

Научная статья

УДК 532.525.5

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21

Исследование режимов диффузионного горения микроструи водорода

Виктор Владимирович Козлов¹, Мария Викторовна Литвиненко²
Юрий Алексеевич Литвиненко³, Александр Сергеевич Тамбовцев⁴
Шмаков Андрей Геннадиевич⁵

^{1,4}Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹⁻⁵Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

⁵Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия

¹kozlov@itam.nsc.ru

²litmar@itam.nsc.ru

³litur@itam.nsc.ru

⁴alsetams@gmail.com

⁵shmakov@kinetics.nsc.ru

Аннотация

В работе экспериментально изучаются сценарии диффузионного горения круглой микроструи водорода, истекающей из цилиндрического тонкостенного микросопла диаметром 200 мкм при поджигании вблизи и на расстоянии от среза сопла. Полученные экспериментальные данные сравниваются с ранее полученными, результаты выражены в безразмерных параметрах (через числа Рейнольдса). Установлено, что стабилизация пламени при истечении круглой микроструи водорода связана с нагревом сопла сферической областью пламени, охватывающей его срез. Показан гистерезис процесса диффузионного горения круглых микроструй водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и от изменения скорости истечения (возрастания или уменьшения).

Ключевые слова

круглая микроструя водорода, диффузионное горение, воспламенение, режимы горения

Источник финансирования

Статья поддержана грантом Российского научного фонда № 22-19-00151, <https://rscf.ru/project/22-19-00151/>.

Для цитирования

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, № 3. С. 12–21. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21

Study of the Regimes of Diffusive Combustion of a Hydrogen Microjet

Viktor V. Kozlov¹, Maria V. Litvinenko², Yuriy A. Litvinenko³
Alexander S. Tambovtsev⁴, Andrey G. Shmakov⁵

^{1,2}Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁻⁵Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

⁵Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹kozlov@itam.nsc.ru; ²litmar@itam.nsc.ru; ³litur@itam.nsc.ru
⁴alsetams@gmail.com; ⁵shmakov@kinetics.nsc.ru

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of scenarios of diffusion combustion of a microjet of hydrogen flowing out of a cylindrical micronozzle with a diameter of 200 μm . The hydrogen microjet is ignited near the nozzle exit and at a distance. The experimental data are compared with the data previously obtained, and the results are expressed in dimensionless parameters (in terms of Reynolds numbers). It is established that the stabilization of flame during the outflow of a circular micro jet of hydrogen is associated with the presence of heating of the nozzle by a spherical flame region covering the nozzle section. The hysteresis of the diffusion combustion process of circular hydrogen microjets is shown depending on the ignition location of the microjet (near or far from the nozzle exit) and the change in the flow rate (growth or decrease).

Keywords

round microjet of hydrogen, diffusion combustion, inflammation, mechanisms of combustion

Funding

This research was supported by the Russian Science Foundation (RSF) project No. 22-19-00151, <https://rscf.ru/22-19-00151/>.

For citation

Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Litvinenko Yu. A., Tambovtsev A. S., Shmakov A. G. Study of the Regimes of Diffusive Combustion of a Hydrogen Microjet. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 12–21. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-12-21

Введение

Ламинарно-турбулентный переход в дозвуковых струях изучен достаточно подробно как теоретически, так и экспериментально [1–6]. Профиль распределения скорости на срезе классических сопел конфузорного типа при больших числах Рейнольдса ($Re > 104$) имеет П-образную форму. Ламинарно-турбулентный переход при этом происходит в пределах начального участка струи в слое смешения. В этом случае основная неустойчивость, приводящая к разрушению струи, – неустойчивость Кельвина – Гельмгольца. Присоединение к классическому соплу удлиненного цилиндрического канала приводит к формированию параболического профиля скорости на срезе сопла, формированию ламинарного участка струи большей протяженности (при той же скорости истечения) и смещению переходного участка далее по потоку [5].

