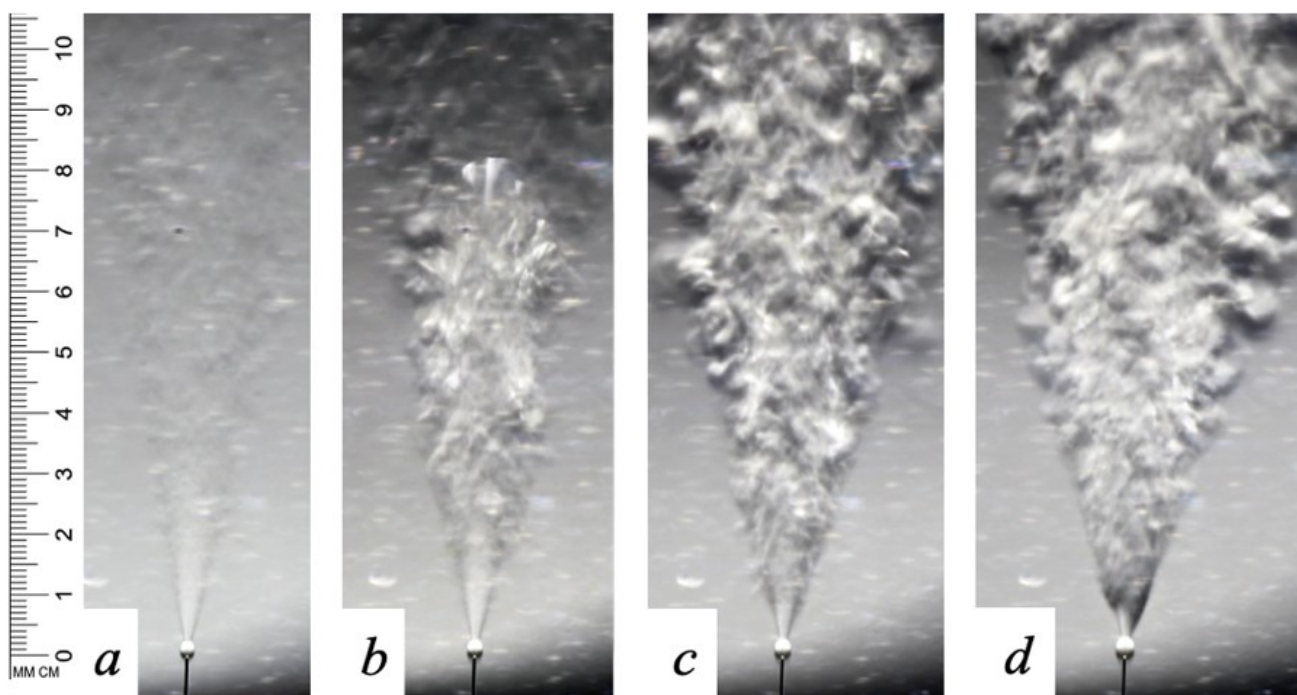


Рис. 34. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 2132 м/с; б) 2040 м/с; в) 2040 м/с; г) 1980 м/с

При воспламенении водорода вблизи среза сопла факел охватывает срез сопла и нагревает его, о чем свидетельствуют результаты теневой визуализации, а

также результаты прямого наблюдения (отчётливо наблюдается свечение верхней части среза сопла при нагреве). Из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что сферическая часть факела, охватывающая срез сопла, является стабилизатором процесса горения. Так если при определенной скорости истечения водорода произошел срыв факела в турбулентной области, но поддерживается горение вблизи среза сопла, то уменьшение скорости истечения водорода позволяет восстановить его.

2.3 Результаты экспериментов при воспламенении на расстоянии от среза сопла

Как уже было сказано во введении факел охватывающий срез сопла приводит к возникновению эффекта “запирания” сопла и скорость истечения водорода по всей видимости при воспламенении микроструи вблизи среза сопла скорость истечения водорода остается в дозвуковой области. Преодолеть этот эффект получится, если при достаточной скорости истечения на расстоянии от среза сопла. В данном случае под достаточной скоростью понимается не нулевая скорость истечения микроструи при которой воспламенение микроструи не приводит к распространению пламени в сторону среза сопла и его охвату, а наоборот факел стабилизируется на некотором расстоянии от среза сопла.

На рисунке 35 показаны теневые картины диффузионного горения при воспламенении водорода на расстоянии от среза сопла с реализацией режимов горения с факелом, приподнятым над срезом сопла.

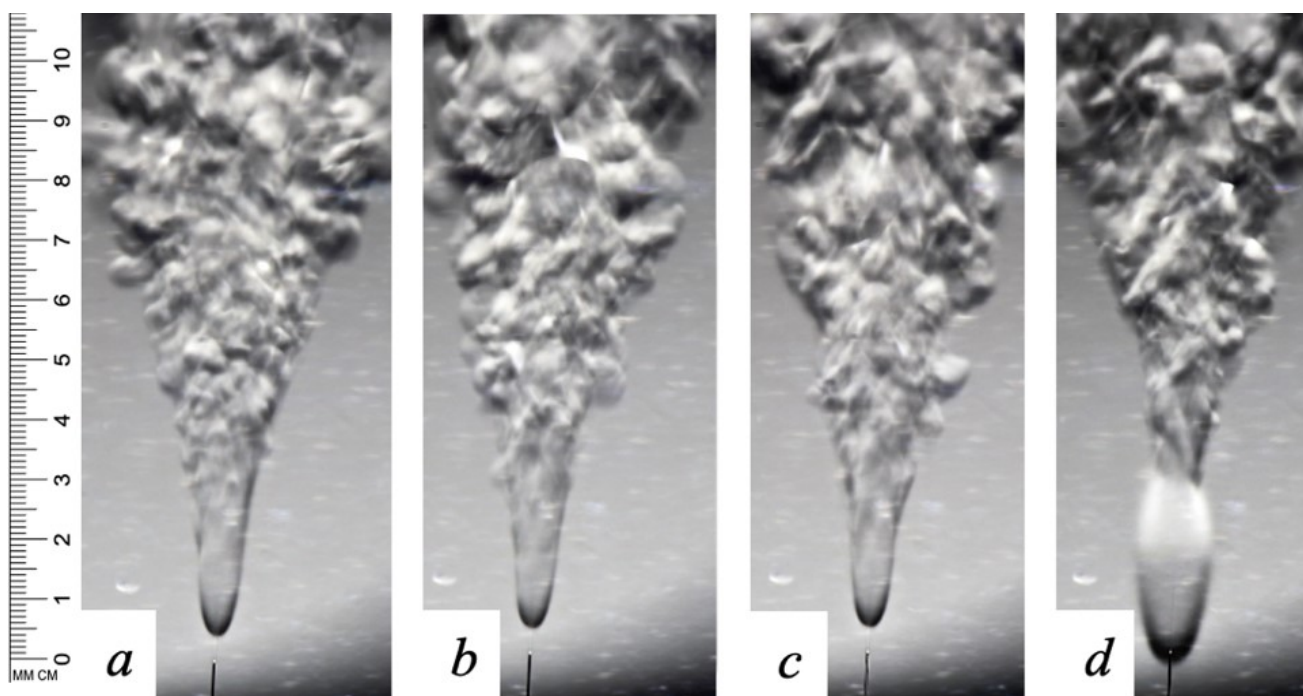


Рис. 35. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 1188 м/с; б) 1096 м/с; в) 1035 м/с; д) 944 м/с

В таком случае не наблюдается двузонной структуры в топологии пламени и весь факел турбулентный. Такой режим существует в диапазоне скоростей от $U = 944$ м/с до $U = 1188$ м/с при воспламенении микроструи на расстоянии от среза микросопла. Дальнейшее уменьшение расхода или скорости истечения микроструи водорода приводит к тому, что факел становится присоединенным, а увеличение расхода или скорости приводит к срыву факела.

Если после того, как факел присоединился увеличить скорость истечения то, развитие сценариев диффузионного горения пройдет аналогично тому, как если бы воспламенение микроструи производилось вблизи среза сопла, то есть сформируется двузонная структура факела и увеличение скорости повлечет уменьшение пространственных размеров сферического участка пламени близи реза сопла. Таким образом существует гистерезис зависимости скорости истечения микроструи и наличия/отсутствия двузонной структуры, сферической области пламени вблизи среза сопла в зависимости от способа воспламенения микроструи вблизи или на расстоянии от среза микросопла.

2.4 Обсуждение результатов

При исследовании диффузионного горения высокоскоростной микроструи водорода, выходящей в затопленное воздушное пространство, выявлено, что структура пламени двузонная. Горение в этих последовательных зонах может протекать независимо друг от друга, что согласуется с результатами предшествующих исследований [25 - 28]. Однако для микроструи с $d = 200$ мкм отсутствует сценарий, при котором бы происходило горение в области вблизи среза сопла, затем следовал бы не воспламененный промежуток, а после него турбулентный факел, отделенный от зоны пламени вблизи среза сопла. Таким образом количество обнаруженных различных сценариев диффузионного горения в данном случае меньше. Существование первой зоны, представляющей собой присоединенное ламинарное диффузионное пламя, играет ключевую роль в стабилизации горения, даже при высоких скоростях истечения потока водорода, вплоть до звуковых скоростей.

Обобщая новые данные для микроструи истекающих из сопла с $d = 200$ с ранее полученными для струй, истекающих из сопел с диаметрами $d = 500$ мкм из работы [27], можно связать сценарии диффузионного горения микроструи водорода с безразмерными числами Рейнольдса, рассчитанными по диаметру микросопла:

$$Re_d = \frac{\rho u d}{\mu}$$

В таблице выделены основные сценарии диффузионного горения для микросопел с диаметрами $d = 200$ из текущего исследования и взяты диапазоны сценариев из работы [27] для микроструи истекающей из сопла с $d = 500$ мкм.

Из таблицы 2 видно, что существующие сценарии диффузионного горения для микроструй диаметром 200 – 500 мкм реализуются при схожих безразмерных числах Рейнольдса, однако все сценарии реализуются при меньших числах Рейнольдса в случае меньшего диаметра микросопла.

Таблица 2

Описание сценария	d , мкм	Re_d
1) Ламинарное горение	200	До 1330
	500	До 1700
2) Двухзонная структура пламени	200	1330 – 4103
	500	1700 – 4600
3) Срыв пламени на турбулентном участке при сохранении горения на ламинарном участке	200	4165 – 4351
	500	4220 – 4600
4) Горение с факелом, приподнятым над срезом сопла	200	2112 – 2425
	500	1950 – 2342
5) Прекращение горения микроструи	200	4353
	500	4860

На рисунке 36 показано, как происходит переход между сценариями диффузионного горения при изменении скорости истечения микроструи. По оси абсцисс отложена среднерасходная скорость истечения микроструи. По оси ординат справа отложена длина ламинарного участка пламени – протяженность участка пламени охватывающего срез сопла (в случае, когда воспламенение происходит вблизи среза сопла). По оси ординат слева отложена величина отрыва пламени – расстояние от среза сопла до факела (в случае, когда воспламенение происходит на расстоянии от среза сопла).

Сценарии диффузионного горения микроструи водорода в зависимости от скорости истечения

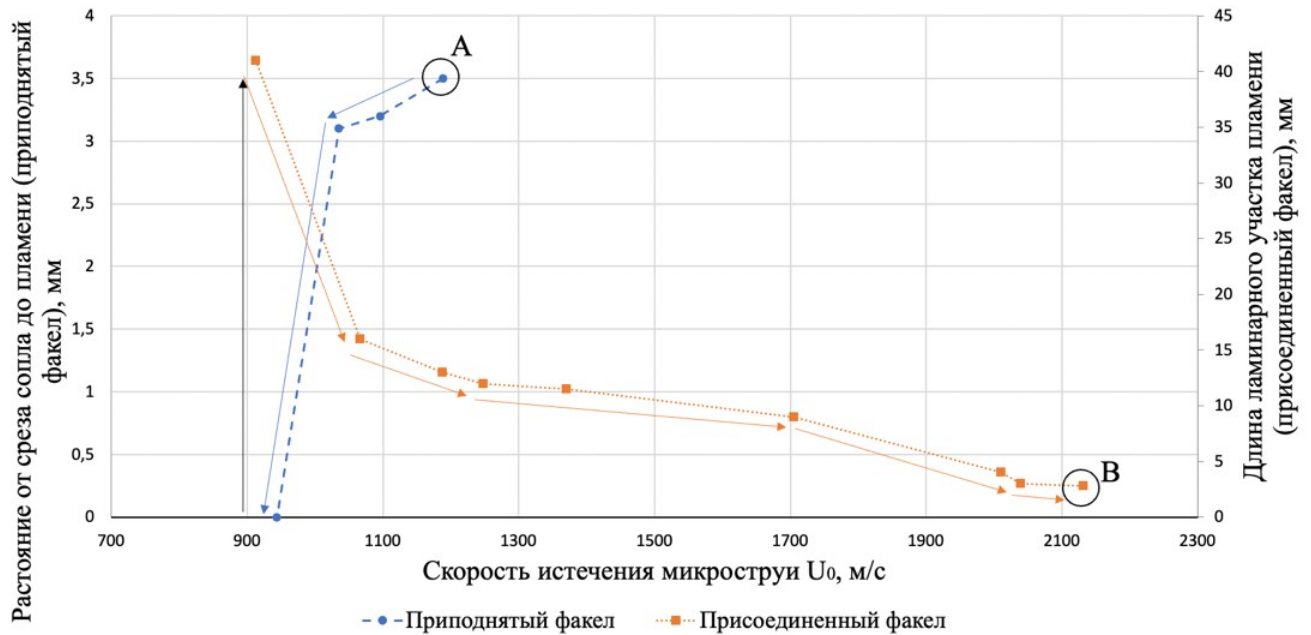


Рис. 36. Процесс перехода от одного сценария горения к другому. Стрелками указана последовательность смены сценариев при изменении скорости истечения

В начальной точке **A** наиболее высокая скорость, при которой поддерживается горение с факелом, оторванным от среза сопла. Далее она постепенно уменьшается (на графике отображено изменение расстояние от среза сопла до факела), и при скорости около 950 м/с факел становится присоединенным, после этого скорость истечения увеличивается (на графике отображено изменение протяженности ламинарного участка пламени). В точке **B** наиболее высокая скорость, при которой поддерживается горение в ламинарном участке пламени.

Диапазон скоростей, при которых существует горение с приподнятым над срезом сопла пламенем существенно уже, чем диапазон скоростей, при которых существует горение с присоединенным пламенем.

Гистерезис зависимости процесса развития пламени круглой микроструи водорода в зависимости от скорости ее истечения и способа воспламенения (вблизи

или на расстоянии от среза сопла), диапазон скорости исчезновения перетяжки пламени и начало отрыва пламени, и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления перетяжки пламени также обсуждались в работе [28], однако там использовалось сопло большего диаметра, поэтому сценарии развития диффузионного горения в области высоких расходов несколько отличаются, поскольку в том случае удастся реализовать режим горения с факелом отошедшим от среза сопла не прибегая к воспламенению микроструи на расстоянии от среза сопла. Тем не менее динамика уменьшения ламинарного участка пламени с ростом скорости струи и в целом гистерезисный цикл в проведенном исследовании и в [28] схожи.

Динамика уменьшения протяженности ламинарного участка пламени согласуется с ранее полученными данными в [26, 27] в ситуации воспламенения микроструи вблизи среза сопла. Как видно из рисунка 37 кривые зависимости $l/d = f(U)$ выглядят аналогично, показанным на рисунке 15, но находится в области больших скоростей истечения микроструи.

