

На правах рукописи

Тамбовцев Александр Сергеевич

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

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Козлов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: Копьев Виктор Феликсович – доктор физико-математических наук, профессор, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», начальник отделения НИО-9.

Ершов Игорь Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», профессор кафедры математики и физики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Защита состоится «15» марта 2024 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета диссертационного совета 24.1.125.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТПМ СО РАН: www.itam.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.125.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1. (e-mail: klimchik@itam.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Гапонов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 хранением и транспортировкой водорода, а также с дороговизной производства экологически чистого 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 энергетике 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 настоящей 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.

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

Достоверность полученных 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.

Практическая значимость работы

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).

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: 10th International Seminar on Flame Structure (2023, Новосибирск, Россия), XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (2023, Санкт-Петербург, Россия), Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар», посвящённой 90-летию академика А.К. Реброва (2023, Новосибирск, Россия), XXIII Всероссийской научно-технической конференции Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2022 (2022, Пермь, Россия), 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 (2022, Новосибирск, Россия), XI Всероссийскую конференцию с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (2021, Новосибирск, Россия), 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 (2021, Новосибирск, Россия), Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвященный 75-летию

Заслуженного деятеля науки РФ Терехова В.И. (2019, Новосибирск, Россия), 56 международная научная студенческая конференция, (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 макро- и микроструйным течениям, микроструйным течениям в процессе диффузионного горения. В данной главе собраны результаты работ по экспериментальному и численному исследованию вопроса.

Во **второй главе** проведено исследование диффузионного горения одиночной микроструи водорода истекающей в затопленное воздушное пространство. В главе изложены результаты проведенного экспериментального исследования, обнаружены основные сценарии диффузионного горения и проведено сравнение с результатами, полученными в предыдущих работах. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Сопло представляет собой тонкостенную металлическую трубку с внутренним диаметром $d = 200$ мкм, удлинение канала $L = 20$ мм, таким образом соотношение $L/d = 100$ способствует формированию параболического профиля скорости на срезе сопла, согласно [1]. Из баллона (1) газ попадет в сопло (4) через клапан регулятора массового расхода газа (1179В MKS Instruments) (2), который обеспечивает точность измерений в пределах 0,7 %. Управление объемным расходом газов осуществлялось при помощи блока управления (PR 4000В-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).

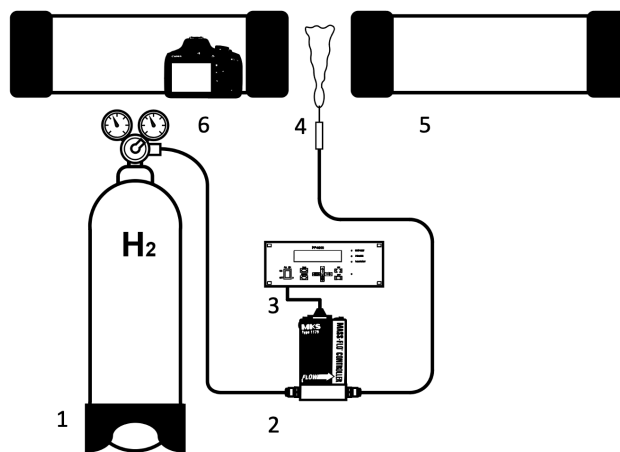


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом 2 – клапан расходомера (1179В MKS Instruments), 3 – контроллер расходомера (PR 4000В-F MKS Instruments), 4 – сопло, 5 – теневой прибор ИАБ-451, 6 – фотоаппарат.

Полученные в результате экспериментального исследования теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода для случая присоединенного факела представлены на рисунках 2 – 4. При низкой скорости истечения микроструи (вплоть до 930 м/с) результирующий факел остается ламинарным с небольшим углом распространения, как видно из рисунка 2а. Увеличение скорости истечения водорода приводит к формированию двузонной структуры пламени. Факел приобретает двузонную структуру. Первый участок пламени вблизи среза сопла приобретает характерную сферическую форму, которая наблюдалась также в [1, 2]. Во втором участке факела происходит интенсивная турбулизация потока и активное перемешивание водорода с воздухом. Вторым участком факела 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 3.

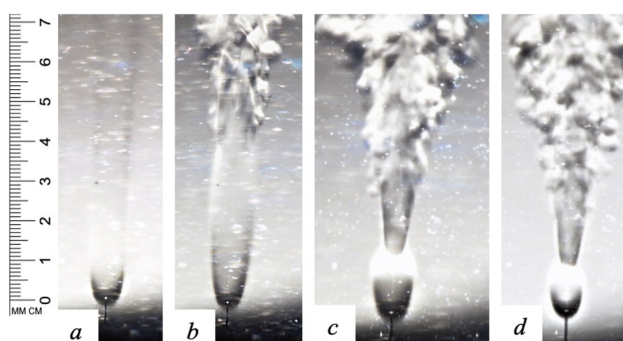


Рис. 2. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 305 м/с; б) 913 м/с; в) 1 066 м/с; д) 1188 м/с.

