УДК 532.525.2+544.452 DOI: 10.15372/PMTF202215145

## РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА

## А. В. Довгаль, В. В. Козлов, М. В. Литвиненко, Ю. А. Литвиненко, А. Г. Шмаков

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия E-mails: dovgal@itam.nsc.ru, kozlov@itam.nsc.ru, litmar@itam.nsc.ru, litur@itam.nsc.ru, shmakov@kinetics.nsc.ru

Представлены результаты выполненных в последние годы экспериментальных исследований диффузионного горения микроструй водорода. Изучены особенности структуры течения водорода и его горения в зависимости от формы сопла, скорости истечения струи и гравитации, а также горение водорода в смеси с другими газами и периодическое воздействие на микроструи, в данном случае внешними акустическими колебаниями.

Ключевые слова: струйное течение, микроструя водорода, диффузионное горение, гидродинамическая устойчивость

Введение. В настоящее время при выработке энергии в основном используются ископаемые углеводороды. В последние десятилетия нашли применение и продолжают разрабатываться альтернативные технологии выработки энергии из возобновляемых источников. Одной из таких технологий является водородная энергетика, предполагающая сжигание водорода, выделяемого из воды, запасы которой на земле практически не ограничены. Продуктом реакции является также вода — экологически чистый продукт. Водородная энергетика не получила до настоящего времени широкого распространения во многом вследствие технических проблем, обусловленных тем, что водород представляет собой пожарои взрывоопасный продукт. Методы его выделения, транспортировки и хранения остаются предметом научных и конструкторских разработок. Поэтому представляет интерес исследование горения струйных течений водорода, возникающих при использовании различного рода форсунок, горелок и сопел.

В настоящей работе рассматриваются результаты исследований горения микроструй водорода. Под микроструями понимаются течения за срезом сопла, имеющего плоское либо круглое поперечное сечение и поперечный размер менее 3 мм. Предварительно были проведены исследования динамики "макроструйных" течений, при этом особое внимание уделялось характерной для них гидродинамической неустойчивости, определяющей формирование структуры течения и соответственно характер горения. В частности, результаты экспериментов показали, что разрушение круглой струи и ее переход в турбулентный режим существенно зависят от начального профиля скорости на срезе сопла. В случае "ударного" (П-образного) распределения скорости (top-hat) преобладает неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, приводящая к сравнительно быстрой турбулизации течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 22-19-00151 https://rscf.ru/project/22-19-00151/).

<sup>©</sup> Довгаль А. В., Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г., 2023

При формировании параболического профиля скорости на срезе сопла струя остается ламинарной на большом протяжении, сохраняя дальнобойность. Результаты исследований струйного горения в различных условиях (форма сопла, начальное распределение скорости, внешние воздействия на горение струи) представлены в работах [1–3].

Также представляет интерес исследование перспективных методов управления струйными течениями водорода и его горением. Одним из этих методов является периодическое возбуждение струи внешними акустическими колебаниями. Такой подход к модификации режима горения использовался, например, в работах [4, 5]. Результаты исследований показали, что контролируемое периодическое воздействие на струю водорода оказывает значительное влияние на вихревую структуру течения, интенсивность смешения водорода с окружающим воздухом, в том числе эмиссию оксидов азота при оптимальной частоте акустического возбуждения.

Указанные выше и другие экспериментальные данные о горении водорода в крупномасштабных струйных течениях являются основой для экспериментального изучения динамики, неустойчивости течения и горения водорода в малых масштабах (микроструй).

1. Методы исследования. Эксперименты проводились на струйной установке Института теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН с использованием круглых или щелевых сопел различного поперечного сечения на срезе. На рис. 1 приведена общая экспериментальная схема, которая варьировалась в зависимости от цели исследования. Водород в установку подавался из баллона через редуктор, расход газа контролировался с помощью расходомера. Минимальная неоднородность струйного течения и его фоновых возмущений достигалась с помощью хонейкомба и детурбулизирующих сеток,



Рис. 1. Схема установки для исследования горения микроструй водорода: 1—сопло, 2—регулятор расхода, 3—форкамера, 4—громкоговоритель, 5—камера, 6— теневой прибор ИАБ-451, 7—микроструя

расположенных перед соплом (на рис. 1 представлена схема для щелевого сопла переменного сечения). Для изучения влияния внешнего периодического воздействия на развитие и горение микроструи она возбуждалась акустическими колебаниями, которые генерировались динамическим громкоговорителем, расположенным вблизи среза сопла.