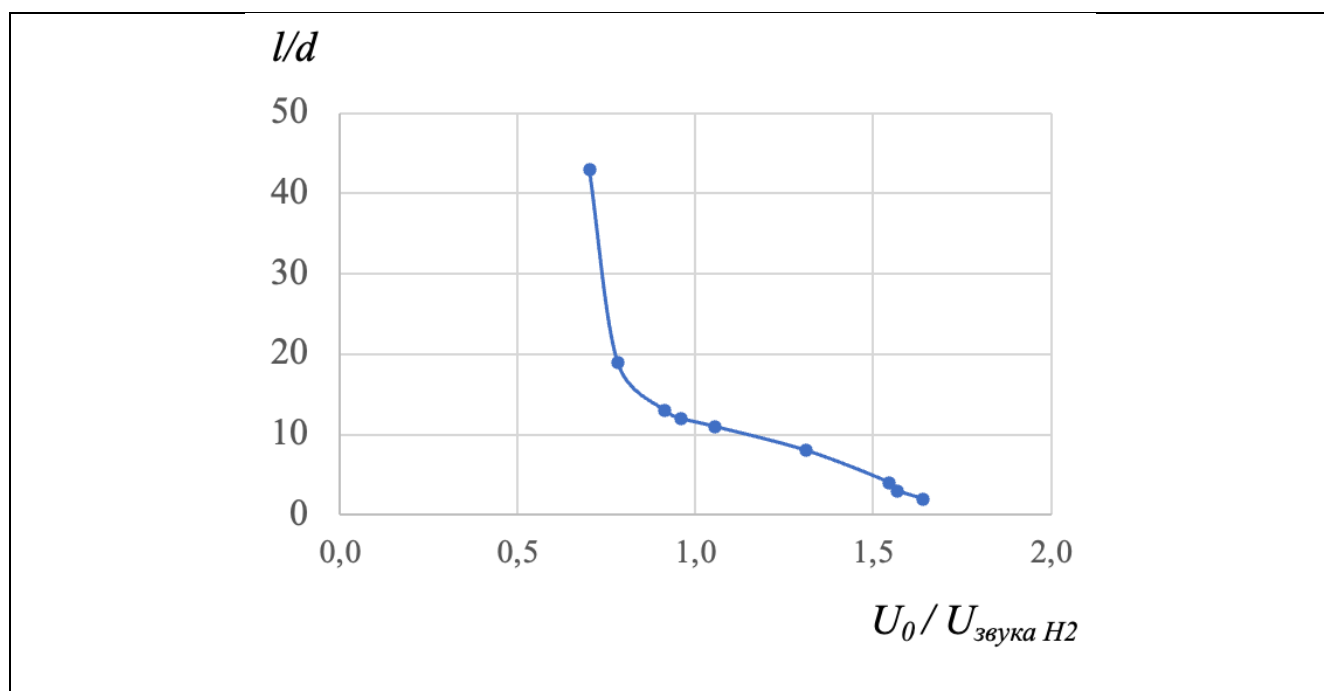


Рис. 37. Зависимость протяженности ламинарного участка пламени от скорости истечения

2.5 Выводы

Проведены исследования диффузионного горения микроструи водорода истекающей из тонкостенного цилиндрического сопла с внутренним диаметром $d = 200$ мкм при воспламенении микроструи вблизи и на расстоянии от среза микросопла, по результатам выполненной работы сформулированы следующие выводы:

1. Представлены основные сценарии диффузионного горения круглых микроструй водорода при поджигании вблизи и на расстоянии от среза сопла для металлического цилиндрического сопла диаметром 200 мкм. Получены экспериментальные данные, показывающие диапазоны существования основных сценариев диффузионного горения водорода, полученные данные сравнивались с ранее полученными, результаты выражены в безразмерных параметрах (через числа Рейнольдса).
2. Установлено, что стабилизация пламени при истечении круглой микроструи водорода связана с нагревом сопла сферической областью пламени, охватывающей его срез. Двухзонная структура пламени, существующая в широком диапазоне скоростей истечения водорода, обеспечивает устойчивость горения, так как в случае срыва турбулентного пламени при высоких скоростях истечения водорода возможно его повторное воспламенение от более устойчивого ламинарного участка участка факела присоединенного к срезу сопла.
3. Установлено, что режим диффузионного горения с факелом, стабилизированным на расстоянии от среза сопла, удастся реализовать при воспламенении на расстоянии от среза микросопла, при этом такой режим горения менее стабилен и существует в более узком диапазоне скоростей истечения водорода.
4. Показан гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструй водорода в зависимости от места воспламенения микроструи (вблизи или вдали

от среза сопла) и от изменения скорости истечения (роста или уменьшения) водорода.

5. График зависимости протяженности ламинарной зоны пламени вблизи среза сопла показывает монотонное уменьшение протяженности с увеличением скорости истечения водорода, что согласуется с данными работ [26, 27].

Глава III. Исследование диффузионного горения микроструи водорода в спутной струе воздуха

В текущей главе представлены результаты экспериментального исследования диффузионного горения микроструи водорода при взаимодействии с потоком воздуха, истекающим из соосно расположенного кольцевого сопла. Такая конфигурация соплового аппарата должна дополнительно обеспечивать устойчивую зону смешения горючего с окислителем и дополнительно стабилизировать процесс горения, что может быть использовано при создании различного вида горелочных устройств в том числе работающих при воздействии инертных сред, не поддерживающих горение.

3.1 Экспериментальная установка

В экспериментах используется сопловой аппарат, который обеспечивает независимую подачу газов через цилиндрическое микросопло и через соосно расположенное щелевое сопло. Схема соплового устройства в разрезе показана на рисунке 38. $S_1 = 0,5 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения выходного отверстия для воздуха, $S_2 = 2 \text{ мм}^2$ – площадь коаксиального канала соплового аппарата, из которого подается водород.

Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рисунке 39. Из баллонов воздух (1) и водород (2) через аналогично устроенные трассы попадают на клапаны регуляторов массового расхода газа (4) и (5) (1179В MKS Instruments), которые обеспечивают точность измерений в пределах 0,7 % и далее в сопловое устройство (6).

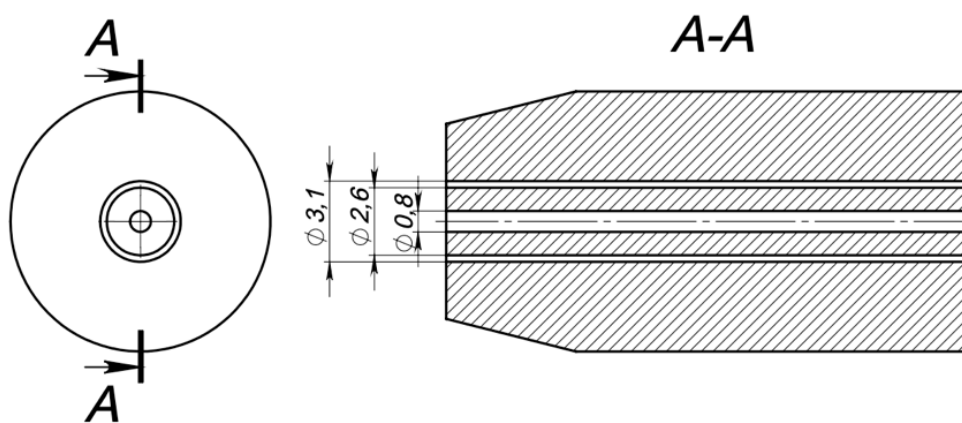


Рис. 38. Чертеж соплового устройства в разрезе

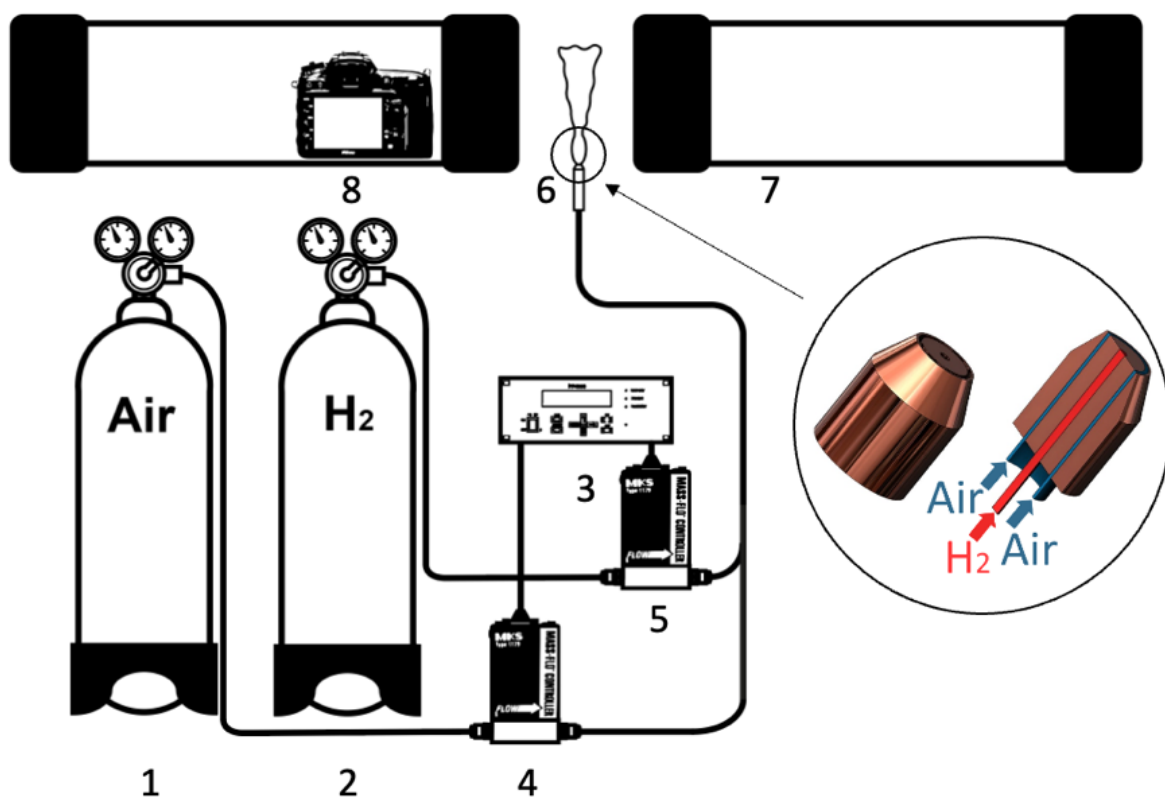


Рис. 39. 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – баллон со сжатым воздухом, 3 – контроллер расходомера, 4, 5 – клапаны расходомера, 6 – сопловое устройство, 7 – теневой прибор ИАБ – 451, 8 – цифровая камера

Управление объемными расходами газов осуществлялось при помощи блока управления (PR 4000B-F MKS Instruments) (3). Поджигание микроструи производилось как вблизи среза сопла, так и на расстоянии от него – для реализации режима горения с факелом, оторванным от среза сопла. Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451 (7), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (8).

3.2 Результаты экспериментального исследования диффузионного горения микроструи водорода окруженной потоком воздуха при воспламенении вблизи среза сопла

На рисунке 40 показаны результаты теневой визуализации горения круглой микроструи водорода при отсутствии спутной струи воздуха. Такая постановка повторяет постановку эксперимента, описанную в предыдущей главе: истечение одиночной микроструи водорода в затопленное воздушное пространство, однако в данном случае диаметр микросопла больше в 4 раза.

Можно наблюдать основные сценарии, обнаруженные ранее при диффузионном горении одиночной микроструи водорода диаметром 200 мкм среди которых ламинарный факел при небольшой скорости истечения, формирование перетяжки пламени и разделение факела на две зоны, однако, в данном случае возникает дополнительный сценарий при котором турбулентная зона факела отделяется от зоны вблизи среза сопла и между ними существует невоспламененный участок, как видно из рисунков 39*е*, *ж*, для данного микросопла это происходит при минимальной среднерасходной скорости истечения $U_1 = 675$ м/с, а увеличение скорости истечения микроструи водорода приводит к увеличению невоспламененного промежутка.

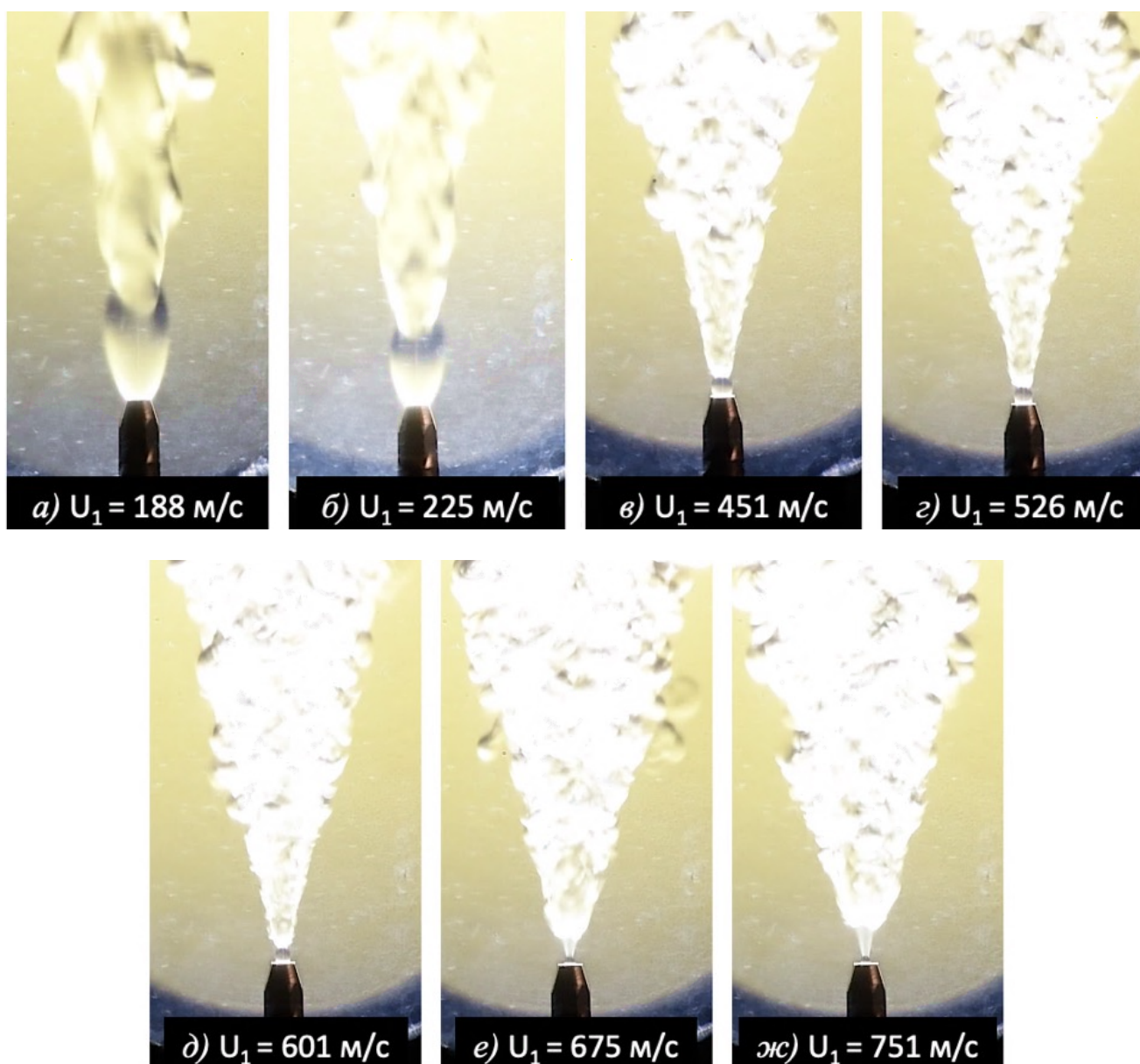


Рис. 40. Теневая визуализация процесса диффузионного горения микроструи водорода при различной скорости истечения в отсутствии спутного потока воздуха.

На рисунке 41 показаны результаты теневой визуализации при одновременном истечении водорода из микросопла и воздуха из соосно расположенного щелевого сопла, при этом корость водорода зафиксирована, а скорость истечения воздуха постепенно увеличивается.

Изначально в отсутствии спутного потока воздуха струя имеет развитую двузонную структуру факела. Возникновение спутного потока воздуха изменяет

результатирующую форму факела, он так же, как и раньше имеет двузонную структуру, однако форма факела вблизи среза сопла трансформируется из сферической в цилиндрическую, а увеличение скорости истечения потока воздуха приводит к вытягиванию этой зоны вблизи среза сопла.