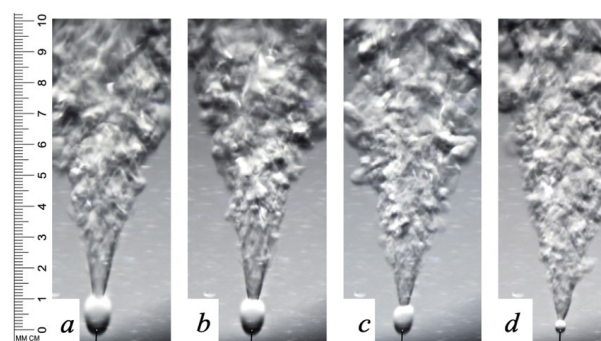


Рис. 3. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 1248 м/с; б) 1370 м/с; в) 1706 м/с; д) 2010 м/с.

Горение в двух зонах факела может происходить независимо. При высокой скорости истечения водорода горение в турбулентной области может прекращаться, при сохранении горения в первой зоне, охватывающей срез сопла. Сферическая область пламени вблизи среза сопла выступает в качестве стабилизатора процесса горения в целом, на рисунке 4 показано, как при уменьшении скорости истечения водорода, область пламени вблизи среза сопла способствует восстановлению процесса горения диффузионного факела во второй зоне. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода для случая факела оторванного от среза сопла, при воспламенении на расстоянии от среза сопла, представлены на рисунке 5.

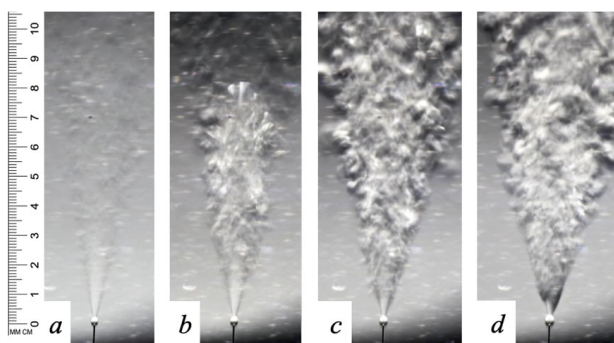


Рис. 4. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : a) 2132 м/с; b) 2040 м/с; c) 2040 м/с; d) 2010 м/с.

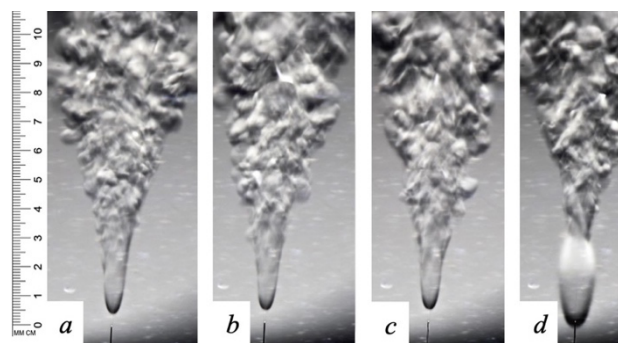


Рис. 5. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : a) 1188 м/с; b) 1096 м/с; c) 1035 м/с; d) 944 м/с.

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. Стоит отметить, что, 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. 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.

Динамика уменьшения протяженности ламинарного участка пламени согласуется с ранее полученными данными в [2, 3] в ситуации воспламенения микроструи вблизи среза сопла. На рисунке 37 показаны кривые зависимости $l/d = f(U)$, где l – протяженность ламинарного участка, d – диаметр микросопла

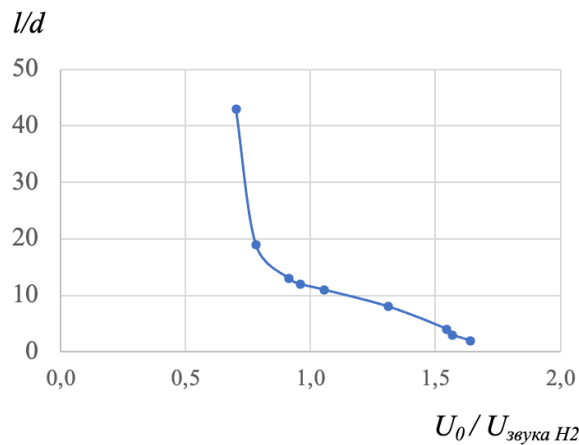


Рис. 6. Зависимость протяженности ламинарного участка пламени от скорости истечения.

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 1 выделены основные сценарии диффузионного горения для микросопел с диаметрами $d = 200$ из текущего исследования и взяты диапазоны сценариев из работы [3] для микроструи истекающей из сопла с $d = 500$ мкм.

Таблица 1

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

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 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 7. Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рисунке 8. 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).

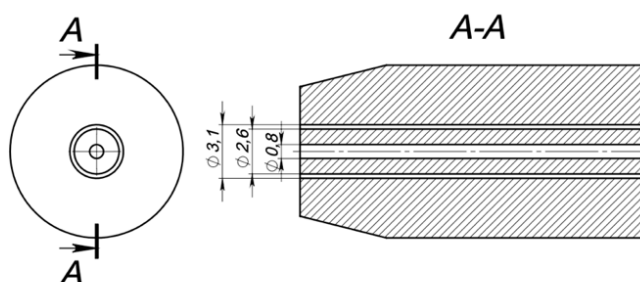


Рис. 7. Чертеж соплового устройства в разрезе.