Микроструйные течения обладают характерными особенностями. Ввиду объективных сложностей, связанных с экспериментальным исследованием микроструй, а также с трудностью изготовления микросопел с заданными параметрами, они исследованы недостаточно подробно. Дальнобойность микроструй диаметром от 10 до 60 мкм, в несколько раз превышающая дальнобойность макроструй, отмечалась в работе [7]. В работе [8] исследован сценарий турбулизации для струй, истекающих из сопел с диаметрами 200–600 мкм. Несмотря на то, что экспериментальное измерение профиля скорости в течении не представлялось возможным, были проведены эксперименты как с коротким, так и с длинным соплом. В обоих случаях микроструи имели протяженный ламинарный участок, однако стоит отметить, что в случае канала,

формирующего параболический профиль скорости, этот участок был больше, при этом неустойчивости Кельвина – Гельмгольца обнаружено не было.

Экспериментальные исследования диффузионного горения микроструи водорода [9–14] показали наличие различных сценариев для данного процесса в зависимости от скорости истечения газа для сопел диаметром от 250 до 1 000 мкм. Обнаружены следующие сценарии диффузионного горения: 1) ламинарное пламя большой протяженности; 2) возникновение области ламинарного горения сферической формы с наличием в ней ламинарной микроструи вблизи среза сопла и турбулизацией пламени далее по потоку; 3) турбулентное пламя, приподнятое над срезом сопла, при сохранении горения ламинарного участка; 4) прекращение горения турбулентного участка при сохранении горения в ламинарном, причем горение в ламинарном участке сохраняется вплоть до трансзвуковых скоростей истечения газа, однако при наличии эффекта запирания микросопла; 5) прекращение горения микроструи. Запирание сопла происходило при достижении скорости истечения микроструи водорода, близкой к скорости звука в воздухе ($U_0 \approx 331$ м/с). Стабилизация горения как круглой, так и плоской микроструей обеспечивалась горением в ламинарном сферическом участке, охватывающем срез сопла.

Выйти на диффузионное горение микроструи водорода при сверхзвуковом истечении газа и при поджигании микроструи вблизи среза сопла не удавалось из-за запирания сопла. Ламинарный участок сферической формы охватывал срез сопла, что приводило к его нагреву и препятствовало режиму горения с факелом, приподнятым над срезом сопла. Одна из характеристик сверхзвукового струйного течения (наряду с некоторыми другими) – наличие сверхзвуковых ячеек как в струе, так и в пламени. Это детально продемонстрировано в работах [15–18] при воспламенении круглой микроструи водорода вдали от среза сопла.

1. Экспериментальная установка и методы измерения

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. В работе используется металлическая цилиндрическая насадка с внутренним диаметром 200 мкм. Из баллона (1) газ попадет в сопловое устройство (4) через клапан регулятора массового расхода газа (MKS Instruments) (2), обеспечивающие точность $\pm 0,7\%$. Управление объемным расходом газов осуществлялась при помощи блока управления (3). Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U = Q/S$, где S – площадь поперечного сечения насадки. Поджигание микроструи производилось как вблизи среза микросопла, так и на расстоянии от него – для реализации режима горения с факелом, приподнятым над срезом сопла. Теневые картины диффузионного горения получены при помощи прибора ИАБ-451 (5), съемка производилась с помощью цифрового фотоаппарата (6). Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U_0 = Q/S$, где S – площадь поперечного сечения сопла.