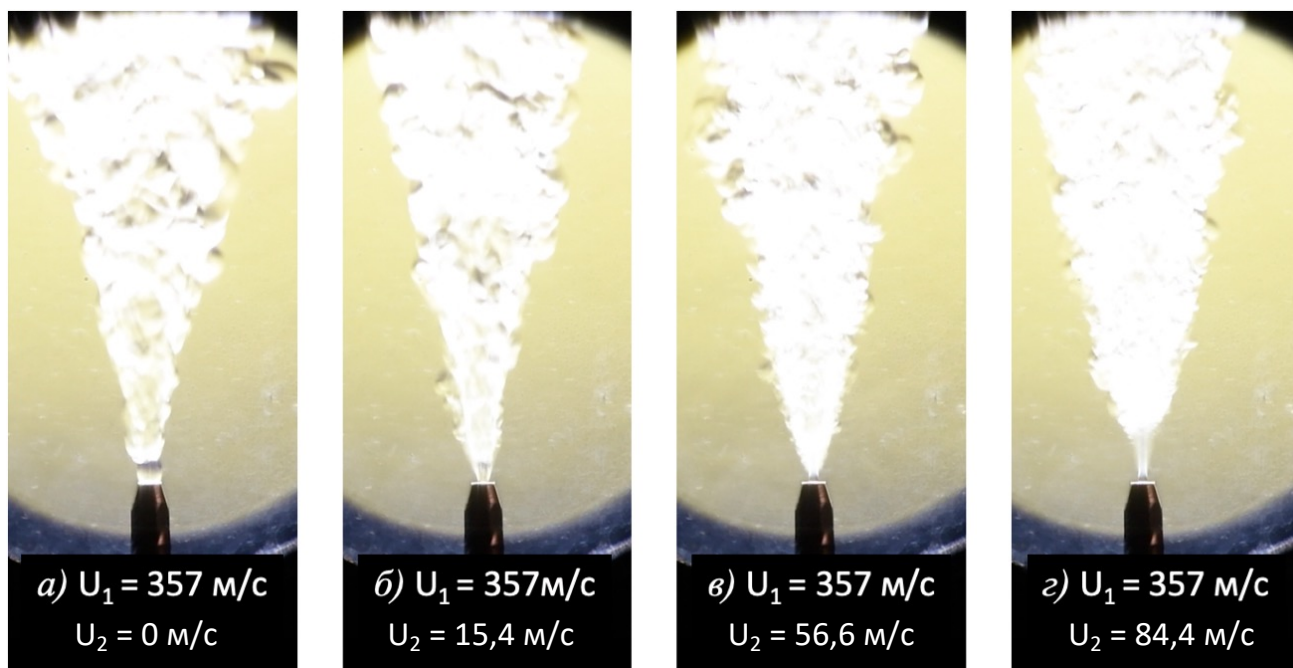


Рис. 41. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = \text{const}$) окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости истечения, срыв факела при скорости $U_2 = 85 - 86 \text{ м/с}$

На рисунке 42 также показаны результаты теневой визуализации, где отчетливо видно, как зона факела вблизи среза сопла сначала принимает форму усеченного конуса, большее основание которого развернуто в сторону турбулентного участка пламени (Рисунок 42б, с), а затем трансформируется в цилиндрическую форму (Рисунок 42д, е), также наблюдается динамика увеличения протяженности пространственных размеров зоны факела вблизи среза сопла с одновременной более активной турбулизацией течения далее вверх по потоку.

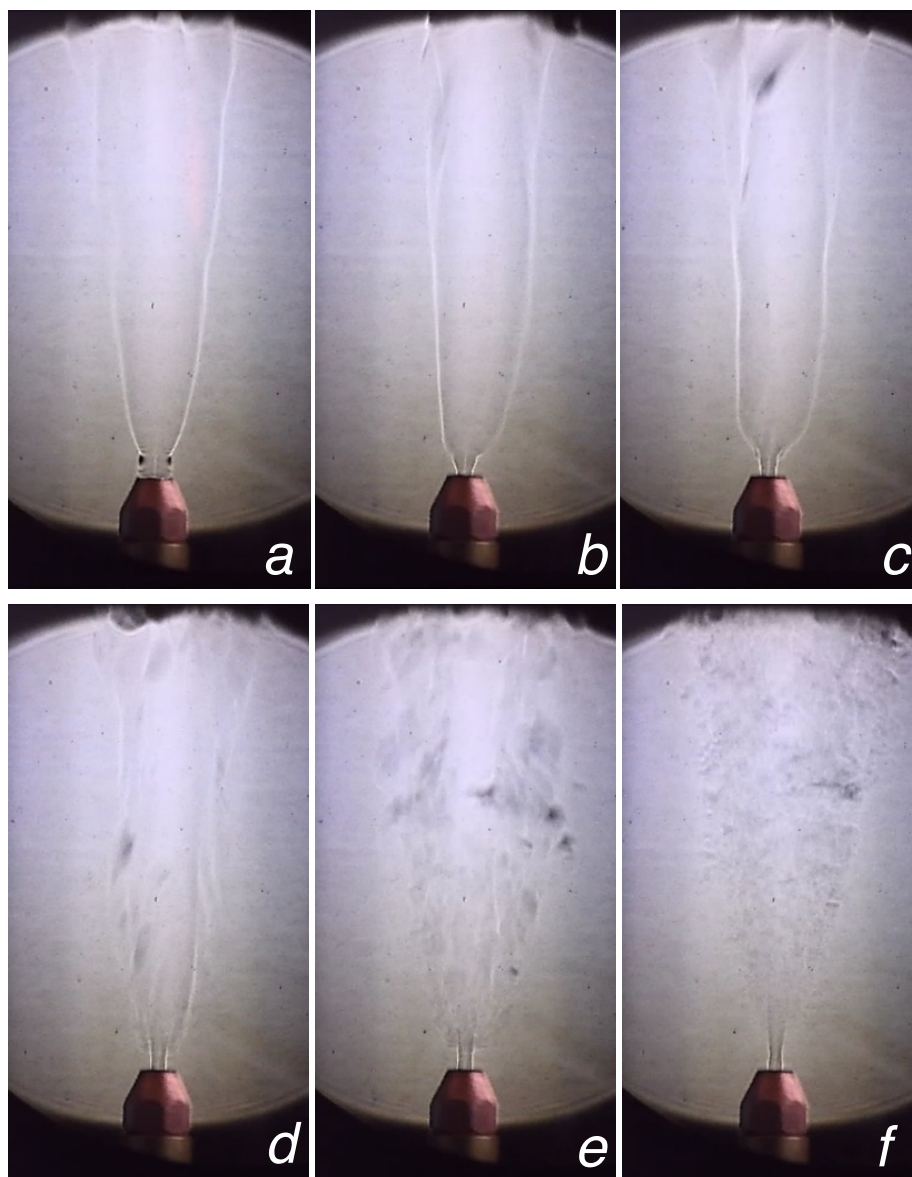


Рис. 42. Процесс эволюции ламинарного участка пламени при возникновении потока воздуха из кольцевой щели: а) горение микроструи водорода без воздуха; б)-f) поступление соосного потока воздуха

3.3 Диффузионное горение микроструи водорода в присутствии соосного потока воздуха, воспламенение на расстоянии от среза сопла

На рисунке 43 представлены результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения микроструи водорода, окруженной потоком воздуха,

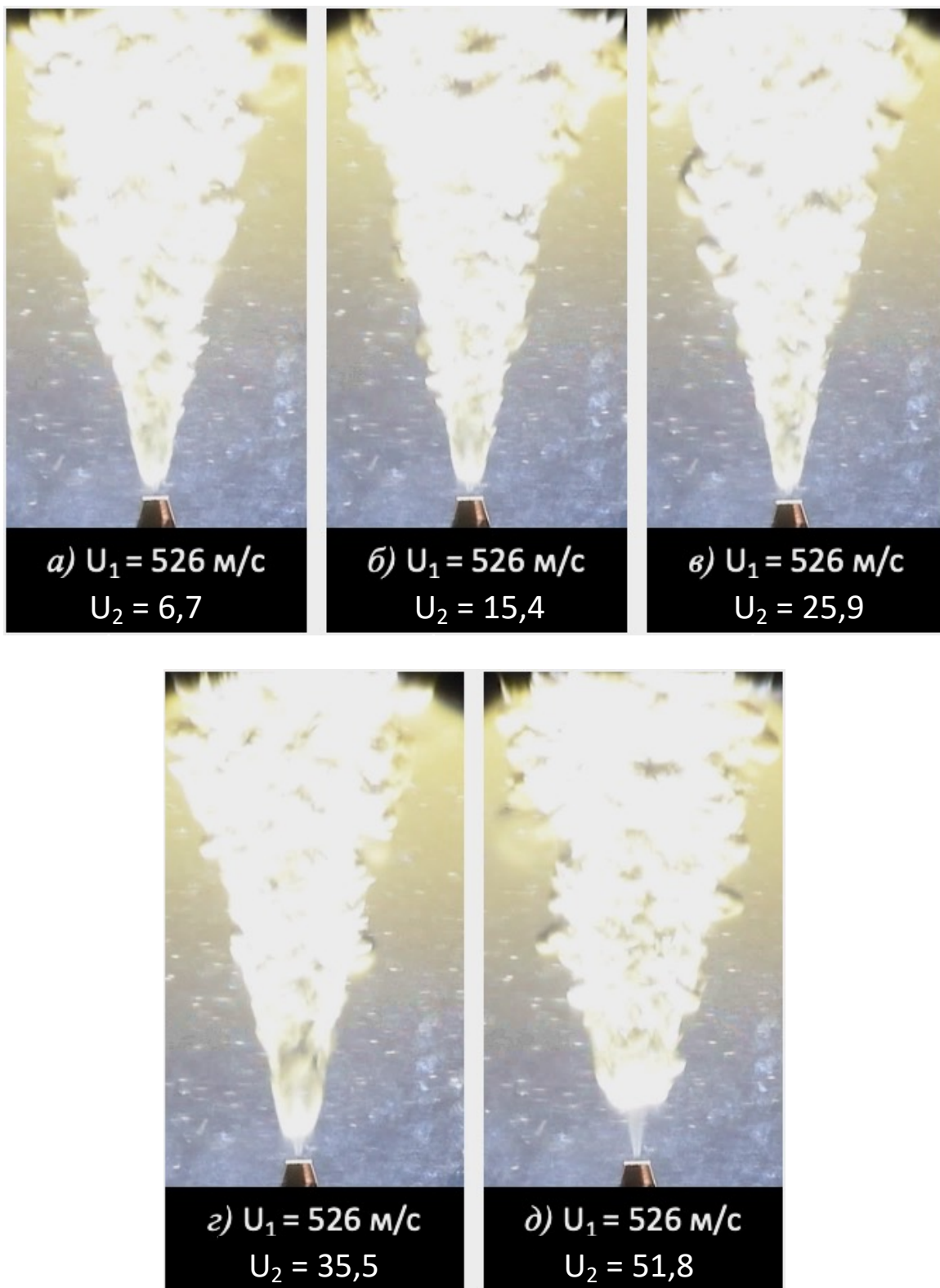


Рис. 43. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = \text{const}$) окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости, сценарии с приподнятым над срезом сопла факелом

истекающим из соосно расположенной кольцевой щели, в этом эксперименте среденерасходная скорость водорода зафиксирована, а среднерасходная скорость истечения воздуха постепенно увеличивается, а воспламенение производится на расстоянии от среза сопла.

Так же, как и в случае одиночной микроструи, истекающей в затопленное воздушное пространство, реализуется сценарий диффузионного горения с отошедшим от среза сопла факелом. В данном случае возникновение спутного потока воздуха не изменяет результирующую форму факела, но при увеличении среднерасходной скорости истечения воздуха к увеличению дистанции отрыва факела от среза сопла.

Скорость отрыва факела по водороду и по воздуху для данного в эксперименте сопла не установлена, требуется дальнейшее исследование.

3.4 Обсуждение

При диффузионном горении микроструи водорода в отсутствии спутного потока воздуха реализуются основные сценарии характерные для одиночной микроструи водорода, показанные в главе II, а также дополнительные сценарии до этого обнаруженные только для микросопел с $d = 1200$ мкм, в данном случае удается реализовать сценария с факелом отошед. В данном случае диаметр микросопла из которого происходит истечение водорода больше в 4 раза. Диапазоны существования основных сценариев для диффузионного горения одиночной микроструи из работ [27], а также из главы II в безразмерных числах Рейнольдса, рассчитанных по диаметру, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Описание сценария	d , мкм	Re_d
Ламинарное горение	200	До 1330
	500	До 1700
	800	До 1653
Двухзонная структура пламени	200	1330 – 4103
	500	1700 – 4600
	800	1653 – 4415
Факел, приподнятый над срезом сопла	200	2112 – 2425
	500	1950 – 2342
	800	3850 – 4958

Также при исследовании диффузионного горения микроструи водорода обнаружен полезный эффект. На рисунке 44 показана теневая картина процесса диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из центрального микросопла соплового аппарата и результат воздействия на нее потока водяного пара. Изначально, в отсутствии воздействия, процесс горения поддерживается, скорость истечения микроструи водорода $U_0 = 600$ м/с, при такой скорости истечения пламя имеет развитую двухзонную структуру, а протяженность ламинарной зоны пламени сферической зоны вблизи среза сопла $l/d = 3,75$. Затем возникает слабый поперечный поток водяного пара, который приводит к прекращению процесса горения и далее наблюдается свободно истекающая микроструя водорода. Можно сделать вывод, что такая струя водяного пара способна потушить данный водородный факел.

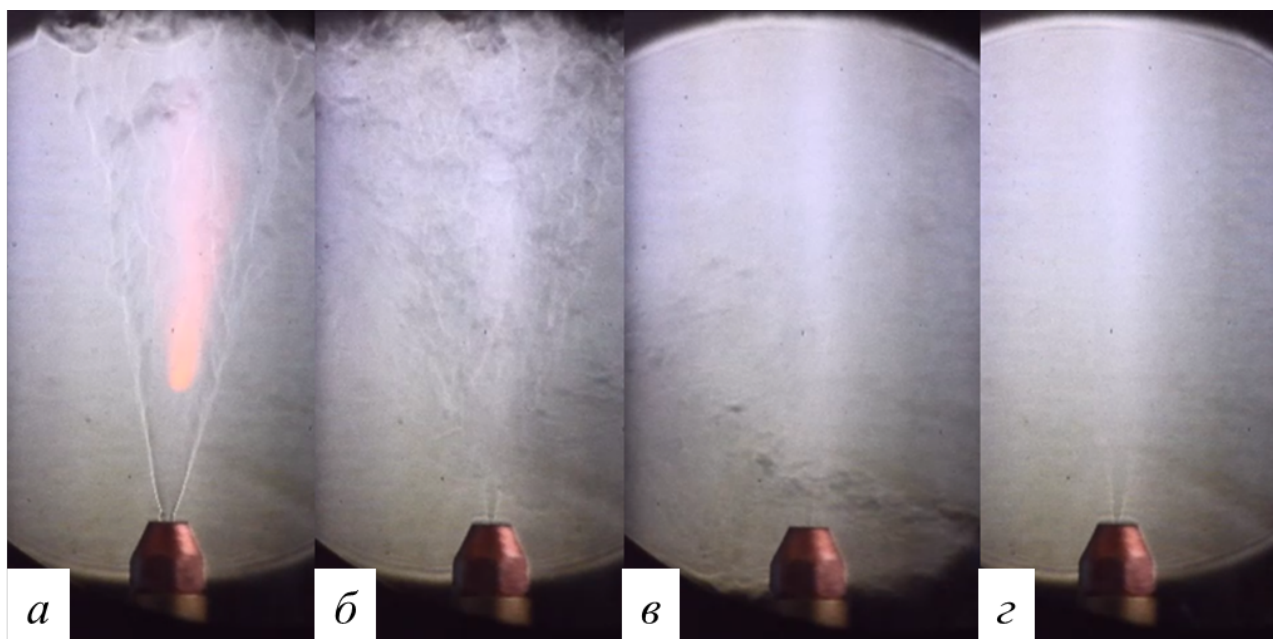


Рис. 44. Результат воздействия водяного пара на процесс диффузионного горения водорода. скорость истечения микроструи водорода $U_1 = 500$ м/с: а) диффузионное горение микроструи водорода, истекающей из микросопла; б) момент возникновения слабого поперечного потока водяного пара и затухание микроструи. в) истечение микроструи сносимой поперечным потоком водяного; г) свободное истечение микроструи в отсутствии потока водяного пара.