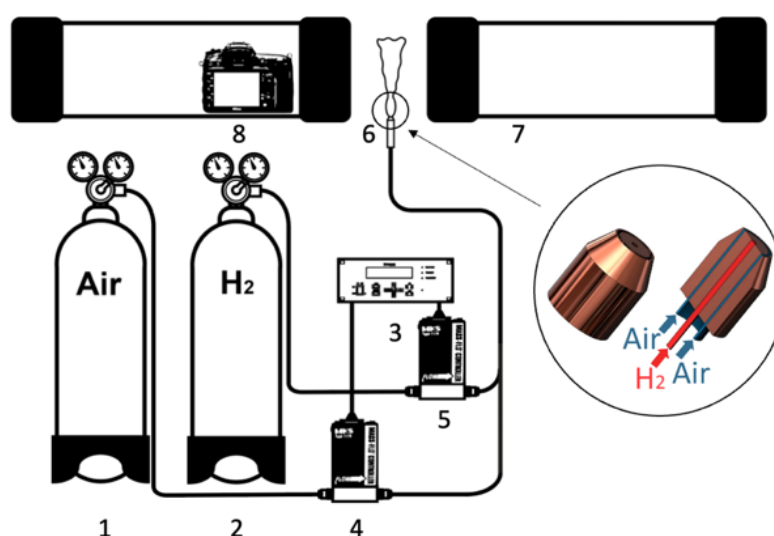


Рис. 8. 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – баллон со сжатым воздухом, 3 – контроллер расходомера, 4, 5 – клапаны расходомера, 6 – сопловое устройство, 7 – теневой прибор ИАБ – 451, 8 – цифровая камера.

На рисунке 9 показаны результаты теневой визуализации при одновременном истечении водорода из микросопла и воздуха из соосно расположенного щелевого сопла, при этом скорость истечения водорода зафиксирована, а скорость истечения воздуха постепенно увеличивается. Изначально в отсутствии спутного потока воздуха струя имеет развитую двузонную структуру факела.

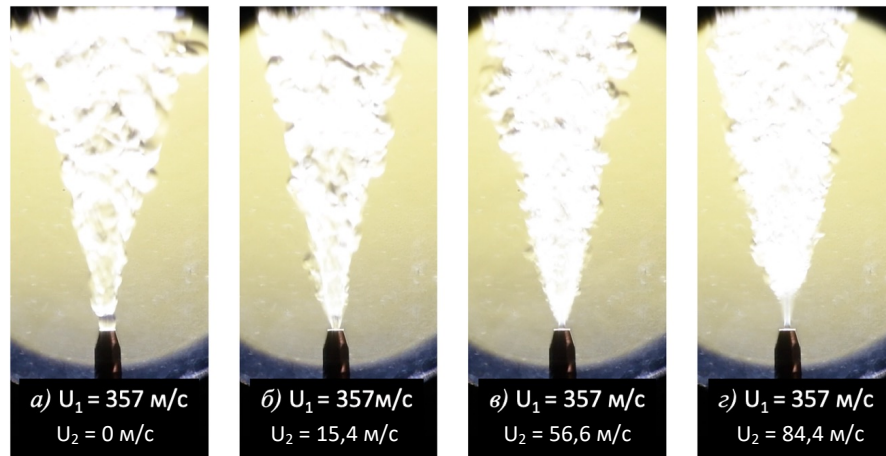


Рис. 9. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = const$) окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости истечения, срыв факела при скорости $U_2 = 86$ м/с.

Возникновение спутного потока воздуха изменяет результирующую 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.

Изначально в отсутствии спутного потока воздуха струя имеет развитую двузонную структуру факела. Возникновение спутного потока воздуха изменяет результирующую 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. На рисунке 10 представлены результаты теневой визуализации процесса диффузионного горения микроструи водорода, окруженной потоком воздуха, истекающим из соосно расположенной кольцевой щели, в этом эксперименте воспламенение производится на расстоянии от среза сопла.

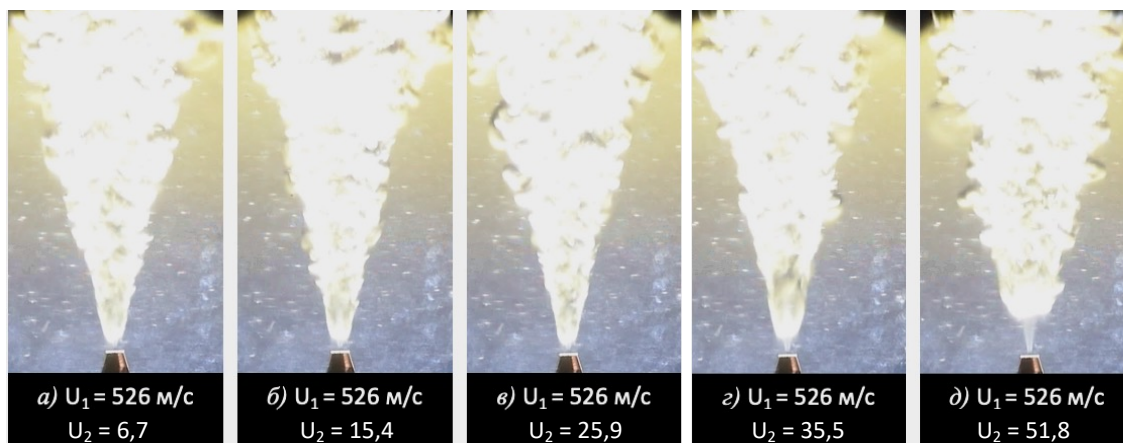


Рис. 10. Диффузионное горение микроструи водорода ($U_1 = \text{const}$) окруженной потоком воздуха из соосно расположенной кольцевой щели при различной скорости, сценарии с приподнятым над срезом сопла факелом.