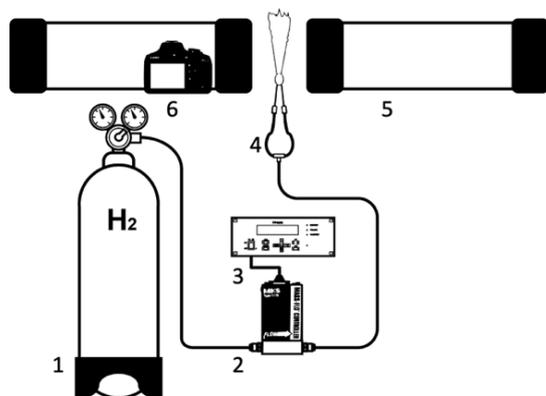


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом 2 – клапан расходомера, 3 – контроллер расходомера, 4 – сопло, 5 – теневой прибор ИАБ-451, 6 – фотоаппарат

Fig. 1. Experimental setup: 1—cylinder with compressed hydrogen, 2—flow meter valve, 3—flow meter controller, 4—nozzle, 5—shadow device IAB-451, 6—camera

1.1. Диффузионное горение круглой микроструи водорода, при воспламенении вблизи среза сопла

Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода в диапазоне расходов $Q = 29,7\text{--}37,3$ см³/сек представлены на рисунке 2. При воспламенении водорода вблизи среза сопла реализуются сценарии, описанные в работах [9–14].

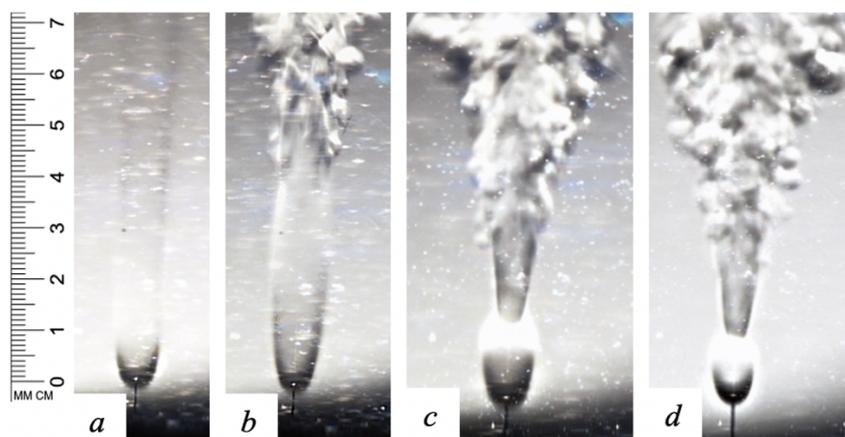


Рис. 2. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : a) 305 м/с; b) 913 м/с; c) 1 066 м/с; d) 1 188 м/с

Fig. 2. Shadow images of a hydrogen microjet at different velocities U_0 : a) 305 m/s; b) 913 m/s; c) 1,066 m/s; d) 1,188 m/s

При среднерасходной скорости истечения микроструи $U = 305$ м/с наблюдается ламинарный режим горения, при скорости $U = 913$ м/с начинается турбулизация пламени, при скорости $U = 1\,066$ м/с формируется перетяжка, отделяющая ламинарный участок от турбулентного. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода в диапазоне расходов $Q = 39,2\text{--}63,1$ см³/с представлены на рисунке 3.

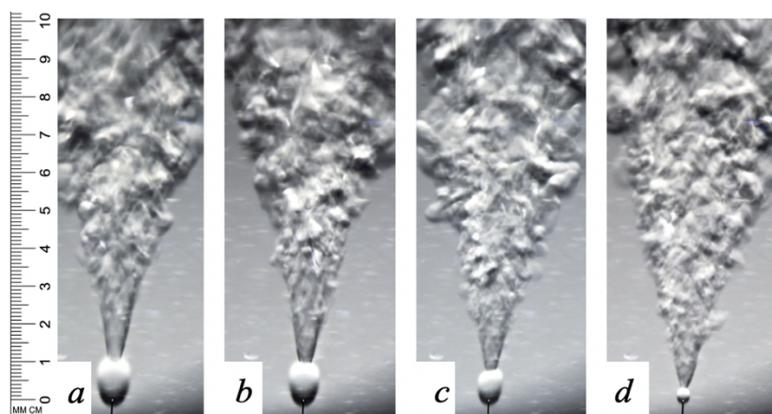


Рис. 3. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : a) 1 248 м/с; b) 1 370 м/с; c) 1 706 м/с; d) 2 010 м/с