Теперь проведем эксперимент с аналогичным поперечным потоком водяного пара, но уже в ситуации факела, в котором микроструя водорода окружена спутным потоком воздуха, скорость истечения микроструи водорода $U_1 = 600$ м/с, а скорость истечения спутного потока воздуха $U_2 = 16$ м/с, теневые картины процесса представлены на рисунке 45. Результирующий факел имеет двузонную структуру, зона пламени вблизи среза сопла теперь имеет цилиндрическую форму. В случае, когда микроструя водорода окружена потоком воздуха гашения процесса горения не происходит. При этом поток водяного пара способен затушить турбулентную область струи, но горение из первой области вблизи среза сопла быстро распространяется на вторую область.

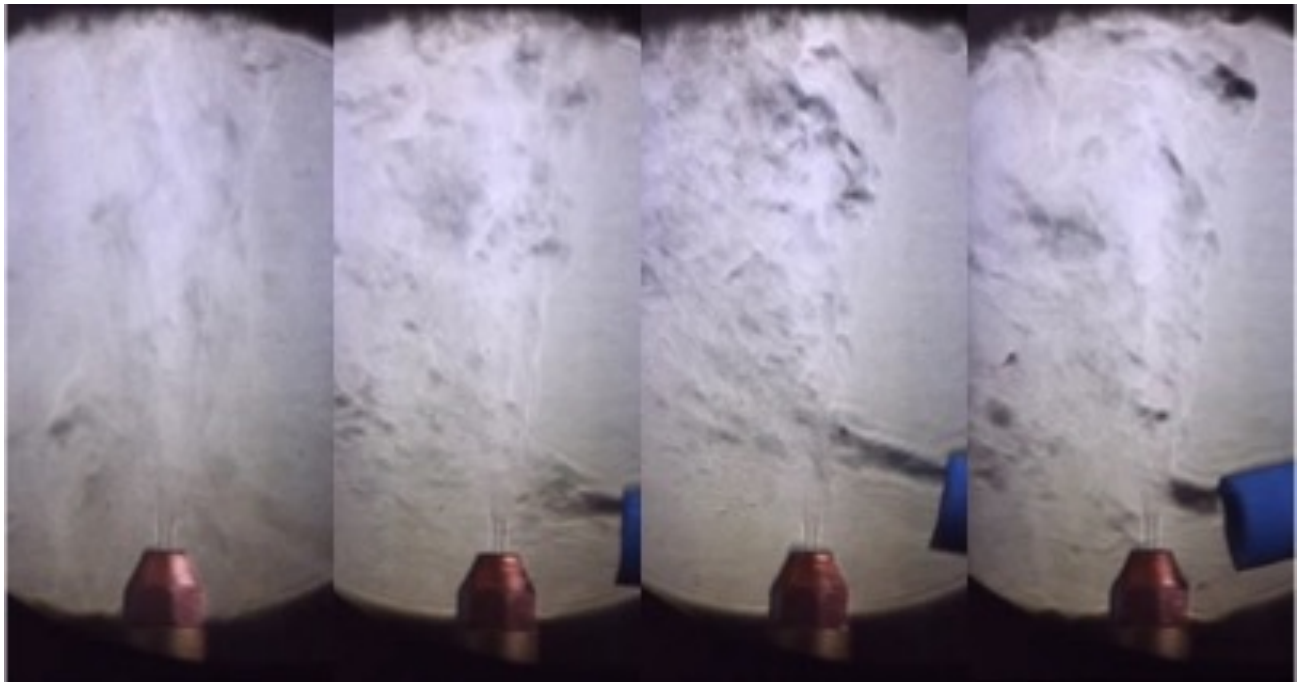


Рис. 45. Результат воздействия водяного пара на процесс диффузионного горения водорода: $U_1 = 500$ м/с, $U_2 = 30$ м/с

Таким образом, поток воздуха, истекающий из соосно расположенной кольцевой щели, позволяет организовать устойчивую зону смешения горючего с окислителем и защищает процесс горения от воздействия внешнего потока водяного пара.

3.5 Выводы

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- 1 Установлено, что для микроструи истекающей из сопла с диаметром 800 мкм характерно наличие большего количества сценариев в сравнении с одиночной микроструей с диаметром 200 мкм, а именно присутствует сценарий, при котором горение в зоне вблизи среза сопла и в турбулентной зоне разделены невоспламененным промежутком.
- 2 Сценарии диффузионного горения микроструи водорода с совместно подаваемым воздухом из соосно расположенной щели схожи со сценариями

диффузионно горения одиночной микроструи и при поджигании вблизи среза сопла связаны с формированием факела с двузонной структурой, в то время как поджигание на расстоянии от среза сопла при определенной скорости позволяет.

- 3 Результирующий факел, сформированный одиночной микроструей водорода под воздействием спутного потока воздуха изменяется. Зона факела вблизи среза сопла при увеличении скорости спутного потока воздуха последовательно трансформируется из сферы в усеченный конус, большее основание которого направлено в сторону турбулентной зоны факела, после этого трансформируется в цилиндр, протяженность которого увеличивается с увеличением скорости истечения воздуха.

Глава IV. Исследование диффузионного горения спутной струи водорода в присутствии струи воздуха

В главе представлены результаты экспериментального исследования процесса диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии потока воздуха, при этом используется сопловой аппарат из главы III и измененным способом подачи воздуха и водорода: водород подается через кольцевое сопло, а воздух через соосно расположенное цилиндрическое микросопло. Предварительные эксперименты при горении одиночной струи водорода, истекающей из кольцевого сопла и обнаружены основные сценарии. При взаимодействии струи водорода и струи воздуха обнаружено новое явление, показано как сверхзвуковой поток воздуха запирает поток водорода в области вблизи среза соплового аппарата и фронт пламени образует конусообразную форму.

4.1 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рисунке 46. Из баллонов воздух (1) и водород (2) через аналогично устроенные трассы попадают на клапаны регуляторов массового расхода газа (4) и (5) (1179В MKS Instruments), которые обеспечивают точность измерений в пределах 0,7 % и далее в сопловое устройство (6). Управление объемными расходами газов осуществлялось при помощи блока управления (PR 4000В-F MKS Instruments) (3). Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451 (7), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (8). Поджигание микроструи производилось вблизи среза сопла. Процесс диффузионного горения также визуализировался с помощью тепловизора тепловизора СЕМ DT-9897Н.

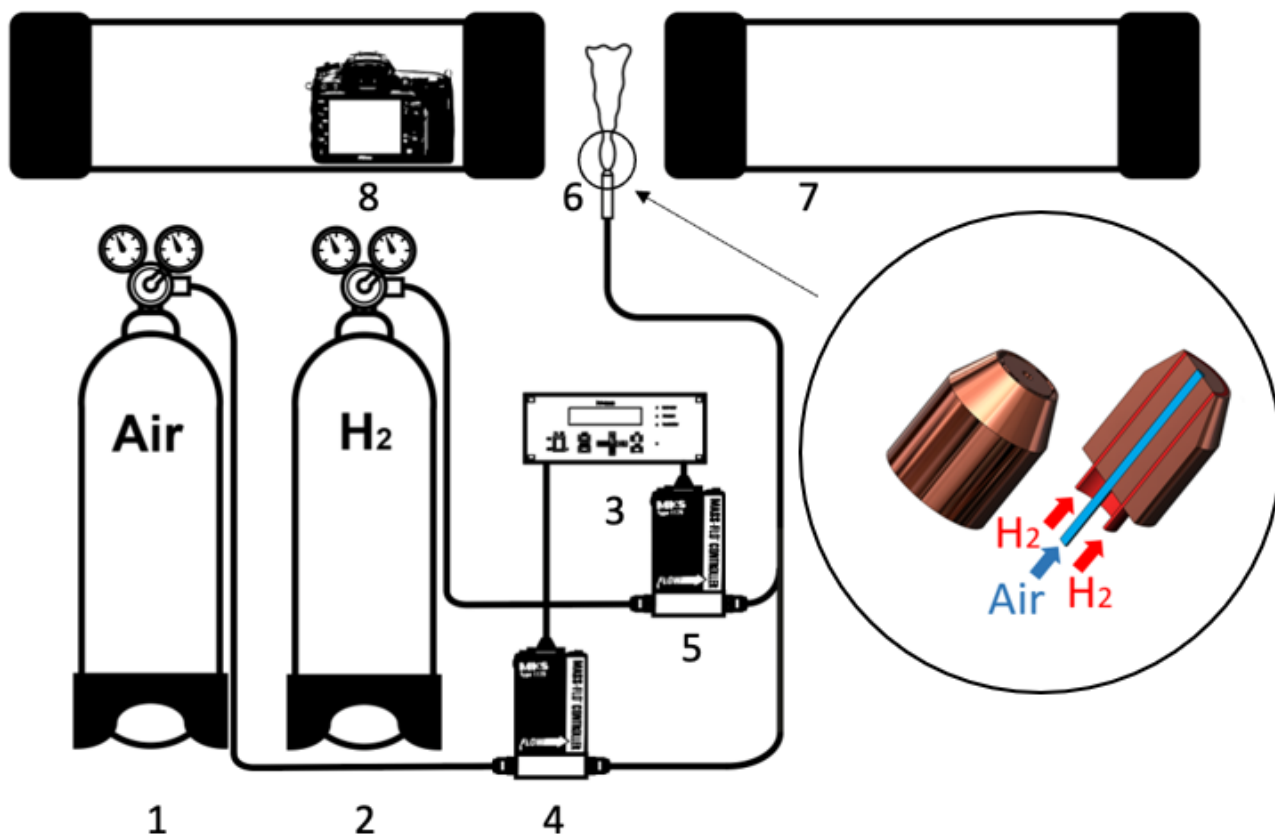


Рис.46. 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – баллон со сжатым воздухом, 3 – контроллер расходомера, 4, 5 – клапаны расходомера, 6 – сопловое устройство, 7 – теневой прибор ИАБ – 451, 8 – цифровая камера

4.2 Диффузионное горение одиночной струи водорода, истекающей из кольцевого сопла

Результаты теневой визуализации горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла при отсутствии истечения воздуха из центрального микросопла показаны на рисунке 47. При низких значениях расхода водорода наблюдается ламинарный факел, охватывающий верхнюю часть соплового аппарата рисунок 47а. Увеличение скорости истечения водорода приводит к формированию факела с двузонной структурой. Факел вблизи среза сопла приобретает сферическую форму, затем следует «перетяжка» пламени и конически расширяющаяся зона с турбулентным характером течения и горения. Далее при увеличении скорости

истечения водорода зона вблизи среза сопла приобретает цилиндрическую форму
рисунок 47в.

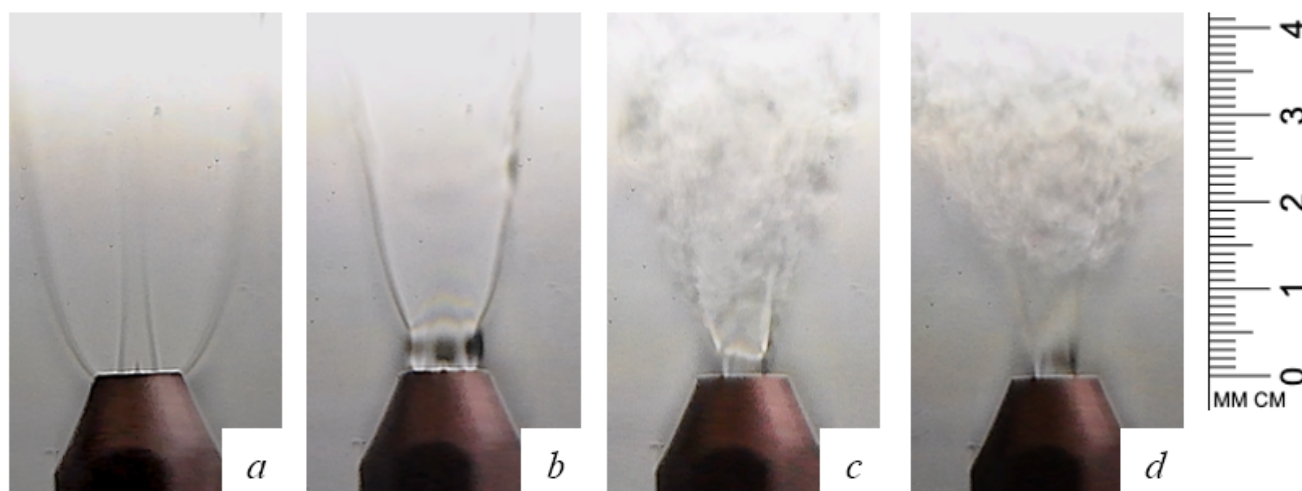


Рис. 47. Теневые картины горячей кольцевой струи водорода: а) $U_2=7,5\text{м/с}$, б) $U_2=14\text{м/с}$, в) $U=27\text{ м/с}$, г) 40 м/с

При определенной скорости истечения реализуется режим горения с турбулентным факелом, оторванным от среза сопла. Стоит дополнительно отметить, что в этом случае отсутствует зона вблизи среза сопла с ламинарным характером течения и горения, которая до этого наблюдалась в процессе диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из одиночного цилиндрического микросопла.

Как и при горении струи водорода, истекающей из цилиндрического сопла, формируется двузонный факел. Однако в данной ситуации, вместо сферической формы вблизи среза сопла при увеличении скорости истечения водорода формируется область в виде полого цилиндра, прикреплённого к соплу, с внешним диаметром, превышающим диаметр кольцевого сопла.

4.3 Диффузионное горение струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии сверхзвуковой струи воздуха

Возникновение потока воздуха, истекающего через микросопло, влияет на процесс диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из кольцевого сопла и кардинально меняет форму результирующего факела.

На рисунок 48 показаны результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения струи водорода истекающей из кольцевого сопла в присутствии струи воздуха, истекающей со сверхзвуковой скоростью ($U_1 = 398$ м/с).

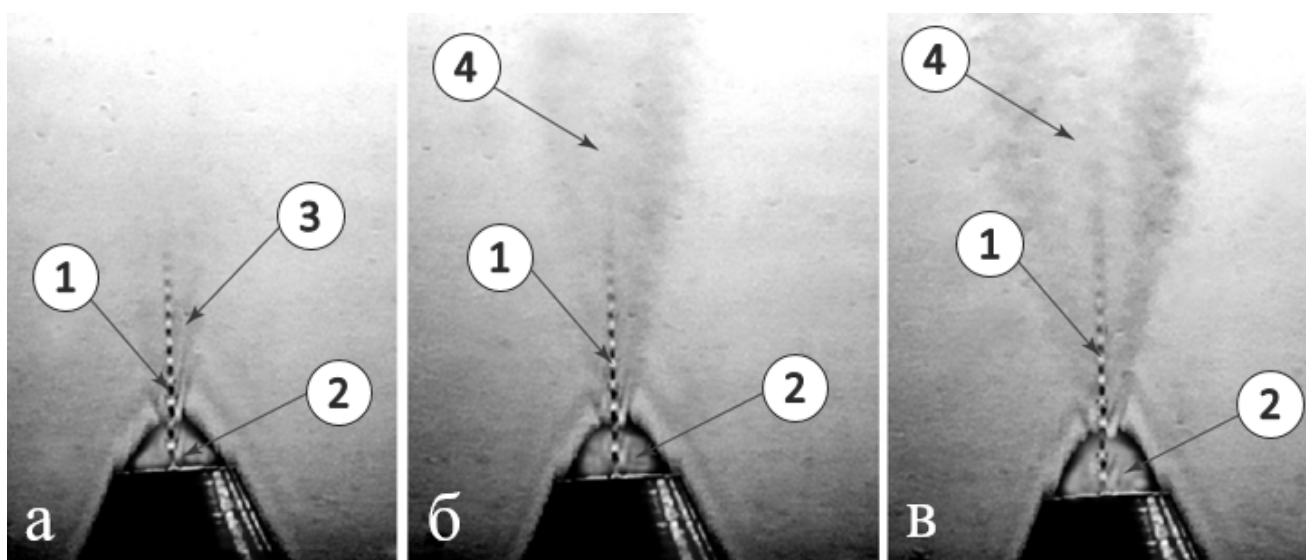


Рис. 48. Теневые картины горячей струи водорода, истекающей из кольцевой щели при различных скоростях, при наличии центральной сверхзвуковой струи воздуха $U_1=398$ м/с: а) $U_2=7,5$ м/с, б) $U_2=14$ м/с, в) $U=17$ м/с; 1 – сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха, 2 – область «запертого» пламени, 3 – выход водорода из области 2 без горения, 4 – локальное воспламенение, неустойчивое горение.