**2.** Результаты экспериментов. Представленные в настоящей работе экспериментальные данные о диффузионном горении микроструй водорода получены, как правило, с использованием метода Теплера и путем регистрации теневой картины на видеокамеру.

2.1. Структура пламени при диффузионном горении микроструй водорода. Изучение струйного течения водорода и его диффузионного горения проводилось с использованием сопел различной формы — круглой и щелевой. В обоих случаях была обнаружена такая особенность структуры течения и горения, как возникновение области "перетяжки пламени". Это явление отмечено в работе [6] без детального анализа его характеристик.

Область "перетяжки пламени" представляет собой близкую к сферической зону струйного течения вблизи среза микросопла (рис. 2). В пределах этой зоны струя и ее горение остаются ламинарными, на периферии струи происходит формирование вихревого движения (тороидальных вихрей). Сферическая область течения окружена тонким слоем с большим градиентом плотности среды, при преодолении которого ламинарная струя разрушается и происходит переход к режиму турбулентного горения. Результаты исследований показали, что подобная структура струйного течения наблюдается в широком диапазоне значений параметров (поперечного размера сопла и скорости истечения (объемного расхода) водорода).

Картины течения вблизи среза сопла в условиях образования области "перетяжки пламени" и в ее отсутствие показаны на рис. 3. В работе [6] предполагалось, что особенности течения могут быть обусловлены его начальным состоянием — распределением средней скорости струи на срезе сопла. Вместе с тем результаты настоящих исследований позволяют сделать вывод о том, что пространственная структура горения зависит от длины канала микросопла: по мере ее увеличения наблюдается исчезновение области "перетяжки пламени" (см. рис. 3). Зависимость режима горения микроструй водорода от начальных условий остается предметом исследований.



Рис. 2. Теневая картина круглой микроструи водорода вблизи среза сопла: 1 — сопло, 2 — ламинарная струя, 3 — турбулентная струя, 4 — градиент плотности среды,

5 — область "перетяжки пламени", 6 — турбулентное пламя, 7 — тороидальные вихри



Рис. 3. Теневые картины пламени при горении плоской микроструи водорода вблизи среза сопла с образованием области "перетяжки пламени" (a) и в ее отсутствие (b)

2.2. Влияние ориентации струи в гравитационном поле на ее диффузионное горение. Помимо геометрических характеристик микросопла, профиля скорости струи на его срезе и расхода водорода характер горения зависит от ряда других условий, в частности от ориентации струи в поле тяготения. В экспериментах исследовались три варианта распространения струи: вдоль направления вектора силы тяжести, в противоположном и перпендикулярном ему направлениях [7]. Рассматривались круглые микроструи с "ударным" и параболическим профилями скорости, которые формировались при сравнительно малом и большом отношениях длины канала сопла к его поперечному сечению. Кроме того, экспериментальные данные получены с использованием микросопел с различной толщиной стенки, что также оказывает влияние на теплообмен горящей струи с окружающим ее материалом вблизи среза сопла. Основное внимание уделялось изучению образования области "перетяжки пламени" [7].

Полученные результаты обобщены на рис. 4, где представлены зависимости длины области "перетяжки пламени" l, отнесенной к диаметру сопла d, от объемного расхода водорода Q (скорости течения на оси струи  $U_0$ ).

Во всех случаях область "перетяжки пламени" уменьшается с увеличением расхода водорода. Положение кривых на рис. 4 зависит от начальных условий на срезе сопла: распределения скорости струи и ее теплообмена с внешней средой. Следует отметить зависимость приведенных на рис. 4 результатов от ориентации струйного течения относительно направления силы тяжести, что, предположительно, обусловлено эффектом плавучести.

