

УДК 532.525.2

ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В МИКРОСТРУЕ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО КАНАЛА

© 2023 г. В. В. Козлов^{а,*}, А. В. Довгаль^а, М. В. Литвиненко^а, Ю. А. Литвиненко^а, А. Г. Шмаков^а

Представлено академиком РАН В.М. Фоминым 23.06.2022 г.

Поступило 23.06.2022 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принято к публикации 26.07.2023 г.

В представленной работе рассмотрено горение микроструи водорода, истекающей из криволинейного канала с круглым микросоплом. Струйные течения, которые генерируются с использованием прямолинейных и криволинейных каналов, различаются тем, что во втором случае заметный вклад в формирование струи и ее горение вносят вихри Дина. Взаимодействие последних с вихрями Кельвина–Гельмгольца, образование которых характерно для течений со сдвигом скорости, вызывает изменения характеристик горения. Они включают пространственные искажения зоны ламинарного пламени вблизи среза сопла, области турбулентного горения ниже по потоку, а также турбулентного пламени в условиях его отрыва от среза сопла и прекращение ламинарного горения на начальном участке течения. Результаты настоящих исследований дают возможность глубже понять особенности горения микроструй водорода в условиях их гидродинамической неустойчивости.

Ключевые слова: криволинейный канал, вихри Дина, микроструя водорода, диффузионное горение

DOI: 10.31857/S2686740023060123, **EDN:** HTFPRO

Динамика струйных течений различных газов — предмет многолетних экспериментальных и теоретических исследований. Структура течения и его эволюция определяются, помимо прочего, начальными условиями на срезе сопла, где происходит формирование струи. Как правило, рассматриваются осесимметричное (за круглым соплом) и однородное в трансверсальном потоку направление (за щелевым соплом) струйные течения. В эксперименте это обеспечивается использованием прямолинейных каналов, по которым газ поступает к срезу сопла.

Известно, что в криволинейных трубах под действием центробежной силы создается условие формирования вторичного течения, которое проявляется в виде двух противовращающихся вихрей, названных вихрями Дина [1, 2]. Зарождение вихрей внутри криволинейного канала можно использовать для увеличения тепломассопереноса струи с окружающим газом. В экспериментальной работе [3] показано, что теория, предложенная W.R. Dean [1], справедлива для труб различной кривизны. Автор показал, что ламинарное течение в криволинейных трубах реализуется при

бóльших числах Рейнольдса, чем для прямых труб, несмотря на то, что кривизна вызывает неустойчивость течения. Анализируя результаты по исследованию течений в криволинейных каналах и вихревые структуры в затопленных струях, можно сделать вывод, что, объединяя два случая — криволинейный канал и затопленную струю, можно предположить, что в такой струе на выходе из сопла будут наблюдаться вихри Дина, которые будут иметь свои особенности развития (см. [4]).

Следует ожидать, что вихревая структура струйного течения в значительной мере определяет режимы его диффузионного горения. В осесимметричных струях при истечении водорода при низких скоростях потока вблизи среза сопла формируется участок ламинарного горения (“область перетяжки пламени”, следуя определению [5]); ниже по потоку продолжается горение турбулентной струи. С ростом скорости течения область перетяжки пламени сокращается вплоть до ее исчезновения и происходит отрыв турбулентного пламени от среза сопла. При дальнейшем возрастании скорости струи ее горение полностью прекращается. В настоящей работе обозначенные выше стадии горения обсуждаются в условиях генерации вихрей Дина при истечении микроструи водорода из криволинейного канала.

^аИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

*E-mail: kozlov@itam.nsc.ru

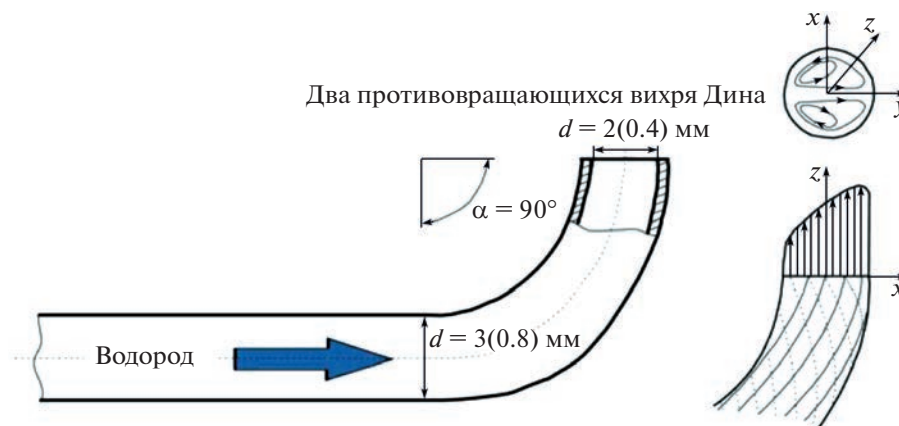


Рис. 1. Криволинейный канал с осесимметричным соплом для моделирования диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина.

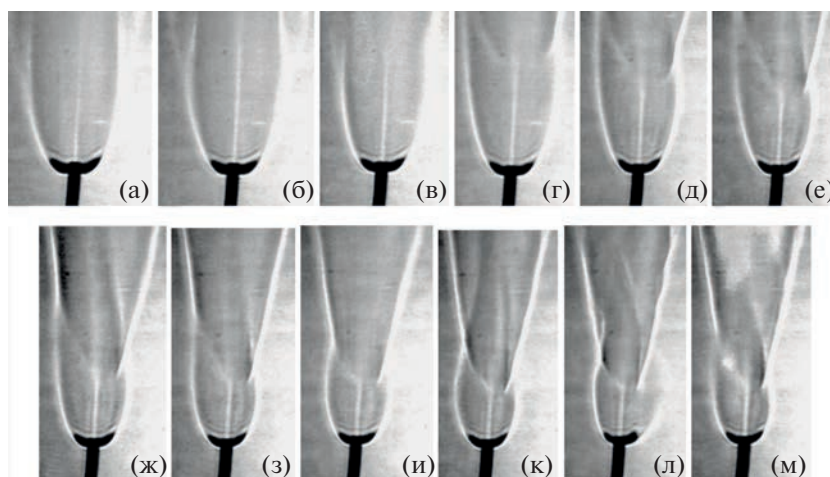


Рис. 2. Диффузионное горение струи водорода, истекающей из сопла диаметром $d = 2$ мм, при различной скорости течения (м/с): 25.5 (а); 40 (б); 52.5 (в); 58 (г); 70 (д); 78 (е); 86 (ж); 92 (з); 100 (и); 107 (к); 115 (л); 120 (м).

1. ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА НА ВЫХОДЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО КАНАЛА

Схема канала с образованием вихрей Дина на его выходе приведена на рис. 1. Диффузионное горение водорода исследовано при диаметре сопла $d = 2.0$ и 0.4 мм. В этих условиях струйное течение и его горение подвержены влиянию кольцевых вихрей Кельвина–Гельмгольца, зарождающихся в слое сдвига скорости на периферии струи, вихрей Дина и их взаимодействия.

Теневые изображения, полученные методом Теплера в приведенной экспериментальной схеме с их регистрацией на цифровую видеокамеру, показаны на рис. 2. Как и в предшествующих исследованиях диффузионного горения круглых и плоских микроструй водорода, истекающих из прямолинейных каналов, в данном случае вблизи

среза сопла возникает область перетяжки пламени — зона горения в ламинарном режиме, за которой пламя переходит в турбулентное состояние. На рис. 2 указанная область течения отчетливо визуализирована при больших скоростях струи.