Fig. 3. Shadow images of a hydrogen microjet at different velocities U_0 : a) 1,248 m/s; b) 1,370 m/s; c) 1,706 m/s; d) 2,010 m/s

При увеличении скорости истечения от $U = 1\,066$ м/с до 2 010 м/с протяженность ламинарного участка пламени уменьшается в пять раз. Срыв турбулентного участка пламени происхо-

дит при скорости истечения микроструи $U = 2\,132$ м/с (рис. 4). На рисунке 4а показан режим, когда горение существует только в ламинарной области микроструи, при уменьшении расхода от $Q = 67$ см³/с до $Q = 65$ см³/с происходит восстановление процесса горения в турбулентной области. При скорости истечения $U = 2\,040$ м/с происходят проскоки пламени и горение в турбулентной области, при снижении скорости до $U = 1\,980$ м/с горение полностью восстанавливается и стабилизируется.

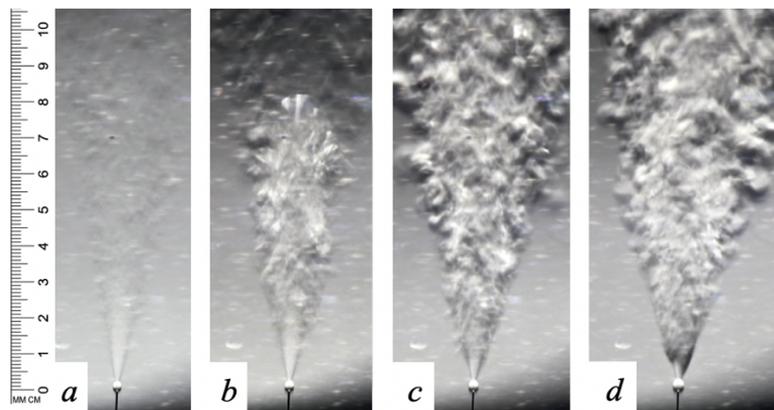


Рис. 4. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 2 132 м/с; б) 2 040 м/с; в) 2 040 м/с; д) 2 010 м/с

Fig. 4. Shadow images of a hydrogen microjet at different velocities U_0 : а) 2,132 m/s; б) 2,040 m/s; в) 2,040 m/s; д) 2,010 m/s

1.2. Диффузионное горение круглой микроструи водорода, при воспламенении на расстоянии от среза сопла

На рисунке 5 показаны теневые картины диффузионного горения при воспламенении водорода на расстоянии от среза сопла с реализацией режимов горения с факелом, приподнятым над срезом сопла. Такой режим существовал в диапазоне расходов $Q = 37,3$ – $32,5$ см³/с, при дальнейшем уменьшении расхода факел становился присоединенным. При скорости истечения выше $U = 1\,188$ м/с происходит срыв пламени.

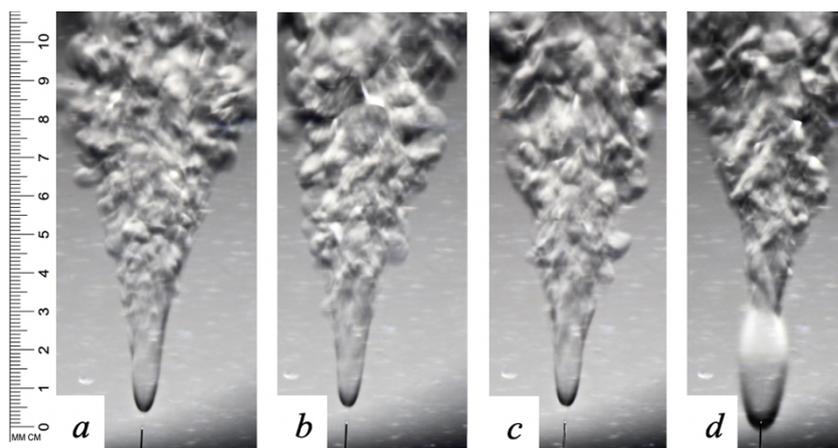


Рис. 5. Теневые картины процесса диффузионного горения микроструи водорода, при различной скорости истечения микроструи U_0 : а) 1 188 м/с; б) 1 096 м/с; в) 1 035 м/с; д) 944 м/с