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 скорости истечения воздуха к увеличению дистанции отрыва факела от среза сопла.

В четвертой главе экспериментально исследуются особенности горения спутной струи водорода в присутствии дозвуковой и сверхзвуковой струи воздуха. В экспериментах используется тот же сопловый 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.

Схема экспериментальной установки и схема подачи газов в сопловое устройство представлены на рисунке 11.

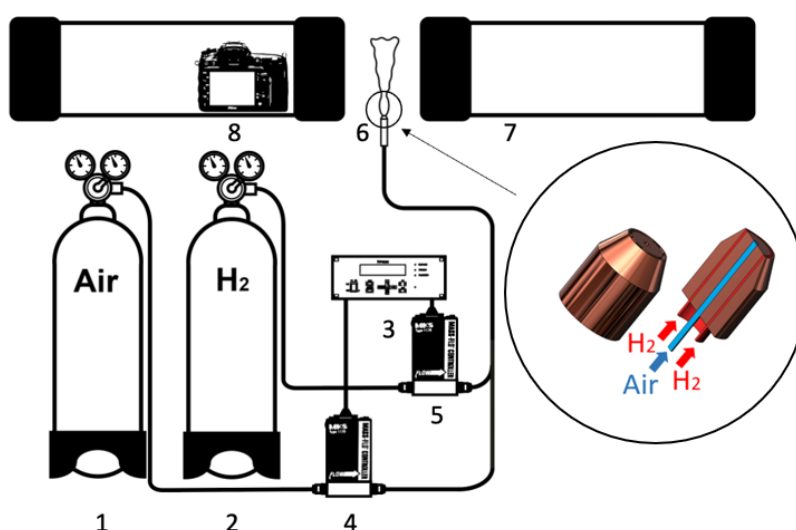


Рис. 11. 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – баллон со сжатым воздухом, 3 – контроллер расходомера, 4, 5 – клапаны расходомера, 6 – сопловое устройство, 7 – теневой прибор ИАБ – 451, 8 – цифровая камера.

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). Поджигание микроструи производилось вблизи среза сопла. Процесс диффузионного горения также визуализировался с помощью тепловизора СЕМ DT-9897Н.

Результаты теневой визуализации горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла при отсутствии истечения воздуха из центрального микросопла показаны на рисунке 12. При низких значениях расхода водорода наблюдается ламинарный факел, охватывающий верхнюю часть соплового аппарата (рисунок 12а). 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 (рисунок 12б).

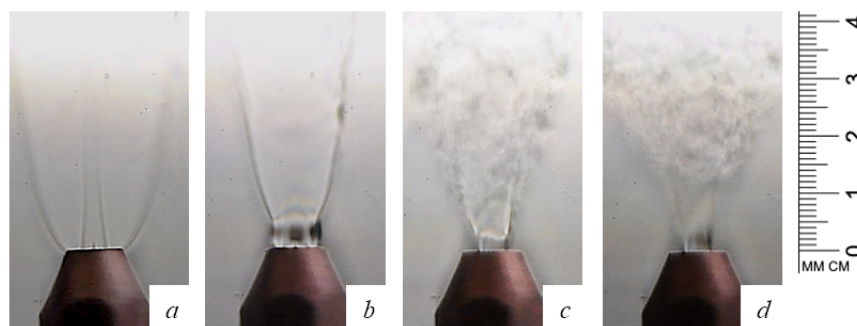


Рис. 12. Теневые картины диффузионного горения струи водорода, истекающей из кольцевого сопла, при различной скорости истечения U_2 : а) 7,5 м/с, б) 14 м/с, в) 27 м/с, г) 40 м/с.

Далее при увеличении скорости истечения водорода зона вблизи среза сопла приобретает цилиндрическую форму (рисунок 12с). При скорости истечения $U_2 = 40$ м/с происходит отрыв факела от среза сопла (рисунок 12д). 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, прикрепленного к соплу, с внешним диаметром, превышающим диаметр кольцевого сопла.

Возникновение потока воздуха, истекающего через микросопло, влияет на процесс диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из кольцевого сопла и кардинально меняет форму результирующего факела. На рисунке 13 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).

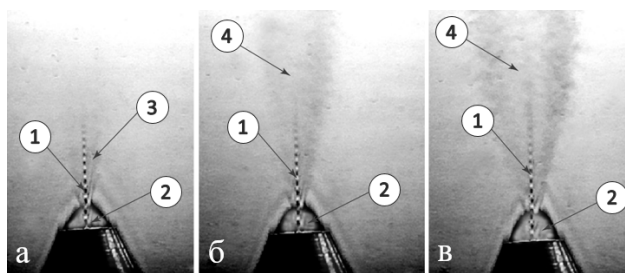


Рис. 13. Теневые картины горящей струи водорода, истекающей из кольцевой щели при различных скоростях, при наличии центральной сверхзвуковой струи воздуха $U_1=398\text{м/с}$: а) $U_2=7,5\text{м/с}$, б) $U_2=14\text{м/с}$, в) $U=17\text{ м/с}$; 1– сверхзвуковые ячейки на круглой микроструе воздуха, 2 – область «запертого» пламени, 3 – выход водорода из области 2 без горения, 4 – локальное воспламенение, неустойчивое горение.