Скорость микроструи воздуха зафиксирована и остается постоянной, в то время как скорость истечения водорода регулируется. Воздушная струя формирует скачки сверхзвуковых уплотнений, которые отчетливо наблюдаются на картине теневой

визуализации. При малой скорости истечения водорода из коаксиального сопла и поджигании вблизи сопла, вместо полого ламинарного цилиндра, прикрепленного к соплу, возникает конусообразная структура, границы которой хорошо видны на визуализации, внутри которой происходит горение, а выходящая из этого конуса газовая смесь не воспламеняется, т.е. происходит «запирание пламени» в этом конусе (рисунок 48а). Это происходит в диапазоне скоростей истечения водорода $U_2 = 7,5 - 17$ м/с.

На рисунке 49 показаны теневые картины дальнейшего развития сценариев диффузионного горения струи водорода в присутствии струи воздуха. При последовательном увеличении скорости истечения водорода в присутствии сверхзвукового потока воздуха поток водорода все активнее прорывается далее вверх по течению, возникают области неустойчивого горения в области турбулентного факела, что сопровождается генерацией акустического шума.

Одновременно с этим зона факела вблизи среза сопла постепенно трансформируется из конусообразной сначала к усеченному конусу, большее основание которого со стороны среза сопла, затем к цилиндрической, полусферической и при дальнейшем увеличении скорости истечения водорода вытягивается.

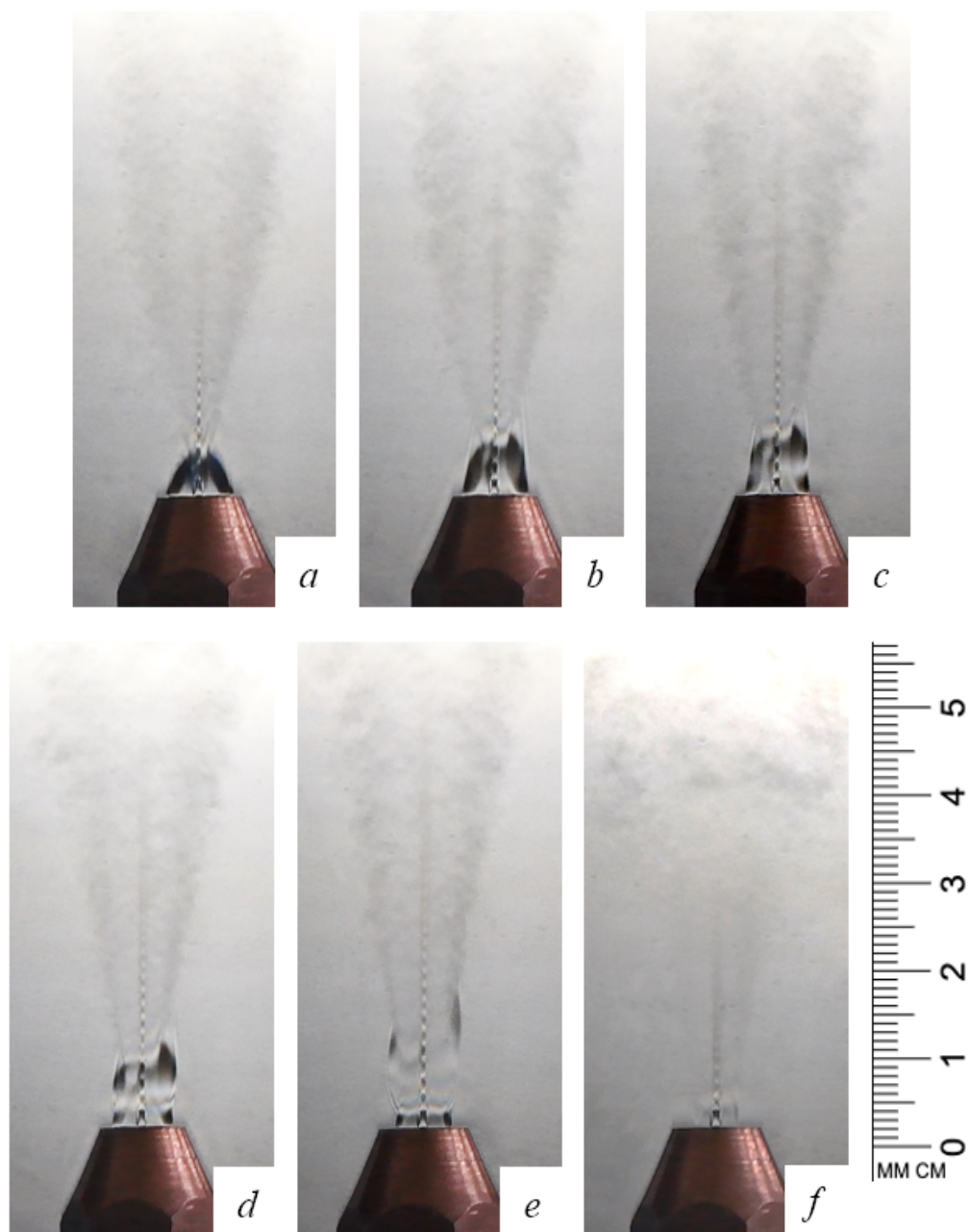


Рис. 49. Теневые картины горения H_2 при его истечении совместно со сверхзвуковым потоком воздуха при наличии центральной сверхзвуковой микроструи воздуха $U_1=398\text{м/с}$. От а) к ф) скорость истечения H_2 увеличивается:
а) 5 м/с, б) 17 м/с, в) 25 м/с, д) 45 м/с е) 50 м/с, ф) 60 м/с

Как уже говорилось ранее, процесс диффузионного горения также визуализировался с помощью тепловизора. Тепловизор и не позволяет точно определить поля температур, тем не менее с помощью него получены

удовлетворительные картины, демонстрирующие топологию результирующего факела. Полученные с помощью тепловизора картины представлены на рисунке 50. В данном случае скорость истечения водорода была зафиксирована, а скорость истечения воздуха регулировалась.

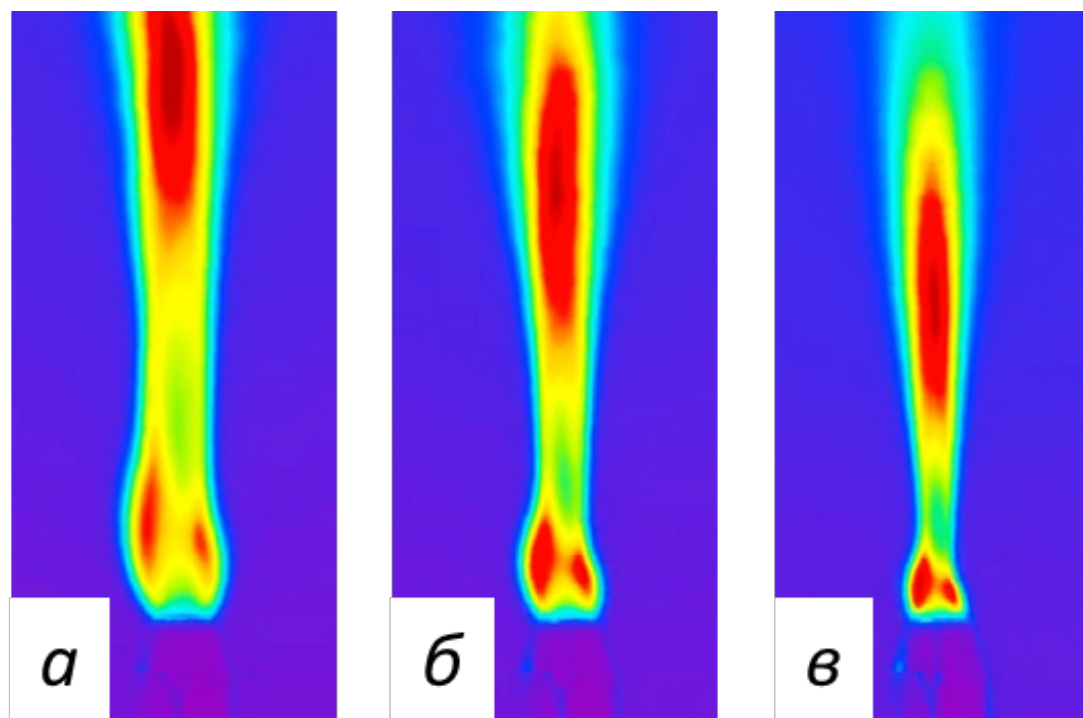


Рис. 50. Картины диффузионного горения водорода, истекающего из кольцевой щели, в присутствии струи воздуха, полученные с помощью тепловизора: в) $U_1=49,7$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; г) $U_1=99,5$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; д) $U_1=132,6$ м/с, $U_2=47,4$ м/с

Как видно из теневых картин, пространственные размеры зоны факела близи среза сопла, имеющей сферическую форму уменьшаются при увеличении среднерасходной скорости истечения струи воздуха.

На рисунке 51 показана визуализация процесса горения с помощью тепловизора, при этом скорость истечения водорода зафиксирована, а скорость истечения воздуха изменяется. Истечение воздуха происходит со сверхзвуковой скоростью, результаты теневой визуализации показывают наличие сверхзвуковых

скачков уплотнений в течении. Увеличение скорости истечения воздуха также приводит к запиранию горения в области вблизи среза сопла и результирующий факел приобретает конусную форму.

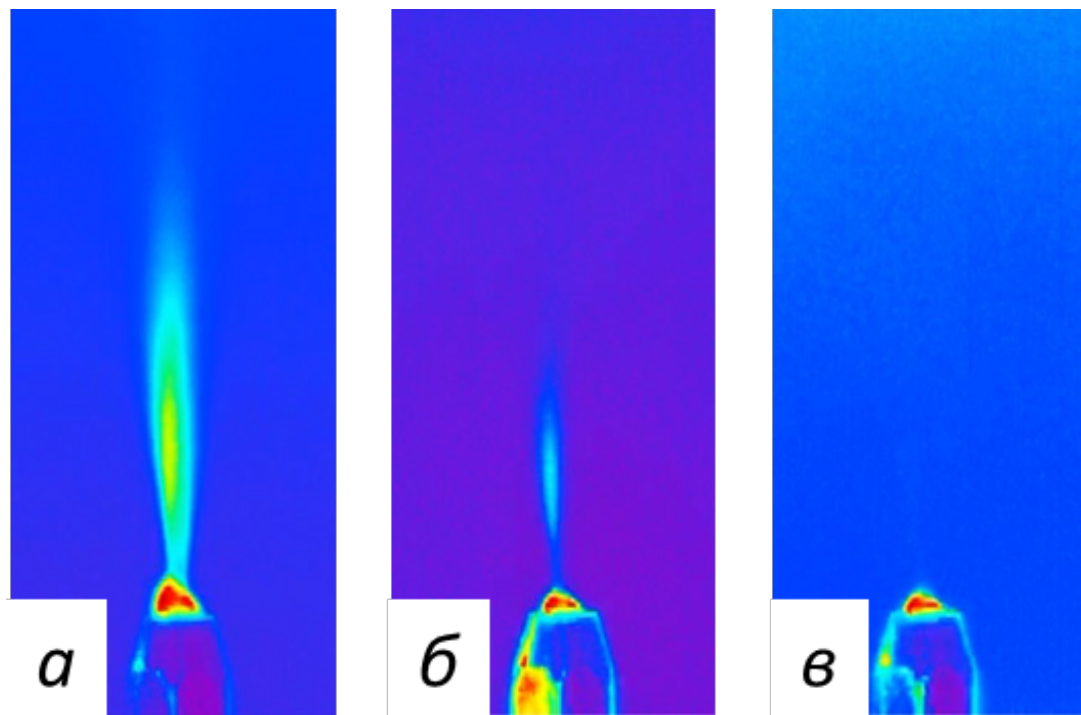


Рис. 51. Визуализация процесса диффузионного горения с помощью тепловизора: а) $U_1=451$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; б) $U_1=583,6$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; в) $U_1=696,3$ м/с, $U_2=47,4$ м/с

На формирование топологии результирующего факела влияет соотношение скоростей водорода и воздуха.

4.4 Обсуждение

Исследованы сценарии диффузионного горения одиночной струи водорода, истекающей из кольцевого сопла. Они связаны с формированием двузонной структуры пламени при небольшой скорости истечения. Отрыв факела от среза сопла происходит при увеличении расхода или скорости истечения водорода.

При исследовании диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла в присутствии сверхзвуковой струи воздуха, было обнаружено новое явление. Возникновение сверхзвуковой струи воздуха, истекающей из центрального сопла соплового с соосным расположением сопел, приводит к тому, что изначально ламинарный факел от горения кольцевой струи водорода запирается в узкой области вблизи среза сопла.

Топология результирующего факела, воспламенение зоны вдали от среза сопла зависит от соотношения скоростей истечения воздуха/водорода.

Прорыву водорода из узкой области конусной формы с воспламенением второй турбулентной зоны способствует либо уменьшение скорости истечения воздуха до дозвуковых значений, либо увеличение расхода или скорости истечения водорода.

4.5 Выводы

В зависимости от скорости истечения водорода можно условно выделить следующие этапы горения спутной струи водорода при наличии в центре сверхзвуковой струи воздуха:

1) При малой скорости истечения водорода и поджигании вблизи сопла горение «запирается» в конусе. Наблюдается горение вблизи среза сопла, факел имеет конусовидную форму, при этом сверхзвуковая струя воздуха принизывает этот факел и выходит через вершину конуса, выбрасывая смесь воздуха и водорода, в которой горение отсутствует;

2) При увеличении скорости истечения водорода, происходит распространение пламени вниз по струе, образуются локальные области горения, генерирующие акустический шум, конусовидная область трансформируется в полусферу;

3) Происходит стабильное турбулентное горение с генерацией акустического шума. Вблизи среза сопла наблюдаются области ламинарного течения, окружающие сверхзвуковую струю воздуха;

4) При дальнейшем увеличении скорости истечения область турбулентного горения смещается ближе к срезу сопла, ламинарный факел исчезает.

При уменьшении скорости истечения водорода последовательно происходит переход от этапа 4 к 1.

Глава V: Взаимодействие двух одиночных микроструй водорода в процессе диффузионного горения

Глава посвящена исследованию взаимодействующих микроструй водорода в процессе диффузионного горения. Микрогорелочные устройства находят широкое применение в различных областях науки и техники. Отличительными особенностями микрогорелочных устройств является их безопасность, высокая степень управляемости сценариями горения и возможность масштабирования устройства путем изменения числа микрогорелок. Устройство, состоящее из нескольких горелочных устройств, подразумевает возможность столкновения и взаимодействия потоков, истекающих из сопел. Поведение струй при столкновении зависит от множества факторов, среди которых скорость, угол, диаметр сопел. Взаимодействие может привести к образованию вихрей и турбулизации потока в области столкновения, уменьшению скорости или изменению направления течения. Все это повлияет на характер диффузионного горения результирующего факела.

В главе проведены предварительные экспериментальные исследования взаимодействия микроструй водорода и рассмотрены основные сценарии их диффузионного горения для случая микросопел расположенных под небольшим углом друг относительно друга. Также проведены экспериментальные исследования микроструй расположенных под большими углами и определены основные особенности топологии результирующего факела при различной скорости истечения для случая пересекающихся и смещенных микроструй, при воспламенении вблизи и на расстоянии от среза микросопел. Полученные результаты о развитии сценариев диффузионного горения взаимодействующих микроструй сравниваются с экспериментальными данными, полученными для одиночной микроструи, истекающей из сопел того же диаметра при таких же значениях чисел Рейнольдса.

5.1 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 52.