Fig. 5. Shadow images of a hydrogen microjet at different velocities U_0 : а) 1,188 m/s; б) 1,096 m/s; в) 1,035 m/s; д) 944 m/s

2. Обсуждение

Систематизируя новые и ранее полученные данные для микроструй с $d = 200, 500, 1\ 000$ мкм [9–18], можно связать сценарии диффузионного горения микроструи водорода с безразмерными числами Рейнольдса.

Сценарии диффузионного горения микроструй водорода истекающих из различных микросопел в привязке к безразмерным числам Рейнольдса

Scenarios of Diffusion Combustion of Hydrogen Microjets Flowing from Various Micronozzles in Relation to Reynolds Numbers

Описание сценария	d , мкм	Re
Ламинарное горение	200	До 1 863
	500	До 1 301
	1 000	До 2 337
Двухзонная структура пламени	200	2 424–4 103
	500	1 561–3 123
	1 000	2 602–4 163
Срыв пламени на турбулентном участке	200	4 150
	500	3 903
Горение с факелом, приподнятым над срезом сопла	200	2 112–2 425
	500	1 950–2 342
Переход от приподнятого факела к присоединенному факелу	200	1 927

Из таблицы видно, что сценарии диффузионного горения аналогичны для микроструй диаметром 200–500 мкм, реализация сценариев происходит при схожих безразмерных числах Рейнольдса.

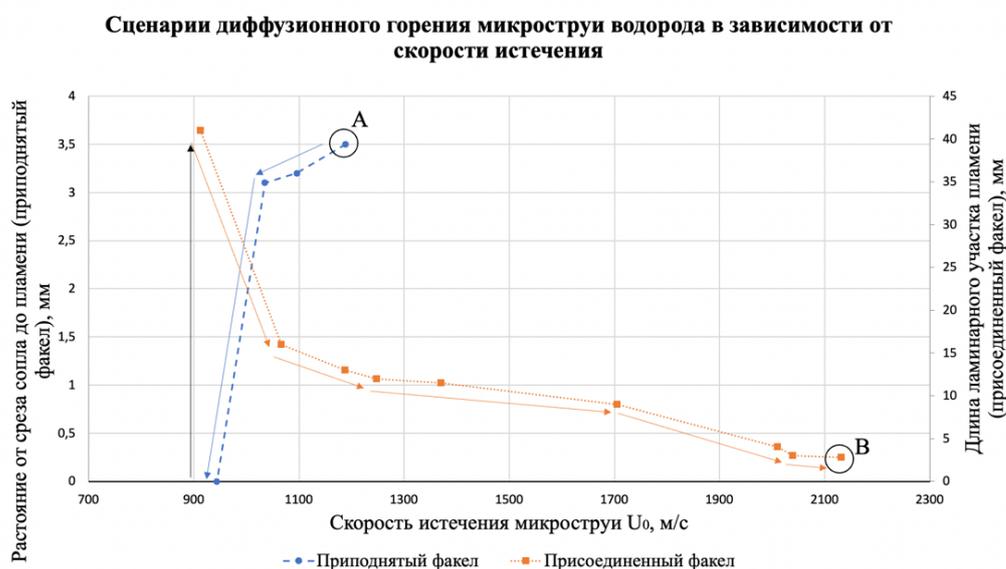


Рис. 6. Процесс перехода от одного сценария горения к другому. Стрелками указана последовательность смены сценариев при изменении скорости истечения

Fig. 6. The process of transition from one combustion scenario to another. The arrows indicate the sequence of changing scenarios with a change in the velocity of the microjet

Стоит отметить еще одну важную особенность перехода от одного сценария горения к другому при воспламенении вблизи и на расстоянии от среза сопла. Наблюдается гистерезис зависимости скорости и существования горения. На рисунке 6 показано, как происходит переход между сценариями диффузионного горения при изменении скорости истечения микроструи.