2.3. Зависимость диффузионного горения микроструи водорода от способа ее воспламенения. Помимо рассмотренных выше условий горение микроструи водорода зависит от того, каким образом происходит ее воспламенение: вблизи среза сопла или вдали от него. Диффузионное горение микроструй в этих двух случаях изучалось в работах [8, 9]. В случае воспламенения вблизи сопла реализуется описанная выше структура течения с образованием области "перетяжки пламени" вблизи среза сопла, процесс горения остается стабильным в широком диапазоне значений расхода водорода с сохранением области "перетяжки пламени" вплоть до достижения трансзвуковых скоростей истечения струи. Во втором случае (поджиг вдали от сопла) указанная область не возникает и наблюдается "поднятое" пламя, не контактирующее с соплом. При этом происходит переход к устойчивому горению струи при сверхзвуковом истечении. В экспериментах для формирования сверхзвуковых микроструй использовались сопла Лаваля. На теневых картинах течения (рис. 5) видно, что области "перетяжки пламени" исчезают и появляются сверхзвуковые ячейки.



Рис. 4. Зависимость длины области "перетяжки пламени" от объемного расхода водорода (скорости течения) для параболического в случае "тонкостенного" (1–3) и "ударного" в случае "толстостенного" (4–6) сопел:

1, 4 — распространение струи противоположно силе тяжести, 2, 5 — распространение струи в направлении силы тяжести, 3, 6 — распространение струи перпендикулярно направлению силы тяжести, 7 — прекращение горения микроструи



Рис. 5. Теневые картины диффузионного горения микроструи водорода при ее поджиге вдали от среза сопла по мере увеличения скорости течения: a - U = 691 м/с,  $\delta - U = 755$  м/с,  $\epsilon - U = 880$  м/с,  $\epsilon - U = 1006$  м/с,  $\partial - U = 1019$  м/с

По мнению авторов данной работы, стабилизация горения микроструи водорода при ее воспламенении вблизи среза сопла обусловлена образованием области "перетяжки пламени", которая при контакте с микросоплом нагревает его. В условиях поджига высокоскоростной микроструи вдали от среза сопла ее устойчивая структура поддерживается генерацией сверхзвуковых ячеек струйного течения.

2.4. Горение смеси водорода с другими газами. Влияние газообразных добавок (метана, гелия, азота и кислорода) к микроструе водорода на ее структуру и горение изучалось в экспериментальной работе [10]. В опытах тот или иной газ смешивался в различных пропорциях с водородом на входе в струйную установку; данные получены для течений с осесимметричным параболическим профилем скорости на срезе сопла.

В целом горение газовой смеси аналогично горению струи чистого водорода. Вместе с тем наличие добавок оказывает влияние на структуру течения при изменении их концентрации и скорости потока. На рис. 6 приведены теневые картины диффузионного горения чистого водорода и его смеси с метаном при различных значениях массового соотношения k водорода (мг) и метана (мг).



Рис. 6. Теневые картины диффузионного горения круглой микроструи смеси водорода с метаном при скорости истечения струи U = 408 м/с, диаметре выходного сопла d = 500 мкм и различных значениях k:

а — водород (7,2 мг/с), б — k=1,87, <br/> — k=0,87, г — k=0,54, d — k=0,38, <br/> — k=0,32, ж — k=0,27, з — k=0,22

В газовой смеси основные стадии эволюции микроструи (отрыв зоны турбулентного горения от области "перетяжки пламени", срыв турбулентного пламени и полное прекращение горения) с ростом ее скорости остаются прежними, но в другом диапазоне значений. В частности, при добавлении метана указанные особенности горения наблюдаются при значительном уменьшении скорости микроструи. Результаты экспериментов также показали, что стабилизация диффузионного горения водорода с включением метана, гелия и азота достигается путем увеличения концентрации водорода (уменьшения концентрации примеси). Добавление кислорода к микроструе снижает скорость, при которой поддерживается ее диффузионное горение.

2.5. Особенности горения водорода в спутной струе. В работе [11] исследовалось горение микроструй водорода в спутном потоке, их взаимодействие с воздушной струей, истекающей из коаксиальной щели, окружающей микросопло, и осесимметричной струей воздуха с включением наноразмерных частиц. Результаты получены при до- и сверхзвуковых скоростях течения.

