

Влияние гравитационных сил на процессы горения

А. И. Крикунова, Э. Е. Сон, К. В. Клинков, С. Eigenbrod

Выполнены экспериментальные исследования пламени предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя в условиях, когда скорость горения направлена по и против вектора гравитации, а также в невесомости. Проведено сравнение характеристик пламени. Впервые определена скорость ламинарного горения при вариации интенсивности и направления гравитационного поля на основе экспериментальных данных о коническом метано-воздушном пламени. Показана возможность оценки полей скоростей пламени в условиях ограниченного пространства и без внешних источников световых импульсов (в капсуле в «падающей башне»).

Ключевые слова: горение, метано-воздушное пламя, силы плавучести, невесомость.

Введение

Несмотря на многолетние исследования процессов горения, ряд вопросов остаётся открытым и в настоящее время продолжают теоретические и экспериментальные работы по уточнению различных теорий и их применимости [1]. При изучении горения обычно неотъемлемым внешним воздействием является влияние гравитационного поля Земли, что затрудняет понимание происходящих химических и физических процессов. Зачастую не корректно верифицировать модели горения исключительно результатами исследований в поле тяжести Земли. Справедливость и достоверность моделей должна проверяться на «чистых» экспериментальных данных, иначе их нельзя до конца считать верными, хотя большинство моделей используются для расчетов сложных технических устройств, работающих в земных условиях, и процессов, происходящих на Земле. Существует ряд задач, в которых необходим учет

влияния гравитации, так, например, нештатные ситуации, связанные с воспламенением на борту МКС, работа двигателей в условиях невесомости или наоборот – повышенной гравитации и др. Кроме того, силы плавучести препятствуют наблюдению ряда фундаментальных явлений. Так, существование некоторых типов пламени невозможно в поле силы тяжести Земли, например, одномерное низкорейнольдсовое диффузионное пламя и пламя предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя [2, 3].

Перечисленные факты указывают на необходимость проведения экспериментальных исследований воздействия гравитационных сил на процессы горения и получения характеристик пламени, не подверженных внешнему влиянию. В соответствии с работами [4], такие важнейшие аспекты влияния сил плавучести на пламя, как поля скорости потока, взаимодействие турбулентности и горения, турбулентный транспорт, диффузионно-тепловые неустойчивости и др. требуют выяснения. Как свидетельствует обзор литературы в области исследований характеристик пламени предварительно перемешанной смеси в условиях пониженной гравитации [5], такие работы до сих пор не были проведены или требуют существенных уточнений. Поскольку технические возможности исследований в невесомости с каждым годом развиваются, то проводятся и исследования горения в условиях невесомости, однако современная база экспериментальных результатов в этой области все еще слишком мала [6].

Измерение скорости горения является важной задачей, поскольку скорость является одной из ключевых характеристик, по которой производится верификация численных моделей. Некото-

Крикунова Анастасия Игоревна, стажер-исследователь.
Сон Эдуард Евгеньевич, заместитель директора, д.ф.-м.н., академик РАН.

Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.
Тел.: +7 (919) 107-58-28, +7 (495) 484-16-55.

E-mail: krikunova@phystech.edu; son@ihed.ras.ru

Клинок Константин Владимирович, Dr.,

Eigenbrod Christian, DIPL.-ING.,

ZARM, Fallturm-Betriebsgesellschaft mbH,

c/o Universität Bremen,

Am Fallturm, 28359 Bremen, Germany

E-mail: konstantin.klinkov@zarm.uni-bremen.de

E-mail: christian.eigenbrod@zarm.uni-bremen.de

Статья поступила в редакцию 1 июня 2017 г.

рые существующие данные имеют расхождения, и в мировой литературе представлен ряд современных работ по решению этого вопроса [7].

В настоящей работе впервые были выполнены измерения и проведены сравнения скоростей горения в зависимости от гравитационных сил на основе экспериментальных данных о горении конического метано-воздушного пламени. Пламя исследовалось в условиях, когда скорость горения направлена по вектору гравитации («нормальная» гравитация) и против («обратная» гравитация), а также в условиях невесомости. Предложена методика измерения поля скоростей за фронтом горения без использования внешних источников световых импульсов.