В начальной точке *A* наиболее высокая скорость, при которой поддерживается горение с приподнятым факелом без срыва пламени. Далее она постепенно уменьшается (на графике отобрано изменение расстояние от среза сопла до факела), и при скорости около 950 м/с факел становится присоединенным, после этого скорость истечения увеличивается (на графике отобрано 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 / на расстоянии от среза сопла), диапазон скорости исчезновения перетяжки пламени и начало отрыва пламени и диапазон скорости прекращения отрыва пламени и появления перетяжки пламени обсуждались в работе [18].

Заключение

Представлены сценарии диффузионного горения круглых микроструй водорода при поджигании вблизи и на расстоянии от среза сопла для металлического цилиндрического сопла диаметром 200 мкм. Полученные экспериментальные данные сравнивались с ранее полученными, результаты выражены в безразмерных параметрах (через числа Рейнольдса).

Установлено, что стабилизация пламени при истечении круглой микроструи водорода связана с нагревом сопла сферической областью пламени, охватывающей его срез.

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).

Список литературы

1. **Абрамович Г. Н.** Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974. 272 с.
2. **Но С. М., Huerre P.** Perturbed free shear layers // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1984. Vol. 16. Pp. 356–424.
3. **Michalke A.** Survey on jet instability theory // *Prog. Aerosp. Sci.* 1984. Vol. 21, no. 3. Pp. 159–199.
4. **Гиневский А. С., Власов Е. В., Каравосов Р. К.** Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 240 с.
5. **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.
6. **Ball C. G., Fellouah H., Pollard A.** The flow field in turbulent round free jets // *Prog. Aerosp. Sci.* 2012. Vol. 50. Pp. 1–26. doi: 10.1016/j.paerosci.2011.10.002
7. **Рудяк В. Я., Анискин В. М., Кузнецов В. В., Маслов А. А., Минаков А. В., Миронов С. Г.** Газодинамическая структура и устойчивость газовых микроструй // *Моделирование микро- и нанотечений.* 2014. С. 94–114.
8. **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.

9. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестник НГУ. Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 52–66.
10. Шмаков А. Г., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 2. С. 27–41.
11. Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air // *Doklady Physics*. 2016. Vol. 61, iss. 9. Pp. 457–462.
12. Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A. Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet // *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, iss. 24. Pp. 15913–15924.
13. 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 // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 3. С. 62–73.
14. Kozlov V. V., Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Y. A. Micronozzle chocking under diffusion combustion of hydrogen // *Doklady Physics*. 2018. Vol. 63, no. 5. Pp. 193–198. doi: 10.1134/S1028335818050026
15. 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.
16. 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.
17. Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, iss. 1. Pp. 457–468.
18. Litvinenko Y. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Shmakov A. G. Diffusion combustion of a round hydrogen microjet at sub- and supersonic jet velocity // *Doklady Physics*. 2020. Vol. 65, no. 9. Pp. 312–316. doi: 10.1134/S1028335820090074