При низкой скорости истечения водорода из кольцевого сопла, вместо полого ламинарного цилиндра, прикреплённого 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 13а). Это происходит в диапазоне скоростей истечения водорода $U_2 = 7,5 - 17\text{ м/с}$.

На рисунке 14 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.

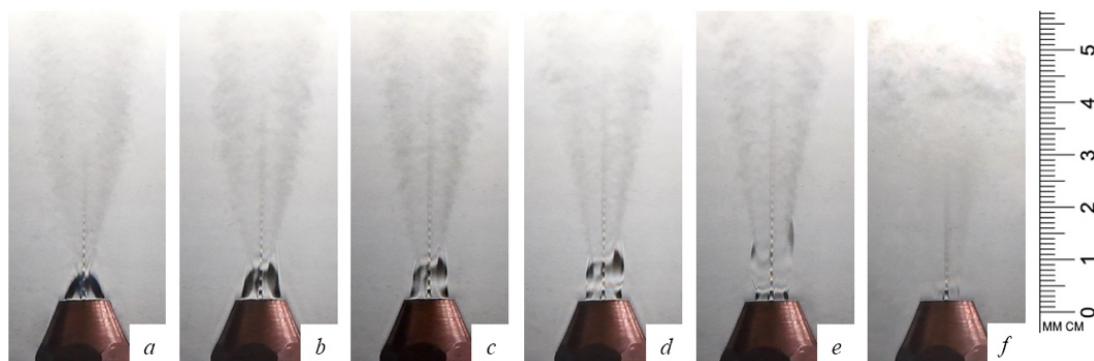


Рис. 14. Теневые картины горения H_2 при его истечении совместно со сверхзвуковым потоком воздуха при наличии центральной сверхзвуковой микроструи воздуха $U_1=398\text{м/с}$. От а) к ф) скорость истечения водорода U_2 увеличивается: а) 5 м/с , б) 17 м/с , с) 25 м/с , д) 45 м/с е) 50 м/с , ф) 60 м/с .

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 15. В данном случае скорость истечения водорода была зафиксирована, а скорость истечения воздуха регулировалась. Как видно из полученных картин, пространственные размеры зоны факела близки среза сопла, имеющей сферическую форму уменьшаются при увеличении скорости истечения струи воздуха. На рисунке 16 показана визуализация процесса горения с помощью тепловизора, при истечении воздуха со сверхзвуковой скоростью.

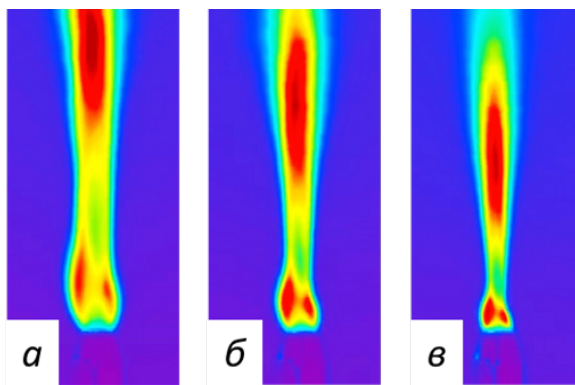


Рис. 15. Визуализация процесса диффузионного горения с помощью тепловизора: в) $U_1=49,7$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; б) $U_1=99,5$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; а) $U_1=132,6$ м/с, $U_2=47,4$ м/с.

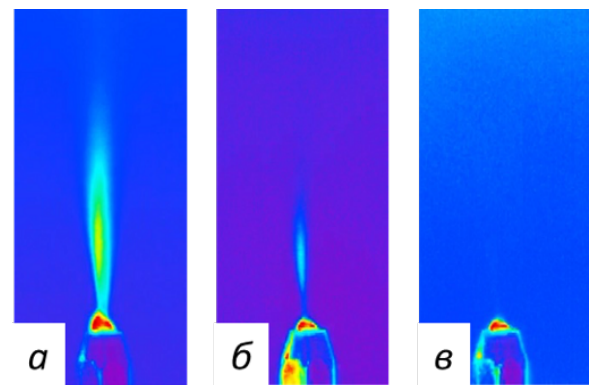


Рис. 16. Визуализация процесса диффузионного горения с помощью тепловизора: а) $U_1=451$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; б) $U_1=583,6$ м/с, $U_2=47,4$ м/с; в) $U_1=696,3$ м/с, $U_2=47,4$ м/с.

Увеличение скорости истечения воздуха также приводит к запираанию горения в области вблизи среза сопла и результирующий факел приобретает конусную форму. Истечение воздуха происходит со сверхзвуковой скоростью, что подтверждают результаты теневой визуализации, на которых присутствуют сверхзвуковые скачки уплотнений в течении.

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.

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. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 17. 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.