Установка и диагностика

Исследования в условиях невесомости проводились в Центре прикладных космических технологий и микрогравитации (ZARM), г. Бремен, Германия, на уникальной экспериментальной установке Drop Tower («Падающая башня») [8]. Она представляет собой вертикально установленную трубу высотой 120 м с внутренним диаметром 3 м, откачанную до условий низкого вакуума ($\sim 10^{-2}$ Торр), внутри которой падает капсула с экспериментальным стендом. Капсула имеет форму цилиндра диаметром 1 м и высотой 3 м с коническим накопником.

Во время падения капсулы производятся необходимые измерения (время свободного падения составляет 4,74 с). Измерения ускорения свободного падения относительно капсулы в полете показывают его снижение до $10^{-5}g_0$ (g_0 – стандартное ускорение свободного падения).

На рис. 1 представлена схематическая конструкция капсулы. В нижней части капсулы расположены системы питания, связи и управления. В верхней части расположены несколько платформ с системой контроля подачи и смешивания топлива с окислителем, самой горелкой, устройством искрового поджига и диагностикой реагирующих потоков. В капсуле все элементы жестко закреплены, поскольку перегрузка в системе в момент торможения при приземлении составляет $45g_0$. Эксперимент проводился при атмосферном давлении.

В качестве горелки использовалось коническое сопло, перед которым устанавливалась камера смешения. Подробное описание системы горелки, камеры смешения, стабилизации пламени, а также характеристик потока представлено в работах [9, 10]. Скорость потока варьировалась от 0,5 до 4 м/с, использование кольца в качестве стабилизирующего тела позволило исследовать как

бедное, так и богатое пламя (коэффициент избытка топлива смеси изменялся от 0,8 до 1,3).

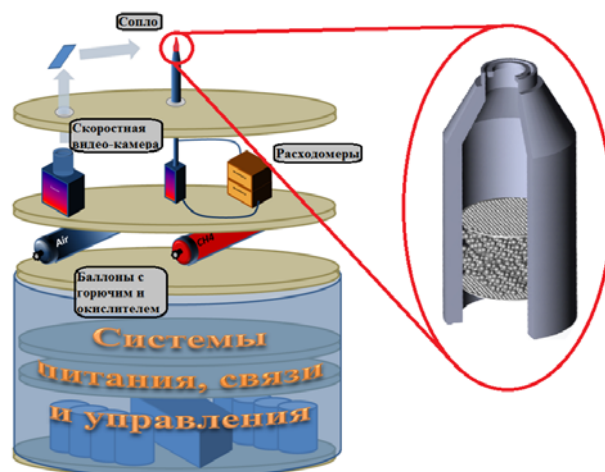


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Высокоскоростная съемка хемилюминесценции пламени производилась с частотой 1000 кадр/с, что позволило получить данные о динамике фронта горения, высоте пламени и скорости ламинарного горения в широком диапазоне значений параметров. Обработка изображений проводилась последовательным наложением фильтров и выделением границы фронта пламени как области максимальной яркости. Так определялась высота пламени для каждой скорости потока и коэффициента избытка топлива. В свою очередь, высота пламени определяет скорость ламинарного горения, которая в случае конического пламени определяется по классической формуле $S_L = u_n \sin \alpha$, где α – плоский угол при вершине конуса пламени, u_n – средняя скорость потока. Поскольку конус пламени не является идеальным (его кончик искривлен, например, из-за растяжения пламени вследствие анизотропной диффузии массы и тепла), то S_L определяется через угол между его образующими.

Современным неинвазивным методом диагностики поля скоростей потока является метод Particle Image Velocimetry (PIV), который нашел широкое применение как в изотермических, так и в реагирующих потоках. Принцип измерений заключается во введении в поток достаточно малых размеров частиц, чтобы они могли полностью следовать линиям тока в исследуемой среде, импульсно-периодическом освещении потока и регистрации отраженного ими света. В литературе описан опыт экспериментальных исследований горения методом PIV [11]. Однако данный метод требует наличия внешнего источника световых импульсов, что усложняет задачу с технической стороны, особенно со стороны ограничения по частоте импульсов [12].