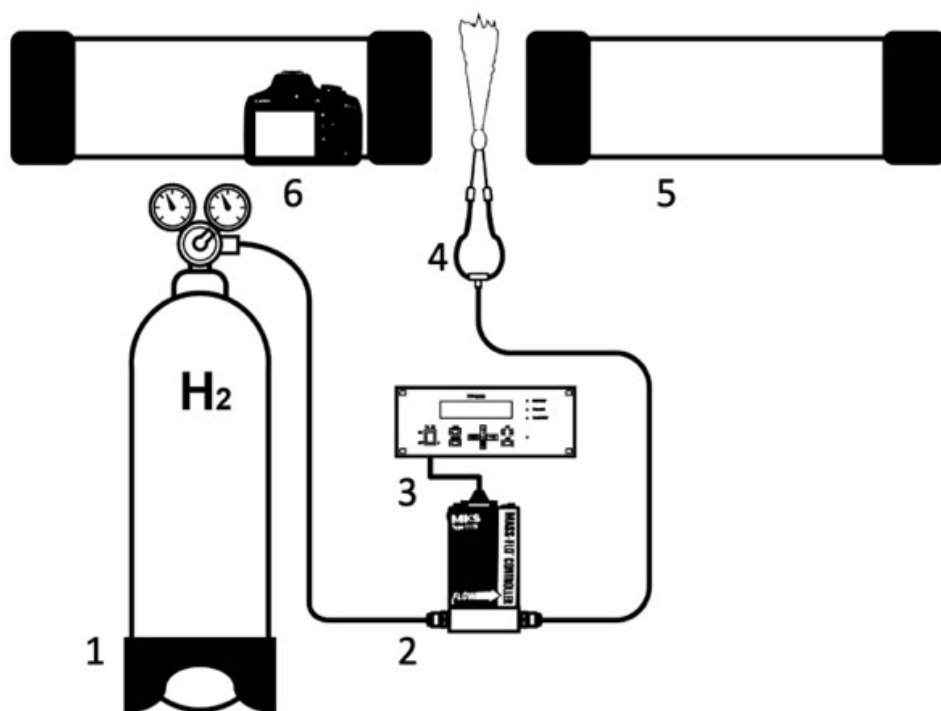


Рис. 52. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – клапан расходомера, 3 – контроллер расходомера, 4 – теневой прибор ИАБ – 451, 5 – микросопла, расположенные под углом, 6 – фотоаппарат

Сжатый водород из баллона (1) подается на клапан регулятора объемного расхода газа (1179В MKS Instruments) (2), обеспечивающий точность измерения расхода в пределах 0,7 %. Клапан регулятора управляется контроллером (PR 4000В-F MKS Instruments) (3). Далее трасса с водородом раздваивается, каждая выходит на свое сопло (4), представляющее собой вытянутую цилиндрическую тонкостенную трубку. Скорость истечения из пары микросопел $U_1 = U_2 = U$. В экспериментах использовались пары сопел с внутренними диаметрами 200 и 400 мкм. Сопла располагались симметрично, относительно вектора g , угол между ними регулировался. Визуализация горения производилась с помощью теневого метода с использованием установки ИАБ-451 (5). Снимки теневых картин получены с

помощью цифровой камеры (6). Также процесс диффузионного горения визуализировался с помощью тепловизора СЕМ DT-9897Н

5.2 Результаты экспериментов взаимодействие микроструй $d = 400$ мкм

На рисунке 53 показано взаимодействие ламинарных факелов. В эксперименте использовались сопла с внутренним диаметром 400 мкм.

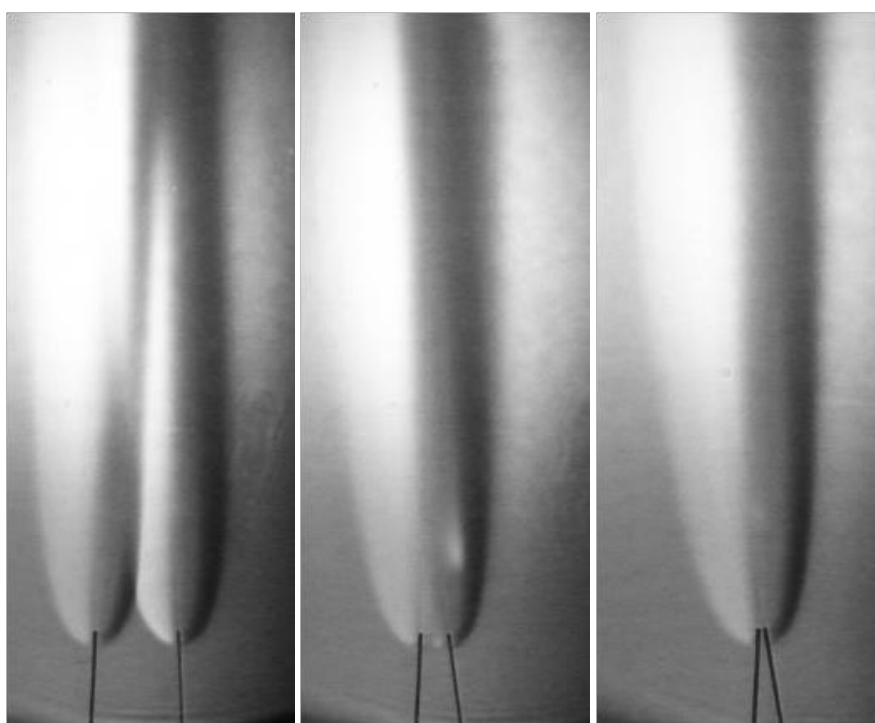


Рис. 53. Взаимодействие двух ламинарных факелов при истечении микроструй из сопел с $d_1 = d_2 = 400$ мкм, $U = 318$ м/с

При сближении микросопел примерно на расстояние четырех диаметров микросопла два ламинарных факела сливаются в один при этом результирующий факел также остаётся ламинарным и немного расширяется. На рисунке 54 показан результат взаимодействия двух изначально ламинарных факелов. Если при небольшой скорости истечения взаимодействие приводило к формированию

ламинарного результирующего факела, то в данной ситуации результирующий факел приобрел двузонную структуру.

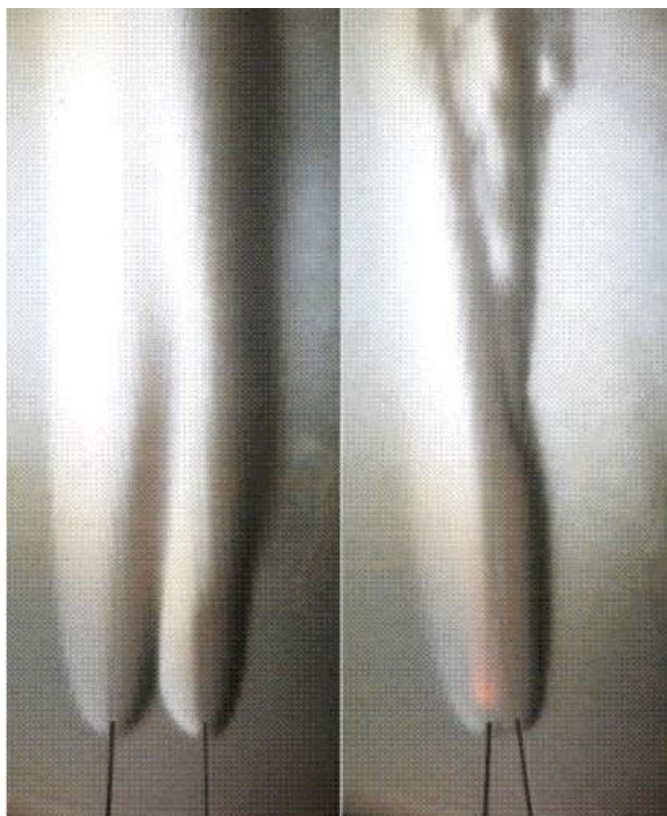


Рис. 54. Невзаимодействующие (а) и взаимодействующие пламена (б), $U = 477$ м/с ($Re = 1865$)

На рисунке 55 показано, как расстояние между соплами влияет на структуру результирующего факела. Скорость истечения из микроструй зафиксирована и остается постоянной ($U = 761$ м/с), сопла расположены под небольшим углом $\sim 12^\circ$. Сопла постепенно сближаются, при этом микроструи, истекающие из сопел, пересекаются. При сближении микросопел на расстояние $0,5d$ (половина диаметра микросопла) происходит интенсификация процесса горения, ламинарный участок пламени по протяженности уменьшается в 5 раз от первоначального размера.

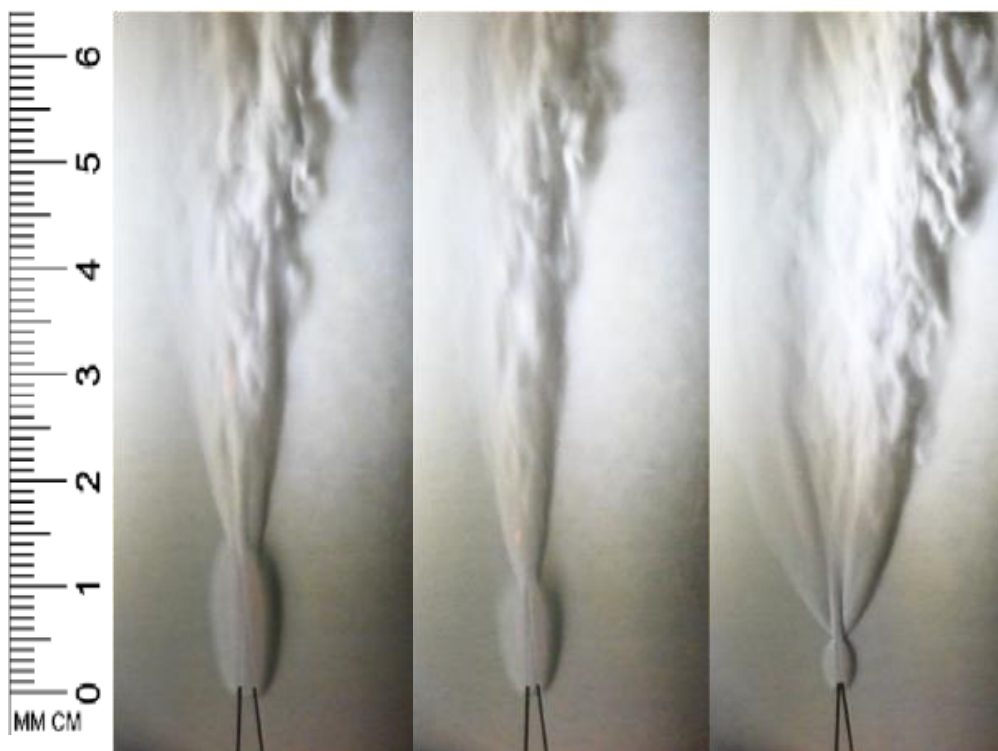


Рис. 55. Взаимодействие пламен на различном расстоянии друг от друга, $U = 761$ м/с ($Re = 3100$); расстояние между соплами: а – максимальное ($4d$), б – среднее ($2d$), в – минимальное ($0,5d$)

5.3 Взаимодействие микроструй $d = 200$ мкм при воспламенении вблизи среза сопла

Микроструи расположенные под небольшим углом друг к другу слабо влияют друг на друга, рассмотрим случай, когда микроструи ориентированы под большим углом друг к другу. На рисунке 56 показана схема расположения микросопел. Они ориентированы под углом 60 градусов, такая постановка позволяет сильнее воздействовать факелам друг на друга.

На рисунке 57 показано, как выглядит истечение из одиночной микроструи, ориентированной под углом 60° к плоскости горизонта (рисунок 57а), взаимодействие микроструй оси которых пересекаются (рисунок 57б) и взаимодействие микроструй оси которых смещены на расстояние порядка двух

диаметров микросопел при одинаковых среднерасходных скоростях истечения микроструй водорода.

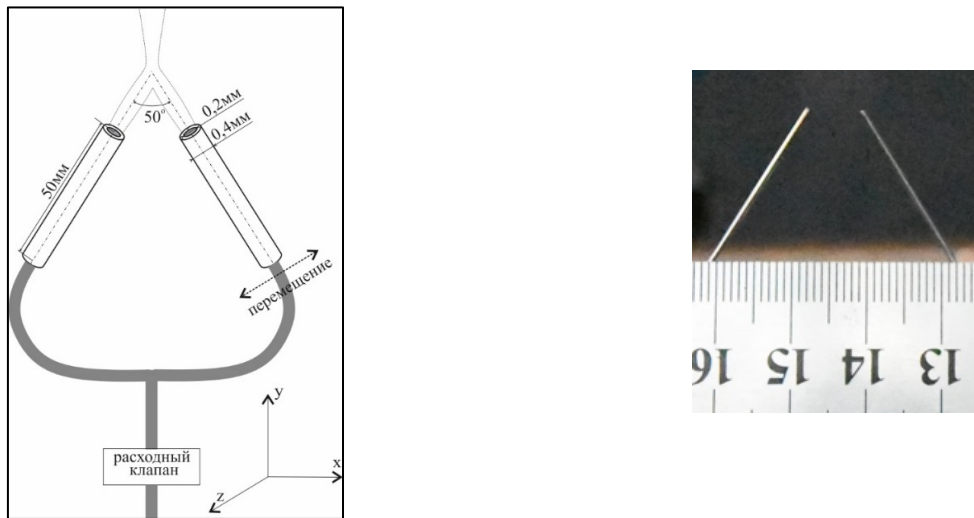


Рис. 56. Схема расположения микросопел (слева) и фотография (справа).

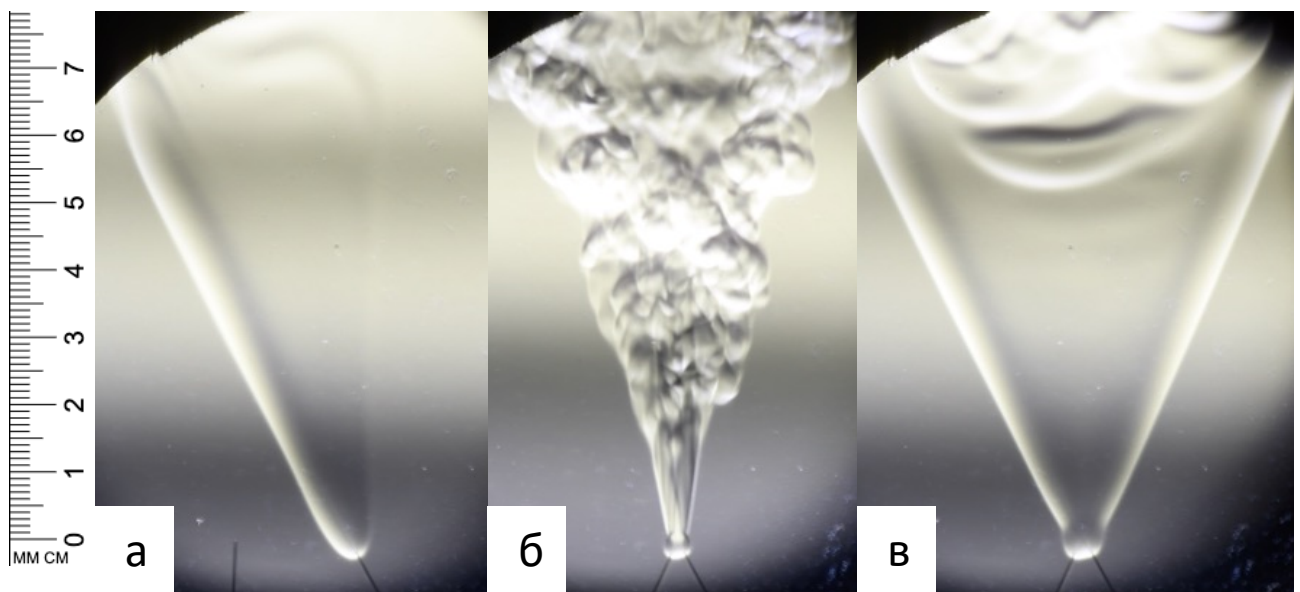


Рис. 57. Теневые картины: а) свободный факел, скорость микроструи $U = 457$ м/с ($Re = 932$) и взаимодействие присоединенных факелов: б) пересекающиеся микроструи; в) непересекающиеся микроструи, оси которых смещены на расстояние $= 2d$ истекающие при той же скорости

Результаты визуализации показывают, что смещение оси одной микроструи относительно другой влияет на турбулизацию результирующего факела. Свободно истекающая одиночная микроструя, ориентированная под углом, формирует ламинарный факел, из-за относительно небольшой скорости истечения $U = 457$ м/с ($Re = 932$) влияние сил конвекции приводит к значительной деформации факела. Взаимодействие микроструй оси которых пересекаются приводит к формированию развитого турбулентного результирующего факела, о чем свидетельствует наличие вихревых структур результирующего факела на теневой картине. При такой ориентации микросопел наблюдается сужение результирующего факела в плоскости наблюдателя и уширение в факела в плоскости перпендикулярной плоскости наблюдателя.