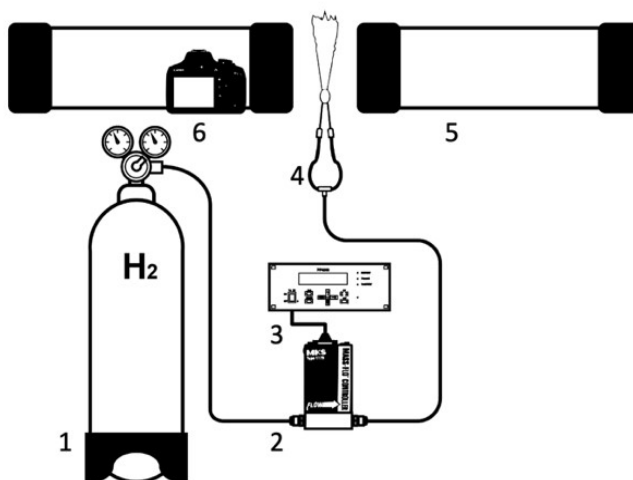


Рис. 17. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – клапан расходомера, 3 – контроллер расходомера, 4 – теневой прибор ИАБ – 451, 5 – микросопла, расположенные под углом, 6 – фотоаппарат.

На рисунке 18 показано взаимодействие ламинарных факелов. В данной постановке эксперимента использовались сопла с внутренним диаметром 400 мкм. При сближении микросопел примерно на расстояние четырех диаметров микросопла два ламинарных факела сливаются в один при этом результирующий факел также остаётся ламинарным и незначительно расширяется. На рисунке 19 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.

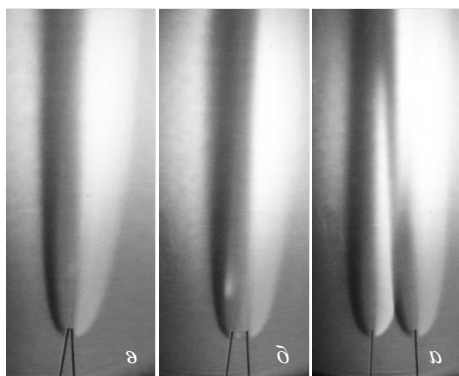


Рис. 18. Взаимодействие двух ламинарных факелов при истечении микроструй из сопел с $d_1 = d_2 = 400$ мкм, $U = 318$ м/с.

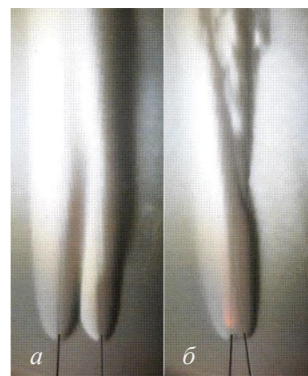


Рис. 19. Невзаимодействующие (а) и взаимодействующие пламена (б), $U = 477$ м/с ($Re = 1865$).

На рисунке 20 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. 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.

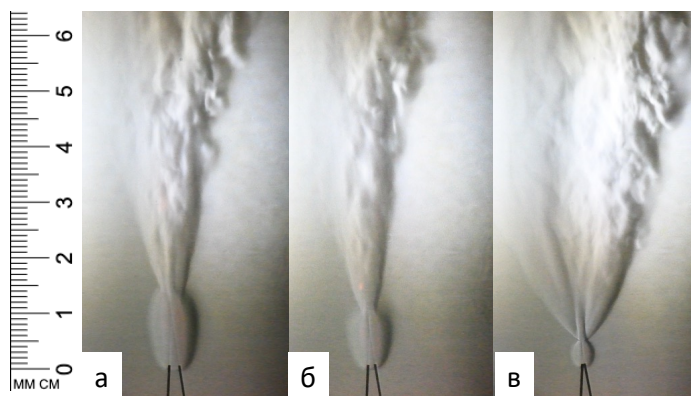


Рис. 20. Взаимодействие пламен на различном расстоянии друг от друга, $U = 761$ м/с ($Re = 3100$); расстояние между соплами: а – максимальное ($4d$), б – среднее ($2d$), в – минимальное ($0,5d$).

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 21 показана схема расположения микросопел. Они ориентированы под углом 50 градусов, такая постановка позволяет сильнее воздействовать факелам друг на друга. Здесь и далее использовались сопла с внутренними диаметрами $d_1 = d_2 = 200$ мкм.



Рис. 21. Схема расположения микросопел (слева) и фотография (справа).

На рисунке 22 показано, как выглядит истечение из одиночной микроструи, ориентированной под углом к горизонту (рисунок 21а), взаимодействие микроструй оси которых пересекаются (рисунок 21б) и взаимодействие микроструй оси которых смещены на расстояние порядка двух диаметров микросопел (рисунок 21в) при одинаковых скоростях истечения микроструй водорода. Результаты визуализации показывают, что смещение оси одной микроструи относительно другой влияет на турбулизирующее 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.