При дозвуковой скорости струи влияние спутного потока воздуха на горение водорода проявлялось в изменении размеров и формы области "перетяжки пламени". При этом интенсивность турбулентного горения за пределами данной области возрастала с увеличением скорости спутной воздушной струи (рис. 7). В целом диффузионное горение водорода, за исключением отдельных деталей, происходило аналогично наблюдаемому при истечении микроструи в неподвижный воздух. При переходе к сверхзвуковым скоростям течения принципиальные отличия горения микроструи в коаксиальном воздушном потоке и в его отсутствие также не были обнаружены.

В случае спутной струи с добавлением нанопорошка, в качестве которого использовалась двуокись титана (TiO<sub>2</sub>) с массовой концентрацией 4 мг/дм<sup>3</sup>, данные получены при различных значениях скорости микроструи водорода, спутного потока и их соотношения. Горение микроструи в этих условиях показано на рис. 8. В случае смешения водорода со спутной струей происходит воспламенение смеси воздуха с наноразмерным материалом, которое отчетливо видно на теневой картине течения. Также в экспериментах обнаружено практически полное исчезновение области "перетяжки пламени" при увеличении скорости водородной микроструи до трансзвуковых значений. В остальных случаях диффузионное горение водорода аналогично описанному в указанных выше работах.



Рис. 7. Теневые картины горения микроструи водорода (U = 204 м/с) при увеличении скорости спутной струи воздуха:  $a - U_{air} = 0, \ \delta - U_{air} = 17,5$  м/с,  $\epsilon - U_{air} = 35$  м/с,  $\epsilon - U_{air} = 50$  м/с



Рис. 8. Теневые картины горения круглой микроструи водорода в неподвижном воздухе (*a*) и при наличии спутной струи воздуха с добавлением наночастиц (*б*)



Рис. 9. Теневые картины горения микроструи с оторвавшимся от среза сопла пламенем и сверхзвуковыми ячейками по мере увеличения расхода водорода Q:  $a - Q = 140 \text{ см}^3/\text{мин}, \ \delta - Q = 141 \text{ см}^3/\text{мин}, \ \epsilon - Q = 144 \text{ см}^3/\text{мин}, \ \epsilon - Q = 151 \text{ см}^3/\text{мин}; 1$ — сверхзвуковые ячейки, 2— пламя, 3— микросопло, 4— микроструя

2.6. Диффузионное горение высокоскоростной микроструи. Пространственная структура течения в сверхзвуковой микроструе и ее диффузионное горение исследованы в работе [12]. Режим больших скоростей потока достигался с использованием тонкостенных сопел Лаваля, изготовленных из металла и пирекс-стекла.

Основные стадии горения, сменяющие друг друга по мере увеличения расхода водорода, аналогичны наблюдавшимся при дозвуковых скоростях потока и включают ламинарное в области "перетяжки пламени" и турбулентное за ее пределами горение с последующим исчезновением зоны ламинарного течения вблизи среза сопла, отрывом турбулентного пламени и прекращением горения микроструи при достаточно большом расходе водорода (скорости потока). Видимым отличием сверхзвукового течения от дозвукового является ячеистая структура микроструи (рис. 9).

Очевидно, смена указанных выше режимов горения обусловлена температурным фактором, а именно теплоемкостью сопла. В проведенных экспериментах использовались тонкостенные сопла, быстрое охлаждение которых препятствовало сохранению области "перетяжки пламени" в широком диапазоне значений скорости потока.

2.7. Горение микроструи водорода в акустическом поле. На пространственную структуру и режимы горения микроструи вблизи среза сопла помимо начальных условий истечения могут оказывать влияние внешние контролируемые воздействия. Представляет интерес изучение реакции микроструи на акустическое воздействие. Известно, что струйные течения и слои смешения газов (жидкостей) чувствительны к периодическим колебаниям окружающей среды, которые оказывают влияние на вихреобразование и переход в турбулентное состояние. Предположительно, аналогичные эффекты имеют место при горении водорода.