Небольшое смещение микроструй таким образом, чтобы оси микросопел лежали в плоскостях смещенных друг относительно друга на расстояние порядка двух диаметров микросопел, приводит к формированию результирующего факела, который уширяется в плоскости наблюдателя. При этом также на расстоянии 5 см ($200d$ микросопла) на теневой картине не наблюдается вихревых структур, следовательно на таком расстоянии факел остается ламинарным.

На рисунке 58. Представлено сравнение взаимодействующих микроструй, полученные с помощью теневой визуализации и визуализации с помощью тепловизора. Картины, полученные с помощью тепловизора позволяют увидеть топологию сформировавшегося факела на начальном участке, а также нагрев сопла. На полученных отчетливо видно, что результирующий факел охватывает срезы сопел. Смещенные на расстояние двух калибров микроструи приводят к формированию факела с углом раствора 60 градусов, а пересекающиеся микроструи формируют турбулентный факел, угол которого 12 градусов в плоскости наблюдения.

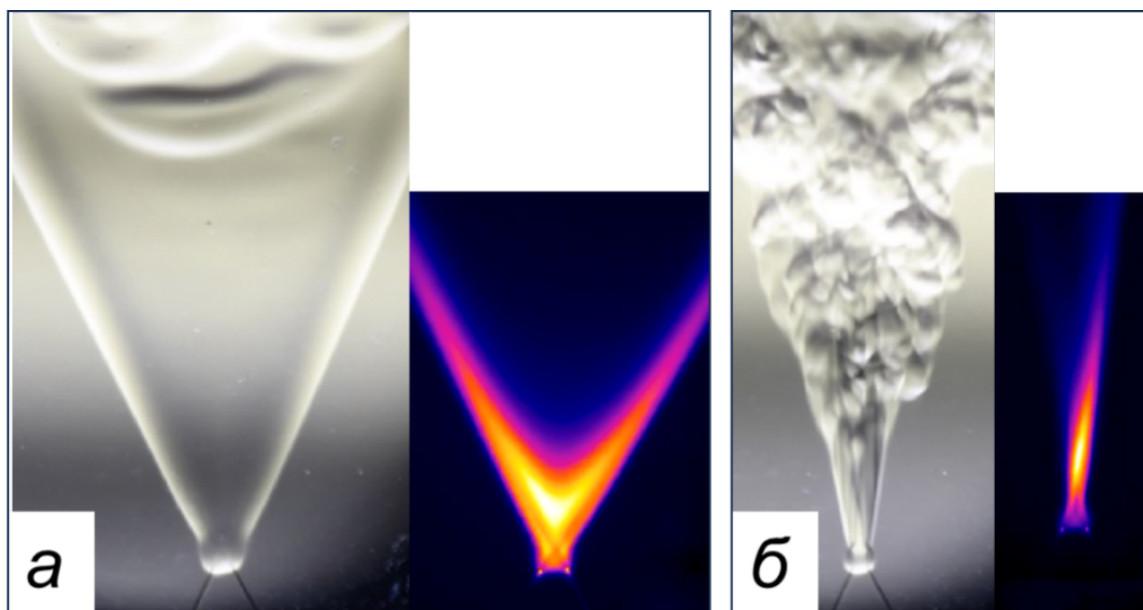


Рис. 58. Теневая картина и картина, снятая с помощью тепловизора: а) пересекающиеся микроструи; б) непересекающиеся микроструи, истекающие при той же скорости $U=457$ м/с ($Re=932$)

В результате можно сделать вывод, что смещение осей микроструй способно влиять на процесс ламинарно-турбулентного перехода в результирующем факеле взаимодействующих микроструй водорода.

На рисунке 59 показаны результаты экспериментов, в которых зафиксировано положение микросопел таким образом, чтобы микроструи не пересекались, и рассмотрены сценарии горения в зависимости от скорости истечения микроструй, а также слева от взаимодействующих микросопел представлены картины диффузионного горения одиночной микроструи, истекающей при тех же скоростях. Все микроструи имеют скорость истечения достаточную для формирования изначально двузонной структуры со сферической зоной пламени, охватывающей срез сопла и развитым турбулентным факелом далее вверх по потоку.

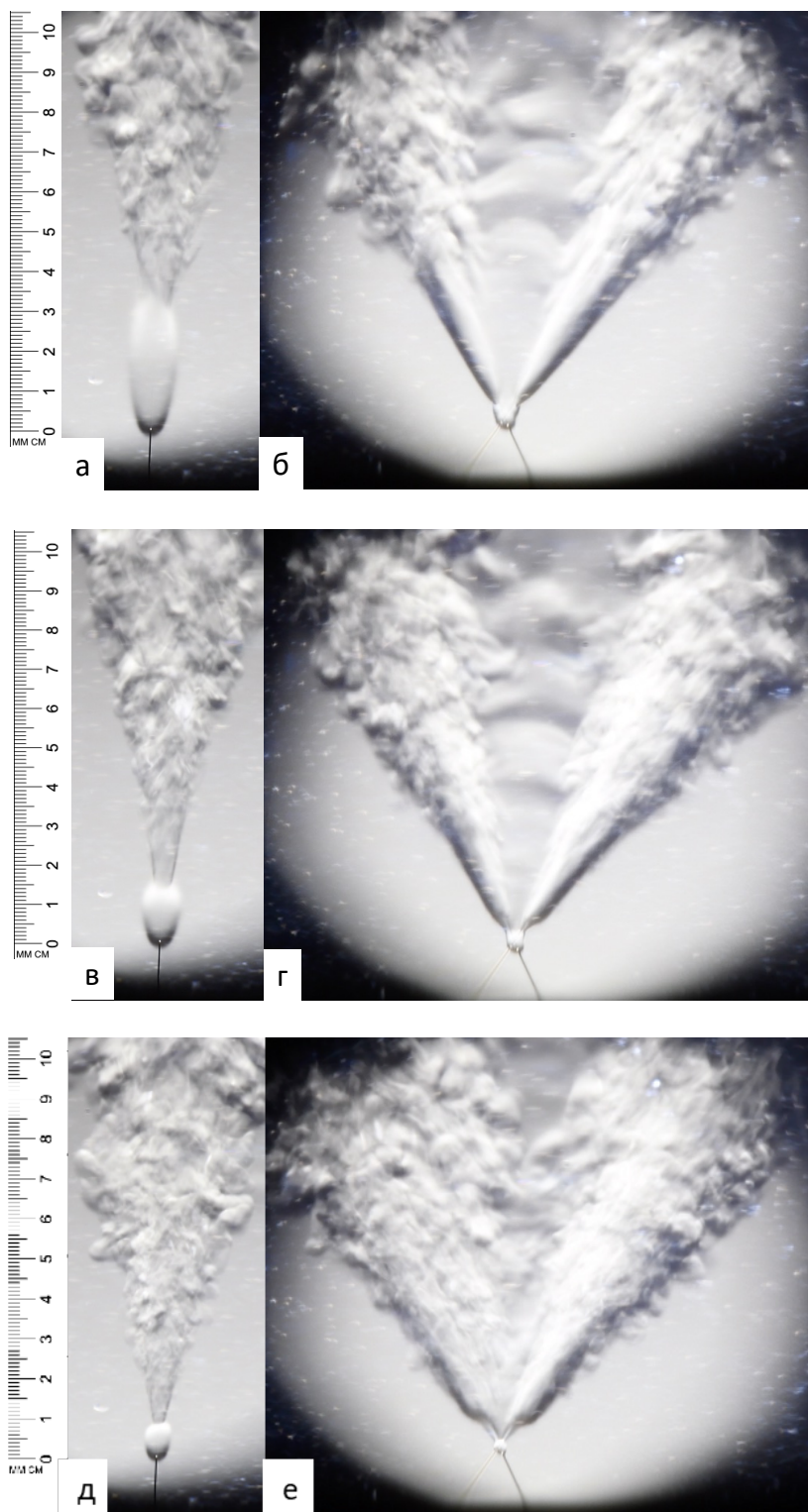


Рис. 59. Теневая визуализация, взаимодействия факелов с двузонной структурой – справа, а изначальная структура пламени микроструи при той же скорости – слева: а,б) $U=913\text{ м/с}$ ($Re=1865$); в,г) $U=1188\text{ м/с}$ ($Re=2424$); д, е) $U = 1706\text{ м/с}$ ($Re=3419$)

В данном случае скорость истечения микроструи водорода достаточно высокая и ориентация одиночной микроструи под углом до 60° не влияет на формирование ее двузонной структуры, и протяженность ламинарного участка, как было показано в работе [26].

На рисунке 60 показаны результаты экспериментов, в которых зафиксировано положение микросопел таким образом, чтобы микроструи не пересекались, и рассмотрены сценарии горения в зависимости от скорости истечения микроструй. Угол между микросоплами составляет 50° .

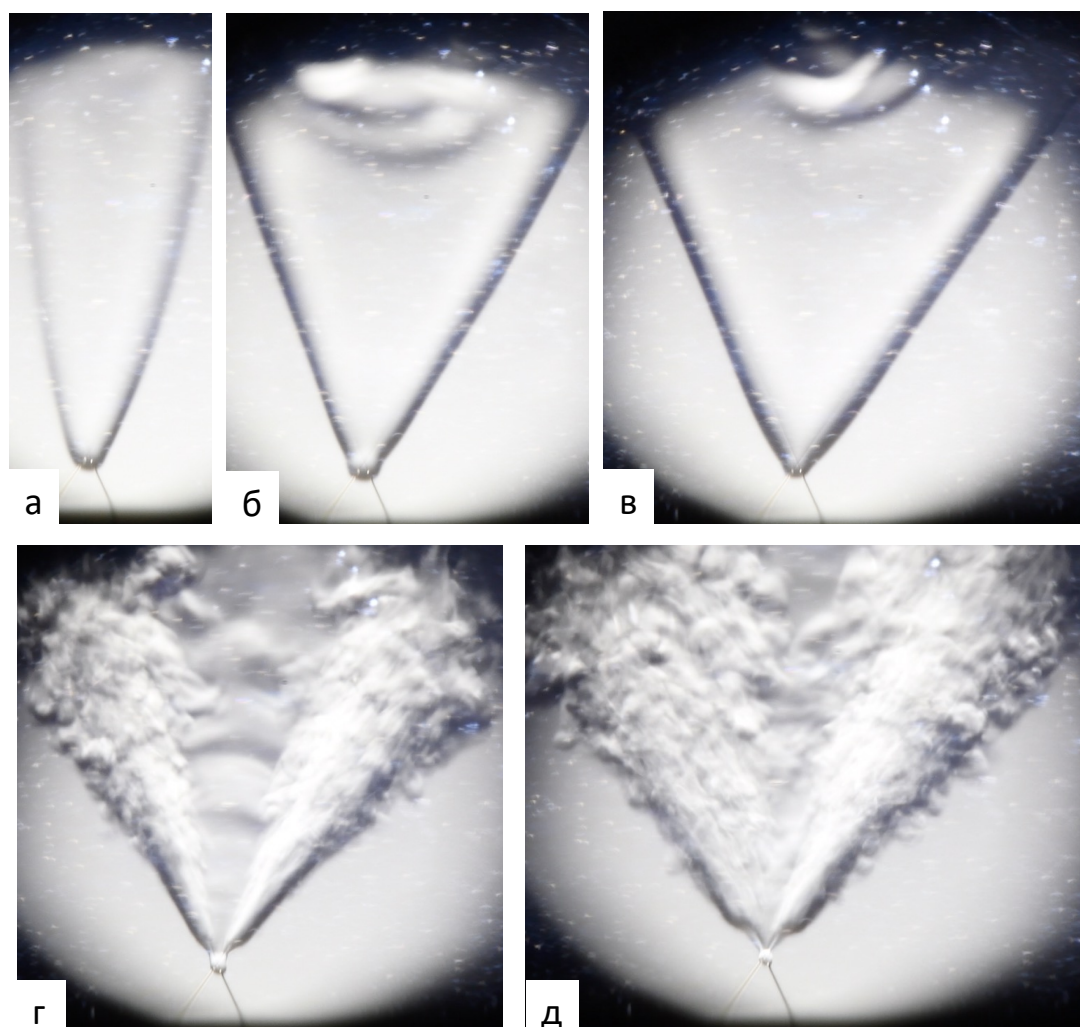


Рис. 60. Взаимодействие двух факелов при различной скорости истечения микроструй: а – $U = 152$ м/с ($Re = 311$); б – $U = 381$ м/с ($Re = 777$); в – $U = 609$ м/с ($Re = 1243$); г – $U = 1218$ м/с ($Re = 2486$); д – $U = 1675$ м/с ($Re = 3419$)

При увеличении скорости истечения микроструй также увеличивается угол раскрытия результирующего факела до значения $\sim 60^\circ$ (см. рисунок 60, в). Неустойчивость, возникающая в верхней части факела после остановки его расширения, спускается ближе к срезу сопел, при этом начинается активный процесс турбулизации (см. рисунок 60, з, д).

5.4 Взаимодействие микроструй $d = 200$ мкм, воспламенение на расстоянии от среза сопла

Теневые картины процесса взаимодействия факелов, приподнятых над срезом сопла, показаны на рисунке 61. На рисунке 61а микроструи пересекаются, на рисунке 61б микроструи не пересекаются и лежат в плоскостях смещенных на расстояние двух калибров.

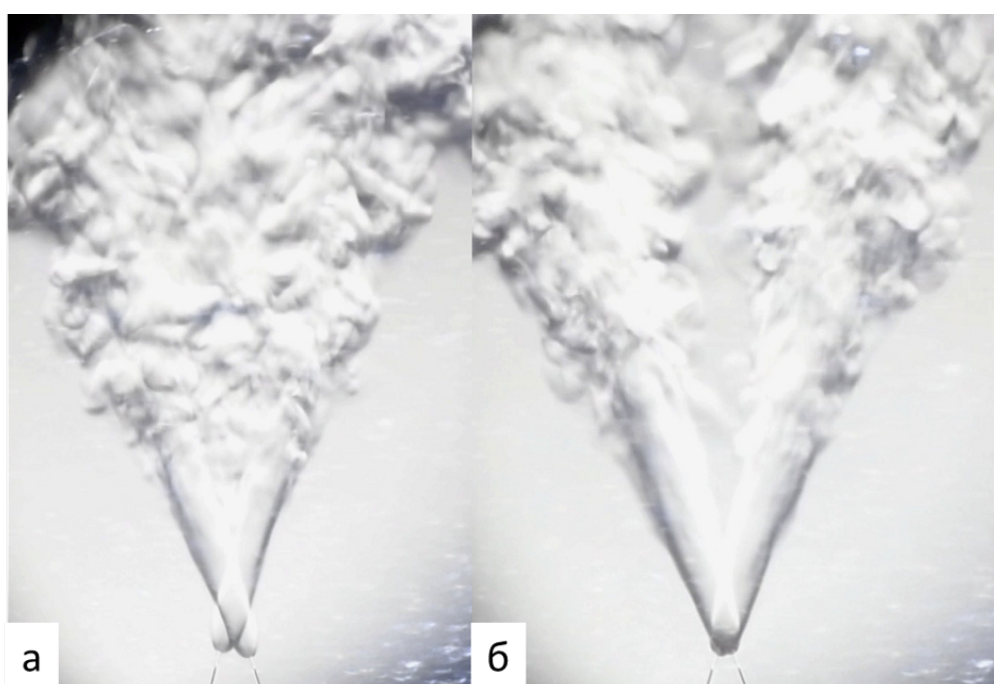


Рис. 61. Взаимодействие факелов, приподнятых над срезом сопла: а – пересекающиеся микроструи; б – непересекающиеся микроструи. $U = 914$ м/с ($Re = 1865$)

В случае, когда микроструи пересекаются в результирующем факеле наблюдается активная турбулизация и уширение в плоскости перпендикулярной наблюдателю. В этом случае отчетливо видно, что результирующий факел не взаимодействующих микроструй имеет больший угол распространения в плоскости наблюдателя. При этом результирующий факел от сталкивающихся микроструй уширяется в плоскости перпендикулярной наблюдателю.