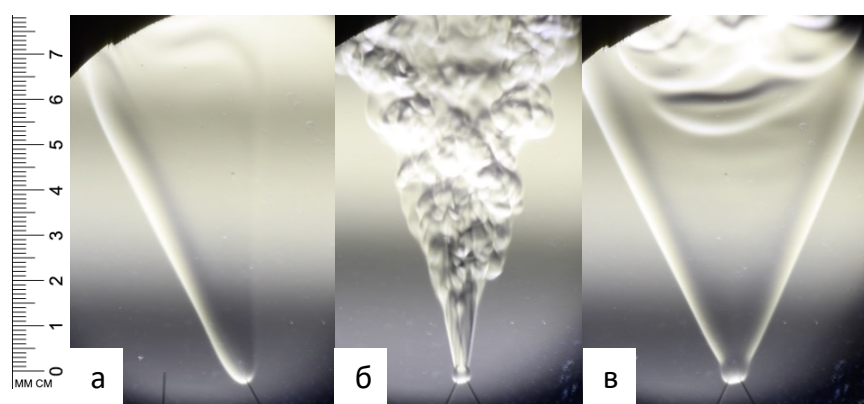


Рис. 22. Теневые картины: а) свободный факел, скорость микроструи $U = 457$ м/с ($Re = 932$) и взаимодействие присоединенных факелов: б) пересекающиеся микроструи; в) непересекающиеся микроструи, оси которых смещены на расстояние $= 2d$ истекающие при той же скорости.

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

На рисунке 23 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. Скорость истечения микроструи водорода достаточна высокая и ориентация сопел под таким углом слабо влияет на формирование двузонной структуры факела, и на протяженность ламинарного участка вблизи среза сопла, как было показано в работе [3]. При увеличении скорости истечения микроструй также постепенно увеличивается угол раскрытия результирующего факела до значения $\sim 50^\circ$, что продемонстрировано на серии теневых картин представленных на рисунке 24.

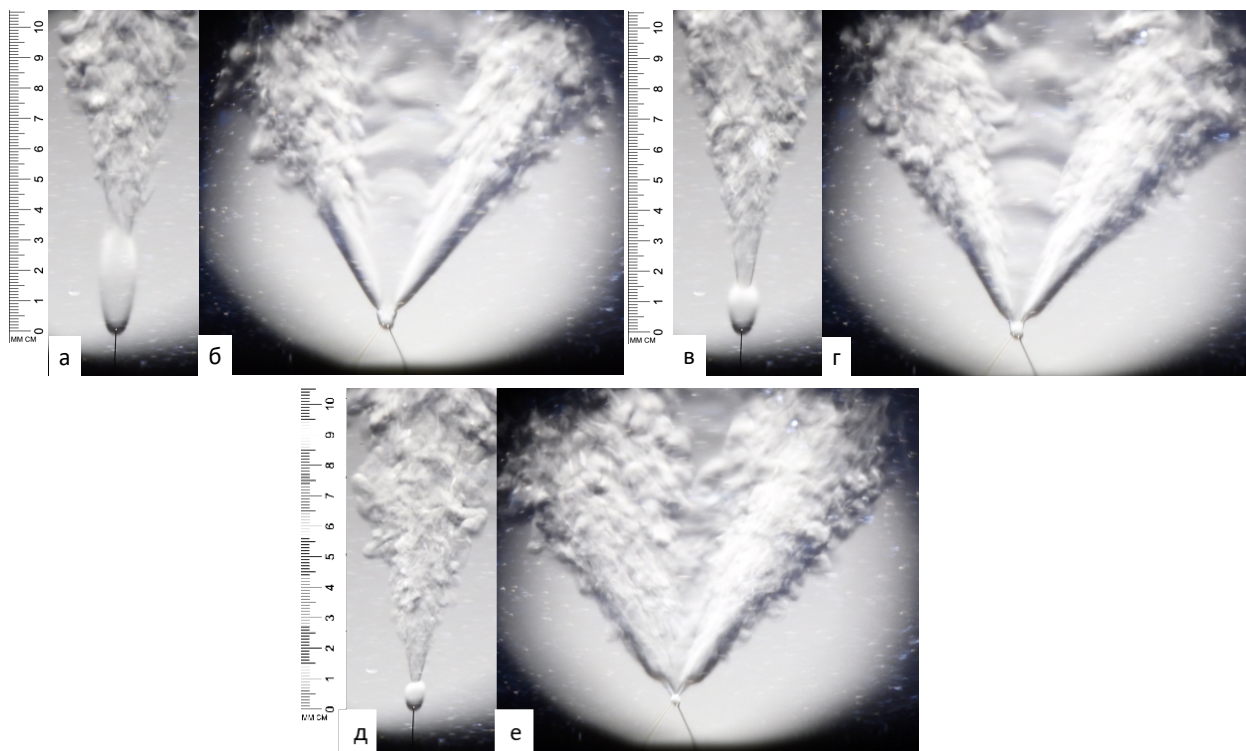


Рис. 23. Теневая визуализация, взаимодействия факелов с двузонной структурой – справа, а изначальная структура пламени микроструи при той же скорости – слева: а, б) $U=913\text{ м/с}$ ($Re=1865$); в, г) $U=1188\text{ м/с}$ ($Re=2424$); д, е) $U=1706\text{ м/с}$ ($Re=3419$).