Экспериментальное исследование горения круглой микроструи при ее возбуждении поперечными относительно направления потока акустическими колебаниями проведено в работе [10]. Изменение структуры пламени, обнаруженное авторами работы [10], заключалось в его раздвоении (рис. 10). Очевидно, это распространенное явление, которое наблюдалось и при горении круглой микроструи пропана в поперечном акустическом поле [12, 13]. Раздвоение струйного течения водорода и его пламени выявлено также в плоском микросопле [12], но в этом случае оно вызвано шумом самой струи, и искусственная генерация поперечного акустического поля не требовалась. Отмеченные особенности обусловлены развитием синусоидальной неустойчивости, характерной для уплощенных струй, что в свою очередь приводит к бифуркации струи. В случае щелевого микросопла струя изначально подвержена этой неустойчивости, которая стимулируется внешним шумом, тогда как при осесимметричной конфигурации сопла подобный бифуркационный режим течения формируется под воздействием периодических акустических колебаний.



Рис. 10. Развитие присоединенного пламени круглой струи водорода (U = 109 м/c) в условиях акустического возбуждения ( $f = 7 \div 15 \text{ к}\Gamma \text{ц}$ ) (a) и в его отсутствие ( $\delta$ )

В работе приведены экспериментальные результаты, дано общее представление об особенностях горения микроструи водорода в различных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

- Грек Г. Р. Устойчивость дозвуковых струйных течений: Учеб. пособие / Г. Р. Грек, В. В. Козлов, Ю. А. Литвиненко. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2012.
- Грек Г. Р. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. пособие / Г. Р. Грек, В. В. Козлов, Ю. А. Литвиненко. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2013.
- Kozlov V. V. Visualization of conventional and combusting subsonic jet instabilities / V. V. Kozlov, G. R. Grek, Yu. A. Litvinenko. Dordrecht: Springerbook, 2015.
- Oh J., Heo P., Yoon Y. Acoustic excitation effect on NO<sub>x</sub> reduction and flame stability in a lift ed non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air // Intern. J. Hydrogen Energy. 2009. V. 34. P. 7851–7861.
- Kim M., Choi Y., Oh J., Yoon Y. Flame vortex interaction and mixing behaviors of turbulent non-premixed jet flames under acoustic forcing // Combust. Flame. 2009. V. 156. P. 2252–2263.
- Ajay K. A., Burt W. A., Khalid N. A. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas jet diffusion flames // Combust. Sci. Technol. 2005. V. 177, N 2. P. 305–322.
- Kozlov V. V., Vikhorev V. V., Grek G. R., et al. Diffusion combustion of a hydrogen microjet at variations of its velocity profile and orientation of the nozzle in the field of gravitation // Combust. Sci. Technol. 2019. V. 191, N 7. P. 1219–1235.
- Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В. и др. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Ч. 1. Присоединенное пламя, дозвуковое течение // Сиб. физ. журн. Сер. Физика. 2017. Т. 12, вып. 2. С. 27–45.
- Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко М. В. и др. Экспериментальное исследование диффузионного горения высокоскоростной круглой микроструи водорода. Ч. 2. Приподнятое пламя, сверхзвуковое течение // Сиб. физ. журн. Сер. Физика. 2017. Т. 12, вып. 2. С. 46–59.

- Shmakov A. G., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A. Effect of inert and reactive gas additives to hydrogen and air on blow-off of flame at hydrogen release from microleakage // Intern. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46, iss. 2. P. 2796–2803. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.088.
- Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., et al. Combustion of round hydrogen microjet in concurrent flow // J. Engng Termophys. 2021. V. 30, N 2. P. 1–12.
- Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., et al. Combustion of hydrogen in round and plane microjets in transverse acoustic field at small Reynolds numbers as compared to propane combustion in the same conditions. Pt 1 // Intern. J. Hydrogen Energy. 2016. V. 41, iss 44. P. 20231–20239.
- Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П. и др. 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. Сер. Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.

Поступила в редакцию 31/V 2022 г., после доработки — 31/V 2022 г. Принята к публикации 27/VI 2022 г.