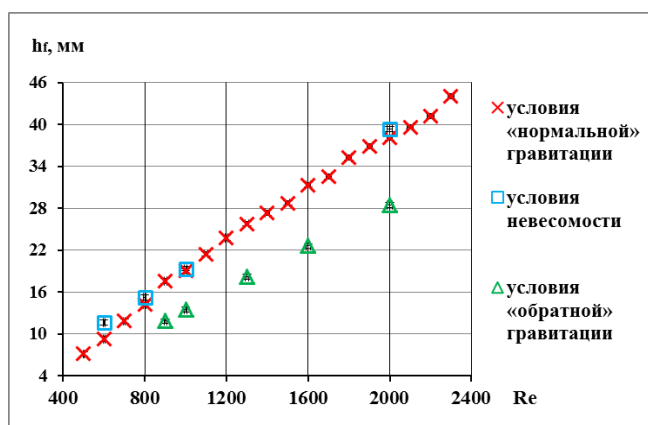
При проведении экспериментов в «падающей башне» возникают дополнительные проблемы, такие как ограниченность пространства и значительные перегрузки, которые испытывает вся техника при торможении капсулы. В данной работе показана возможность оценки поля скоростей потока за фронтом горения без использования источника света (лазера). Поток, аналогично PIV, засеивался частицами ZrO_2 с размерами менее 5 мкм, но плотность засева потока, в отличие от PIV, должна быть низкой – от 1 до 10 частиц на 1 кадр, чтобы треки частиц не пересекались. Во фронте пламени частицы нагревались, после чего излучали свет в широком диапазоне длин волн. Движение светящихся частиц во время экспозиции кадра приводит к тому, что на получаемом изображении виден яркий след, соответствующий траектории движения частицы, который фиксировался при помощи высокоскоростной камеры. Время экспозиции – 1 мкс, при этом размер исследуемой области и матрицы камеры аналогичен съемке хемилюминесценции пламени. Таким способом определялась длина траектории частицы, и соответствующий вектор скорости. Полученные изображения треков частиц обрабатывались при помощи программного обеспечения, разработанного авторами работы.

Результаты и обсуждение

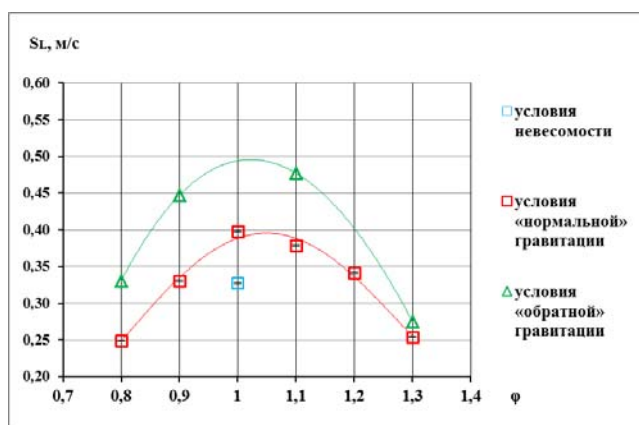
При обработке изображений хемилюминесценции пламени были получены высоты пламени h_f для широкого диапазона скоростей потока, коэффициентов избытка топлива смеси и гравитационных сил. Результаты измерений для стехиометрической метано-воздушной смеси представлены на рис. 2, а. С ростом скорости потока высота

пламени увеличивается для всех исследуемых условий («нормальная» гравитация, «обратная» и невесомость). В условиях невесомости пламя имеет наибольшую высоту, в «нормальных» условиях оно ниже на величину от 3 до 18 % в зависимости от скорости потока. В случае «обратной» гравитации высота пламени снижается на величину около 30 % относительно условий «нормальной» гравитации. Причем с ростом расхода смеси абсолютная разница высот в условиях «нормальной» гравитации и в невесомости уменьшается, тогда как для «нормальной» и «обратной» гравитации – возрастает.