Формирование вихрей Дина в круглой микроструе водорода на выходе криволинейного канала приводит к заметному искажению течения на его начальном участке. Узкий слой градиента плотности газа, разделяющий область перетяжки пламени с ламинарным горением вблизи среза сопла и турбулентное пламя ниже по потоку, становятся несимметричными, рис. 2 и рис. 3а. Более того, под влиянием вихрей Дина происходит изменение области перетяжки пламени (рис. 3а), которая в отсутствие кривизны канала сохраняет сферическую форму и остается осесимметричной (рис. 3б).

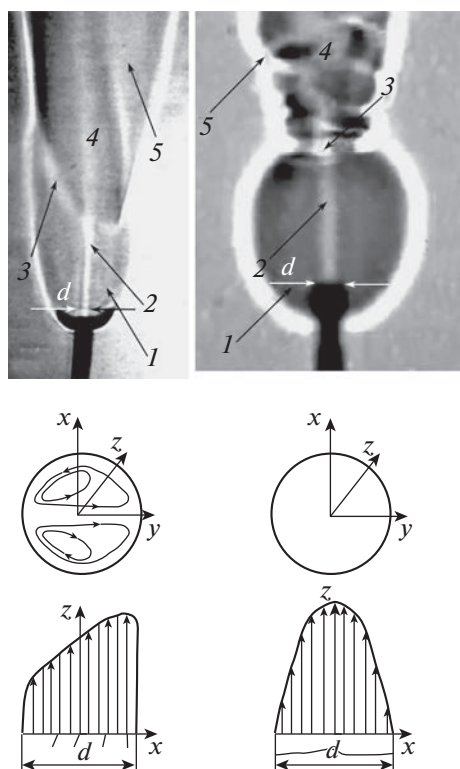


Рис. 3. Диффузионное горение водорода, истекающего из криволинейного (а) и прямолинейного (б) круглых микроканалов, $d = 2.0$ мм: 1 – область перетяжки пламени; 2 – ламинарная микроструя; 3 – слой градиента плотности газа; 4 – турбулентная микроструя; 5 – турбулентное пламя.

Более высокие скорости истечения микроструи водорода с вихрями Дина достигнуты при диаметре сопла $d = 0.4$ мм, рис. 4. В целом основные стадии горения, последовательно сменяю-

щие друг друга с возрастанием скорости потока, в этих условиях аналогичны обнаруженным в низкоскоростных струйных течениях. Вместе с тем при большой скорости микроструи происходит искажение турбулентного пламени, тогда как ламинарное горение в области перетяжки пламени сохраняется вблизи среза сопла, рис. 4ж. С дальнейшим ростом скорости истечения микроструи область перетяжки пламени исчезает, зона турбулентного горения отрывается от среза сопла при сохранении ее несимметрии, рис. 4з–4м. Наибольшая пространственная деформация турбулентного участка микроструи наблюдается в максимуме ее скорости на срезе сопла, что связано с генерацией кольцевых вихрей и вихрей Дина. Исчезновение области перетяжки пламени (рис. 4з–4н) является признаком перехода диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина в сверхзвуковой режим истечения водородной струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование горения круглых микроструи водорода, модулированных вихрями Дина, выявило аналогии и особенности данного явления сравнительно с горением водорода за срезом сопла прямолинейного осесимметричного канала. В условиях генерации вихрей сохраняется ранее обнаруженная особенность пространственной структуры струйного течения – область перетяжки пламени вблизи среза сопла, в которой наблюдается ламинарное горение. Вихри Дина приводят к деформации области перетяжки пламени и окружающего ее слоя градиента плотности газа, за которым происходит переход горения струи в турбулентное состояние. С возрастанием скорости микроструи, при сохранении области перетяжки пламени,