5.4 Обсуждение результатов

Изучение процесса взаимодействия двух микроструй водорода в процессе их диффузионного горения позволило выявить несколько принципиально новых особенностей. В зависимости от взаимного расположения микросопел микроструи могут либо пересекаться друг с другом, либо нет. В первом случае это приводит к турбулизации потока и как следствие, к турбулизации результирующего пламени, точка перехода спускается ближе к срезу сопла в сравнении с факелом одиночной микроструи при той же скорости истечения. Во втором случае взаимодействие непосредственно между микроструями не возникает, однако фронт пламени охватывает протяженную область между факелами каждой из микроструй и результирующий факел имеет широкий угол и ламинарную структуру при небольшой скорости истечения. При этом на угол распространения факела влияет скорость истечения микроструи и расстояние между осями непересекающихся микроструй. На рисунке 62 показана визуализация с помощью тепловизора процесса диффузионного факела от двух микроструй при различных расстояниях между осями микросопел в случае низкоскоростных струй, когда факел остается присоединенным. Пересечение микроструй приводит к турбулизации факела, что было отчетливо видно на теневых картинах, визуализация с помощью тепловизора позволяет лишь увидеть, что угол распространения факела в этом случае сужается в плоскости наблюдателя. При ориентации микроструй под углом 60 градусов максимальный угол распространения результирующего факела также составлял 60

градусов, при скоростях истечения микроструй $U_1 = U_2 = 609$ м/с и смещении осей микроструй на расстояние 2 калибра.

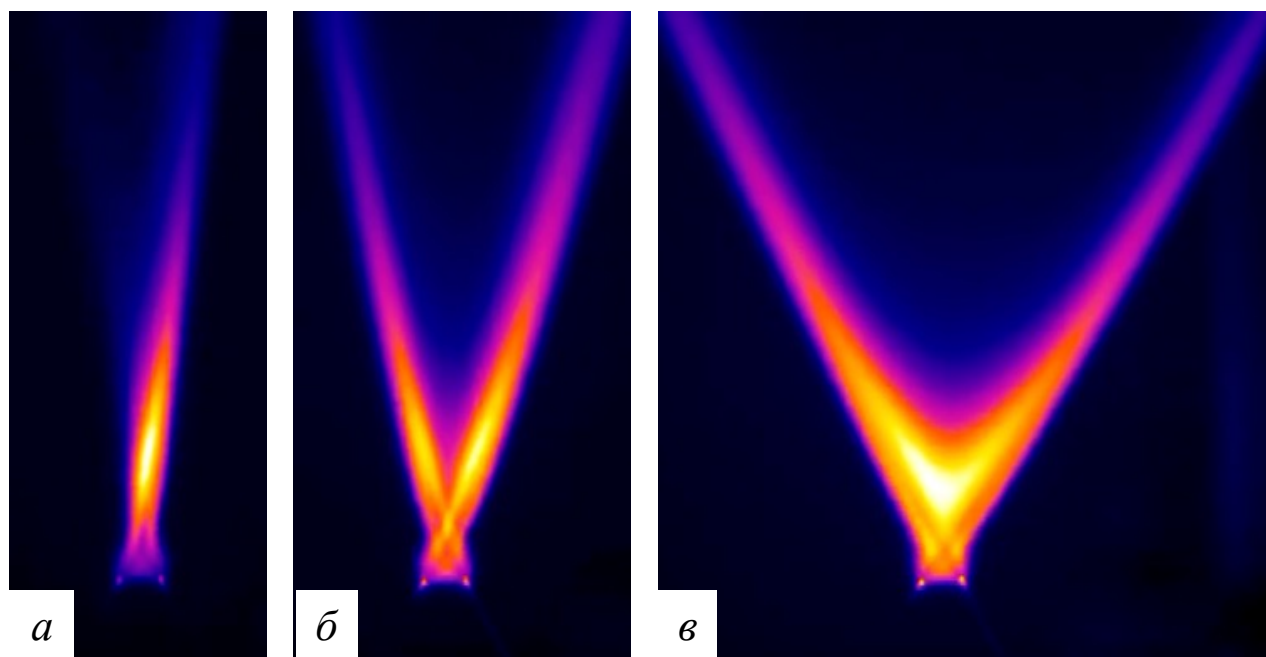


Рис. 62. Теневая визуализация процесса диффузионного горения взаимодействующих микроструй водорода, результирующий факелприсоединен, $U = 457$ м/с ($Re = 932$): а) оси микроструй пересекаются; б) оси микроструй смещены в поперечном направлении на расстояние $= d$; в) оси микроструй сдвинуты в поперечном направлении на расстояние $= 2d$

При увеличении скорости истечения турбулизация начинается в первую очередь на краях вытянутого фронта факела, а в середине верхней части возникает периодически следующая волновая структура, восприимчивая к акустическим возмущениям.

Реализация режима горения с результирующим факелом, отошедшим от среза сопел, происходит только при воспламенении высокоскоростных струй на расстоянии от среза микросопел, рисунок 63. В случае взаимодействия двух факелов, приподнятых над срезом сопла, в случае пересекающихся микроструй результирующий факел имеет небольшой угол раскрытия 60 градусов в плоскости

наблюдения минимальный, при смещении осей микроструй на расстояние 2 калибров он становится максимальным.

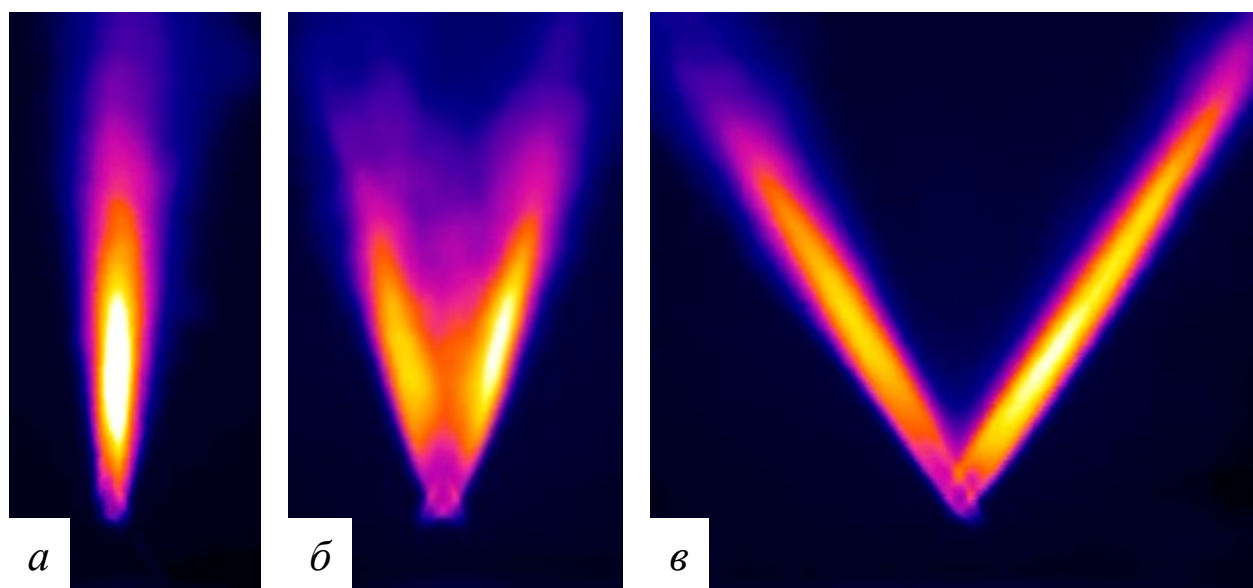


Рис. 63. Визуализация процесса диффузионного горения взаимодействующих микроструй водорода с помощью тепловизора с результирующим факелом, отошедшим от среза сопла, $U = 914\text{ м/с}$ ($Re = 1865$): а) оси микроструй пересекаются; б) оси микроструй смещены в поперечном направлении на расстояние d ; в) оси микроструй сдвинуты в поперечном направлении на расстояние $2d$

В случае, когда микроструи пересекаются как в случае присоединенного вавела, так и оторванного уширение факела происходит в плоскости перпендикулярной плоскости наблюдения.

5.5 Выводы

В результате исследования микроструй водорода в процессе диффузионного горения были получены следующие результаты:

- 1) Сценарии диффузионного горения одиночной микроструи водорода совпадают с обнаруженными ранее в [3]. Они связаны с формированием двузонной структуры пламени в широком диапазоне скоростей при горении микроструи с присоединенным факелом и с линейным увеличением высоты отрыва пламени при увеличении скорости истечения в случае, когда горение происходит с факелом, отошедшим от среза сопла;
- 2) Длина ламинарного участка пламени для взаимодействующих микроструй уменьшается с увеличением скорости микроструи, при этом сам ламинарный участок пламени, формируемый при горении взаимодействующих микроструй, в несколько раз меньше по протяженности, чем такой же участок в пламени одиночной микроструи.
- 3) Взаимное расположение осей микроструи влияет на турбулентность результирующего факела, в случае, когда изначально микроструи формируют присоединенные факела. При полном перекрытии, когда оси микроструй пересекаются, результирующий факел сужается в плоскости наблюдателя при этом уширяясь в ортогональной плоскости. Расположение микроструй с небольшим смещением осей относительно друг друга на расстояние $\sim 2d$ (где d – диаметр микросопла), позволяет результирующему факелу оставаться ламинарным;
- 4) Скорость истечения взаимодействующих микроструй влияет на турбулентность и результирующую структуру факела. При малой скорости истечения микроструи течение ламинарное, начиная с определенной скорости, вблизи среза сопла формируется ламинарная зона результирующего пламени, выше по потоку турбулентная;
- 5) Для микроструй существует диапазон скоростей, при котором поддерживается горение, при этом образующееся пламя не контактирует с наконечниками сопла. В этом режиме результирующее пламя является турбулентным.

Заключение

По результатам проведенной работы были получены следующие результаты:

- Подтверждены обнаруженные ранее сценарии диффузионного горения одиночной микроструи, связанные с образованием двузонной структуры пламени в широком диапазоне скоростей истечения водорода при воспламенении микроструи вблизи среза.
- Подтверждены обнаруженные ранее сценарии диффузионного горения одиночной микроструи, сопла и при горении с оторванным пламенем от среза сопла при воспламенении на расстоянии от среза микросопла. Диффузионное горение с факелом, оторванным от среза микросопла существует в гораздо более узком диапазоне скоростей истечения водорода. Также обнаруженные сценарии приведены в зависимости от безразмерных чисел Re ;
- Все сценарии диффузионного горения микроструи водорода обнаруженные для одиночной микроструи сохраняются с незначительными изменениями и при подаче спутного потока воздуха из соосно расположенной кольцевой щели;
- Область результирующего факела вблизи среза сопла претерпевает определенные изменения – она приобретает цилиндрическую форму при увеличении скорости спутного потока воздуха. При этом спутный поток воздуха также дополнительно стабилизирует процесс горения в целом.
- Развитие ламинарной зоны факела – ее уменьшение при увеличении скорости истечения микроструи сохраняется также и при увеличении скорости истечения спутного потока воздуха.
- Типичные сценарии горения струи H_2 , истекающей из кольцевого сопла, связаны с образованием двузонной структуры пламени при малом расходе и при горении с оторванным пламенем от среза сопла при высоких расходах.

Воздух, подаваемый из микросопла, существенно меняет процесс горения H_2 .

- Развитие ламинарной зоны водородного пламени с увеличением скорости истечения или расхода происходит следующим образом: ламинарный участок пламени переходит из конической формы в полусферическую, а затем в сферическую, после чего ее границы размываются, и она исчезает, оставляя турбулентное оторванное от среза сопла пламя.
- Проведено исследование взаимодействия микроструй водорода и показано, Показано, что при небольшой скорости истечения микроструй они слабо влияют друг на друга, результирующий факел также остается ламинарным.
- Взаимное расположение микросопел способно влиять на процесс турбулизации результирующего пламени. Смещение осей микроструй в определенном диапазоне скоростей позволяют ламинаризовать результирующий факел на протяженном участке между струями, отодвинуть турбулентную зону дальше от среза сопел.

Список литературы

- 1 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.
- 2 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. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 25–37.
- 3 Г. В., Литвиненко Ю. А. Моделирование неустойчивости ламинарной круглой струи с параболическим профилем скорости // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 1. С. 14–24.
- 4 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.
- 5 Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Козлов Г. В. Дозвуковая круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // ДАН. 2011. Т. 436, № 1. С. 1–7.
- 6 Sato H. The stability and transition of a two-dimensional jet // J. Fluid Mech., 1960. Vol. 7. Part 1. pp. 53–80.
- 7 P. Huerre and P.A. Monkewitz Local and global instabilities in spatially developing flows // Annu. Rev. Fluid Mech. 1990. Vol. 22. pp. 473–537.
- 8 Грек Г. Р., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 208 с. + доп. материал в электронном виде, включающем презентации и видеоролики на CD-диске. ISBN 978-5-4437-0062-5.
- 9 В. Я. Рудяк, В. М. Анискин, В. В. Кузнецов, А. А. Маслов, А. В. Минаков, С. Г. Миронов. Газодинамическая структура и устойчивость газовых

- микроструй // Моделирование микро- и нанотечений, Новосибирск 2014, С. 94–114.
- 10 L. Vanquickenborne and A. van Tiggelen The stabilization mechanism of lifted diffusion flames // *Combustion and Flame*. 1966. Vol. 10. № 1. pp. 59–69.
 - 11 N. Peters, F. Williams Lift-off characteristics of turbulent jet diffusion flames // *AIAA J.* 1983. Vol. 21. No. 1. pp. 423–429.
 - 12 S. Byggstoyl, B.F. Magnussen A Model for Flame Extinction in Turbulent Flow // *Fourth Symposium on Turbulent Shear Flows* (L.J.S. Bradbury, F. Durst, F.W. Schmidt and J.H. Whitelaw, Eds) Karlsruhe. 1983. pp. 10.32–10.38.
 - 13 R.W. Schefer, M. Namazian and J. Kelly Stabilization of lifted turbulent-jet flames // *Combustion and Flame*. 1994. Vol. 99. № 1. pp. 75–86.
 - 14 Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П. Основы теории газового факела. Л.: Энергия, 1968. 203 с.
 - 15 С. Кумагаи Горение // М.: издательство «Химия». 1979. 256 с.
 - 16 Аннушкин Ю. М., Свердлов Е. Д. Исследование устойчивости диффузионных затопленных пламен при дозвуковом и нерасчетном сверхзвуковом истечениях газообразных топлив // *Химическая физика*.
 - 17 Takeno, T., & Kotani, Y. (1975). An experimental study on the stability of jet diffusion flame. *Acta Astronautica*, 2(11-12), 999–1008 Vol. 2, pp. 999-1008
 - 18 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 (JFCMV)*. 2013. Vol. 3, issue 1. P. 108–111.
 - 19 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.
 - 20 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.
- 21 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 // Докл. РАН. 2014. Т. 459, № 5. С. 562–566.
- 22 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.
- 23 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.
- 24 Agrawal, A. K. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas-jet diffusion flames / A. K. Agrawal, B. W. Albers, K. N. Alammar // Combustion Science and Technology. -2005. - Vol.177. — № 2. - P. 305-322.
- 25 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. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 3. С. 34–45.
- 26 Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности диффузионного горения микроструи водорода при различной пространственной ориентации выходного сопла // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 4. С. 60–76.
- 27 Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Влияние направление вектора ускорения силы тяжести земли на диффузионное горение микроструи водорода // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. № 45. С. 175 – 192.

- 28 Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г., Вихорев В. В. Диффузионное горение круглой микроструи водорода при до- и сверхзвуковой скорости истечения из сопла // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 2. С. 37–52.
- 29 Козлов В. В., Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов Г. В., Литвиненко Ю. А. Явление запираания микросопла при диффузионном горении водорода // Доклады академии наук, 2018, том 480, № 1, С. 1–6.
- 30 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 // Сиб. физ. журн. 2017. Т. 12. № 3. С. 62–73.
- 31 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. 28–45.
- 32 Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г., Вихорев В.В. Диффузионное горение плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости // Сиб. физ. журн. 2018. Т. 13. № 2. С. 23–36.