На рис. 2, б представлены результаты измерений скоростей горения для различной степени обогащенности горючей смеси. Вне зависимости от скорости потока, скорость горения для фиксированного коэффициента избытка топлива остается постоянной. В невесомости получены данные только для случая стехиометрической смеси. В «обратной» гравитации скорость горения максимальна, поскольку скорость распространения волны горения направлена против вектора силы тяжести и сонаправлена с силами плавучести (неустойчивость Рэлея-Тейлора). В условиях «нормальной» гравитации скорость ниже, чем в «обратной», поскольку силы гравитации противостоят распространению горячей волны горения вниз, однако сжатие пламени все же способствует ускорению горения по сравнению с условиями невесомости. В невесомости скорость горения минимальна, поскольку она определяется исключительно скоростью химических реакций без влияния гидродинамических эффектов растяжения (сжатия), что позволяет при верификации моделей горения понять, какие реакции являются ключевыми. Данные измерения позволяют оценить справедливость численных моделей горения.



а



б

Рис. 2. Экспериментальные данные: а) зависимость высоты пламени h_f от числа Рейнольдса Re потока при стехиометрической смеси CH_4 и воздуха; б) зависимость скорости ламинарного горения S_L от коэффициента избытка топлива смеси ϕ (смесь CH_4 и воздуха).

Кроме ламинарной скорости потока важно оценивать динамику потока в целом. В данной работе показана возможность оценки скоростей методом, не требующим использования внешних световых импульсов. Пример поля скоростей за фронтом горения в невесомости, полученного при таком способе диагностики, представлен на рис. 3. Качественно и количественно результаты отражают реальную картину, а именно: скорости потока соответствуют экспериментальным $\approx 1,3$ м/с, непосредственно над конусом горения скорость падает из-за резкого расширения, поле симметрично относительно оси сопла.

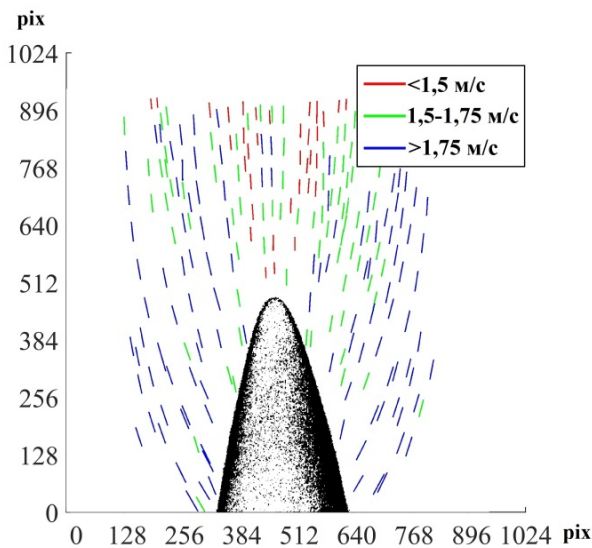


Рис. 3. Поле скоростей за фронтом горения в невесомости.

Заключение

В работе впервые экспериментально исследованы характеристики конического метано-воздушного пламени в зависимости от направления силы гравитации и в невесомости при варьировании скорости потока и коэффициента избытка топлива смеси. Определены значения скорости ламинарной горения для бедного, богатого и стехиометрического пламени в условиях «нормальной» и «обратной» гравитации, а также стехиометрического пламени в невесомости. Показано,

что в невесомости скорость фронта горения минимальна, а в «обратной» гравитации – максимальна.

Полученные результаты могут быть использованы при верификации численных моделей горения. Показана возможность измерения поля скоростей потока за фронтом пламени без использования внешних источников световых импульсов.