References

1. Abramovich G. N. *Turbulent Mixing of Gas Jets*. Moscow, 1974. (in Russ.)
2. Ho C. M., Huerre P. Perturbed free shear layers. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1984, vol. 16, pp. 356–424.
3. Michalke A. Survey on jet instability theory. *Prog. Aerosp. Sci.*, 1984, vol. 21, no. 3, pp. 159–199. doi: 10.1016/0376-0421(84)90005-8
4. Ginevskii A. S., Vlasov E. V., Karavosov R. K. *Acoustic Control of Turbulent Jets*. Moscow, 2001. (in Russ.)
5. Kozlov G. V., Grek G. R., Sorokin A. M., Litvinenko Yu. A. Influence of initial conditions at the nozzle exit on the structure of a round jet. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2008, vol. 15, no 1, pp. 59–73. (in Russ.)
6. Ball C. G., Fellouah H., Pollard A. The flow field in turbulent round free jets. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2012, vol. 50, pp. 1–26. doi: 10.1016/j.paerosci.2011.10.002
7. Rudyak V. Ya., Aniskin V. M., Kuznetsov V. V., Maslov A. A., Minakov A. V., Mironov S. G. Gas-dynamic structure and stability of gas microjets. Modeling of micro- and nanoflows. Novosibirsk, 2014. Pp. 94–114. (in Russ.)

8. **Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V.** Subsonic round and flat macro- and microjets in a transverse acoustic field. *Doklady Physics*, 2011, vol. 436, no 1, pp. 1–7. (in Russ)
9. **Litvinenko Yu. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G.** The structure of the attached diffusion flame of a hydrogen microjet flowing from a slotted nozzle. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 52–66. (in Russ.)
10. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A.** Different Conditions of the Round Hydrogen Jets Diffusion Combustion in Air. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 27–41. (in Russ.)
11. **Kozlov V. V., Grek G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Combustion of a high-velocity hydrogen microjet effluxing in air. *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, iss. 9, pp. 457–462.
12. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko Yu. A.** Influence of initial and boundary conditions at the nozzle exit upon diffusion combustion of a hydrogen microjet. *Intern. J. Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, iss. 24, pp. 15913–15924.
13. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study of diffusion combustion of a round hydrogen microjet when it is ignited far from the nozzle exit. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 62–73. (in Russian)
14. **Kozlov V. V., Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Y. A.** Micronozzle choking under diffusion combustion of hydrogen. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 193–198. doi: 10.1134/S1028335818050026
15. **Shmakov A. G., Grek G. R., Kozlov V. V., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A.** Experimental Study of the Diffusion Combustion of a High-Speed Round Hydrogen Microjet. Part 1. Attached Flame, Subsonic Flow. *Siberian Journal of Physics*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 28–45. (in Russ.)
16. **Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G., Vikhorev V. V.** Diffusion Combustion of Hydrogen Round Microjet at Sub- and Supersonic Velocity Efflux from Nozzle. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 2, p. 37–52. (in Russ.)
17. **Kozlov V. V., Grek G. R., Kozlov G. V., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G.** Experimental study on diffusion combustion of high-speed hydrogen round microjets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, iss. 1, pp. 457–468.
18. **Litvinenko Y. A., Grek G. R., Kozlov V. V., Litvinenko M. V., Shmakov A. G.** Diffusion combustion of a round hydrogen microjet at sub- and supersonic jet velocity. *Doklady Physics*, 2020, vol. 65, no. 9, pp. 312–316. doi: 10.1134/S1028335820090074

Информация об авторах

Козлов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); профессор, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Литвиненко Мария Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия); ученый секретарь физического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия)

Литвиненко Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Тамбовцев Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Шмаков Андрей Геннадиевич, доктор химических наук, старший научный сотрудник, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (ул. Институтская, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Information about the Authors

Viktor V. Kozlov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Principal Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Professor, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Maria V. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scientific Secretary Faculty of Physics, Novosibirsk State University (2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation) litmar@itam.nsc.ru

Yuriy A. Litvinenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Senior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Alexander S. Tambovtsev, Junior Scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Science (Chemistry), Senior Scientist, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (3 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Assistant Professor, Siberian State University of Geosystem and Technology (10 Plakhotny Str., Novosibirsk, 630108, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022;
принята к публикации 22.07.2022*

*The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 22.07.2022;
accepted for publication 22.07.2022*