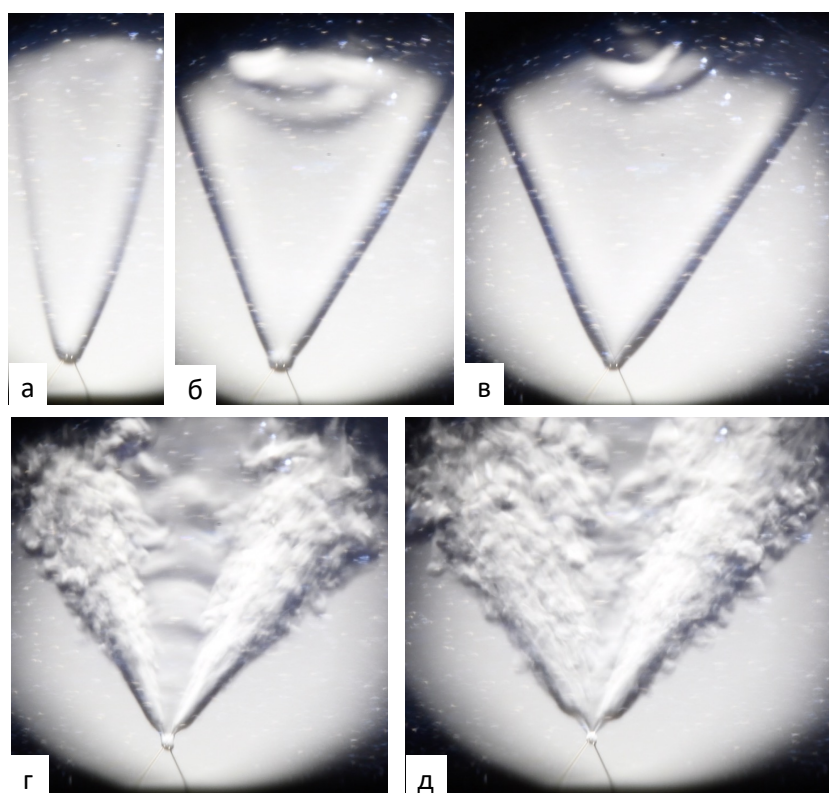


Рис. 24. Взаимодействие двух факелов при различной скорости истечения микроструй: а – $U=152\text{ м/с}$ ($Re=311$); б – $U=381\text{ м/с}$ ($Re=777$); в – $U=609\text{ м/с}$ ($Re=1243$); г – $U=1218\text{ м/с}$ ($Re=2486$); д – $U=1675\text{ м/с}$ ($Re=3419$).

Режим горения с результирующим факелом, отошедшим от среза сопел, удается реализовать при поджигании микроструй на расстоянии от среза микросопел. Теневые картины процесса взаимодействия факелов, приподнятых над срезом сопла, показаны на рисунке 24. На рисунке 24а микроструи пересекаются, на рисунке 24б микроструи не пересекаются и лежат в плоскостях, смещенных на расстояние двух калибров.

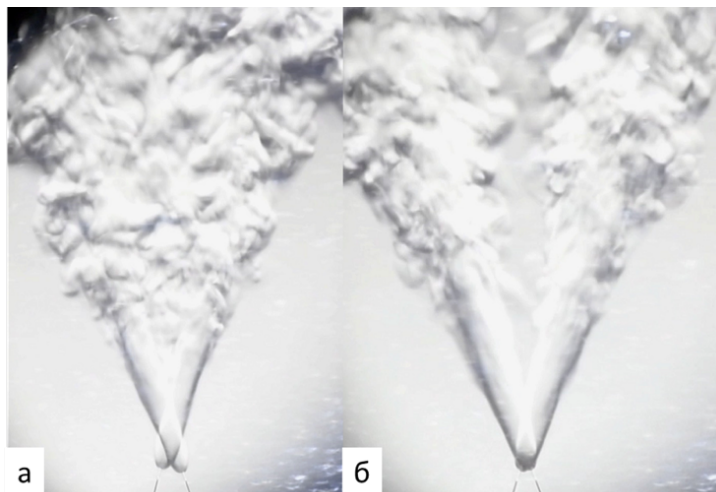


Рис. 25. Взаимодействие факелов, приподнятых над срезом сопла: а – пересекающиеся микроструи; б – непересекающиеся микроструи. $U = 914$ м/с ($Re = 1865$).

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.

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.

Используемая литература:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и 6 работ в журналах из перечня ВАК по другим специальностям:

1. Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Исследование режимов диффузионного горения микроструи водорода // Сибирский физический журнал. –2022. –Т. 17 No. 3. –С. 12-21.

2. Тамбовцев А.С., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Исследование сценариев диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. –2022.–No. 71. –С. 191-200.

3. Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Pavlenko A. M., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G. Combustion of Round Hydrogen Microjet in Concurrent Flow// Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Vol. 30 No. 2. –P. 213-224.

4. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Диффузионное горение микроструи водорода в спутной струе воздуха // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. –2021. –Т. 496 No. 1. –С. 9-13.

5. Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Диффузионное горение при взаимодействии сверхзвуковой круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. –2021. –Т. 496 No. 1.

6. Козлов В.В., Грек Г.Р., Катасонов М.М., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе воздуха // Сибирский физический журнал. –2019. –Т. 14 No. 2. –С. 21-34.

7. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей водорода при его горении на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. –2019. –Т. 14 No. 3. –С. 53-63.

8. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г. Особенности горения круглой микроструи водорода в спутной струе смеси воздуха и нанопорошка // Сибирский физический журнал. –2019. –Т. 14 No. 2. –С. 35-45.

9. Тамбовцев А.С., Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Взаимодействие круглой микроструи воздуха с коаксиальной (спутной) струей воздуха на сверхзвуковой скорости их истечения // Сибирский физический журнал. –2019. –Т. 14 No. 3. –С. 39-52.