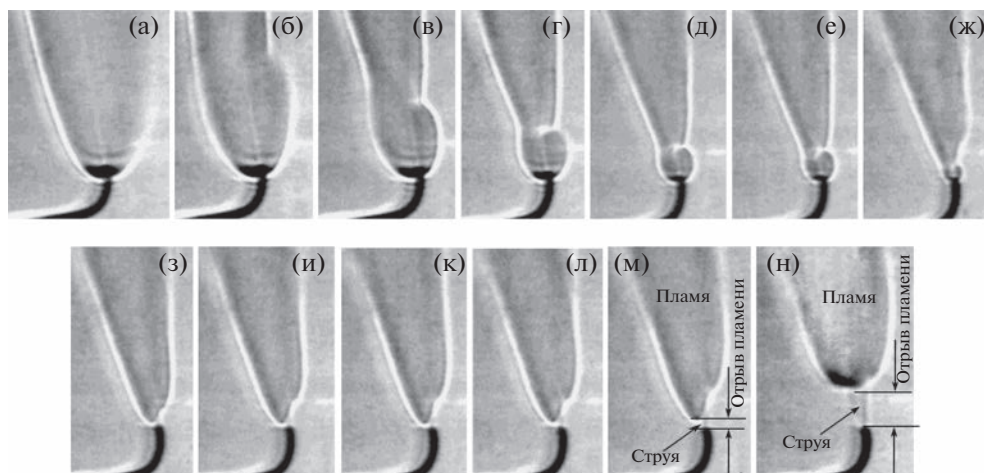


Рис. 4. Теневые картины диффузионного горения водорода, истекающего из сопла диаметром $d = 0.4$ мм, при различной скорости струи (м/с): а – 484; б – 548; в – 587; г – 635; д – 635; е – 873; ф – 921; г – 952; h – 1032; i – 1040; j – 1111; k – 1151; l – 1190; m – 1309.

турбулентное пламя теряет осевую симметрию. По мере исчезновения области перетяжки пламени с увеличением скорости струи зона турбулентного горения отрывается от среза сопла, оставаясь несимметричной. Отрыв турбулентного пламени от среза сопла — признак перехода дозвукового диффузионного горения микроструи водорода с вихрями Дина к горению в струе со сверхзвуковым истечением водорода.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2020-806).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dean W.R.* Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe // *Phil. Mag.* 1927. V. 4. P. 208–223.
2. *Dean W.R.* The Stream-Line Motion of Fluid in a Curved Pipe // *Phil. Mag.* 1928. V. 5. P. 671–695.
3. *White C.M.* Streamline Flow through Curved Pipes // *Proc. Roy. Soc.* 1929. V. 123. P. 645–663.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
5. *Kozlov V.V., Grek G.R., Korobeynikov O.P., Litvinenko Yu.A., and Shmakov A.G.* Features of diffusion combustion of hydrogen in the round and plane high-speed microjets. Pt II // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2016. V. 41. Iss. 44. P. 20240–20249.

DIFFUSION COMBUSTION OF A HYDROGEN MICROJET, OUTFLOWING FROM A CURVILINEAR CHANNEL

V. V. Kozlov^a, A. V. Dovgal^a, M. V. Litvinenko^a, Yu. A. Litvinenko^a, and A. G. Shmakov^a

^a*Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

Presented by Academician of the RAS V.M. Fomin

The presented work examines the combustion of a hydrogen microjet flowing from a curved channel with a round micronozzle. Jet flows that are generated using rectilinear and curved channels differ in that in the second case, Dean vortices make a noticeable contribution to the formation of the jet and its combustion. The interaction of the latter with Kelvin–Helmholtz vortices, the formation of which is typical for flows with a velocity shift, causes changes in combustion characteristics. They include spatial distortions of the laminar flame zone near the nozzle exit, the area of turbulent combustion downstream, as well as the turbulent flame in the conditions of its separation from the nozzle exit and the cessation of laminar combustion in the initial section of the flow. The results of these studies provide an opportunity to better understand the combustion features of hydrogen microjets under conditions of their hydrodynamic instability.

Keywords: curvilinear channel, Dean vortices, hydrogen microjet, diffusion combustion