Эксперименты в условиях невесомости проводились при финансовой поддержке German Aerospace Center (DLR) Office for Research under Space Conditions, грант No. 50WM1125 в рамках проекта "Droplet-Droplet Interactions". Все остальные исследования и анализ результатов выполнены за счет средств Российского научного фонда (проект № 14-50-00124).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zimont V. L. // Flow, Turbul. Combust. 2016. Vol. 97. No. 3. P. 875.
2. Ross H. D. (Ed.) Microgravity combustion: fire in free fall. – Academic press, 2001.
3. Law C. K., Faeth G. M. // Prog. Energy Combust Sci. 1994. Vol. 20. No. 1. P. 65.
4. Cheng R. K., Johnson M. R., Greenberg P. S., Wernet M. P. / Proceedings of Seventh Int. Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems. Rev. 1. 2003. P. 221.
5. Sharp L., Dietrich D., Motil B. // J. Aerosp. Eng. 2013. Vol. 26. No. 2. P. 439.
6. Prud'Homme R., Legros G., Torero J. L. // C. R. Mec. 2017. Vol. 345. No. 1. P. 86.
7. Wang S. F., Zhang H., Jarosinski J., Gorczakowski A., Podfilipski J. // Combust. Flame. 2010. Vol. 157. No. 4. P. 667.
8. FABmbH Z., Fallturm A. ZARM drop tower Bremen User manual //dimensions. 2008.
9. Son E. E., Krikunova A. I., Saveliev A. S. // High Temp. 2016. Vol. 54. No. 3. P. 403.
10. Krikunova A. I., Son E. E., and Saveliev A. S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. No. 1. P. 012087.
11. Most J., Most A., Sussett A., Baillargeat J., Joulain P. / Proceedings of 10th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. 2001.
12. Greenberg P. S., Wernet M. P., Yanis W., Urban D. L., and Sunderland P. B., / Proceedings of Seventh Int. Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems. Rev. 1. 2003. P. 381.

Gravity influence on combustion processes

A. I. Krikunova¹, E. E. Son¹, K. V. Klinkov², and C. Eigenbrod²

¹Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: krikunovaai@gmail.com; son@ihed.ras.ru

²Center of Applied Space Technology and Microgravity, University of Bremen,
Bremen, 28359, Germany
E-mail: konstantin.klinkov@zarm.uni-bremen.de;
christian.eigenbrod@zarm.uni-bremen.de

Received June 1, 2017

The paper presents experimental studies of conical methane-air flames in conditions of normal, reverse and micro gravity under wide range of velocity and equivalence ratio. The flame characteristics are compared. The laminar burning velocity is determined for the different gravity conditions. Also, the possibility of estimating the flame velocity fields in conditions of limited space and without external source of light pulses (in a capsule of a «drop tower») is shown.

Keywords: combustion, methane-air flame, buoyancy forces, microgravity.

REFERENCES

1. V. L. Zimont, Flow, Turbul. Combust. **97** (3), 875 (2016).
2. *Microgravity combustion: fire in free fall*. Ed. by H. D. Ross (Academic press, 2001).
3. C. K. Law and G. M. Faeth, Prog. Energy Combust Sci. **20** (1), 65 (1994).
4. R. K. Cheng, M. R. Johnson, P. S. Greenberg, and M. P. Wernet, in *Proceedings of Seventh Int. Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems. Rev. 1.* (2003), p. 221.
5. L. Sharp, D. Dietrich, and B. Motil, J. Aerosp. Eng. **26** (2), 439 (2013).
6. R. Prud'Homme, G. Legros, and J. L. Torero, C. R. Mec. **345** (1), 86 (2017).
7. S. F. Wang, H. Zhang, J. Jarosinski, A. Gorczakowski, and J. Podfilipski, Combust. Flame. **157** (4), 667 (2010).
8. FABmbH Z., Fallturm A. *ZARM drop tower Bremen User manual* (2008).
9. E. E. Son, A. I. Krikunova, and A. S. Saveliev, High Temp. **54** (3), 403 (2016).
10. Krikunova, A. I., E. E. Son, and A. S. Saveliev., J. Phys.: Conf. Ser. **774** (1), 012087 (2016).
11. J. Most, A. Most, A. Sussett, J. Baillargeat, and P. Joulain, in *Proceedings of 10th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics* (2001).
12. P. S. Greenberg, M. P. Wernet, W. Yanis, D. L. Urban, and P. B. Sunderland, in *Proceedings of Seventh Int. Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems. Rev. 1.* (2003), p. 381.