

03.4

Применение вспомогательных топлив для управления сверхзвуковыми потоками реагирующих топливно-воздушных смесей в канале камеры сгорания

© С.В. Колосенок^{1,2}, А.Л. Куранов¹, А.А. Саваровский^{1,¶}, П.В. Булат², А.А. Галаджун²,
А.А. Левихин², А.Б. Никитенко²

¹ ОАО „Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем“, Санкт-Петербург, Россия

² Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: mail@hypersonics.ru

Поступило в Редакцию 11 марта 2021 г.

В окончательной редакции 22 июня 2021 г.

Принято к публикации 22 июня 2021 г.

Для реализации устойчивого сверхзвукового горения углеводородных топлив помимо газодинамических способов пригодны также химические. В ходе исследований экспериментальной модели уделено внимание кремнийорганической жидкости, поскольку элементоорганические соединения известны своей высокой реакционной способностью. Скорость распространения ламинарного пламени в смеси этой жидкости с воздухом составила 0.72–0.8 м/с. Это выше, чем у этилена, успешно использовавшегося в тестах сверхзвукового горения. Протестированное соединение может рассматриваться в качестве дополнительного топлива для управления сверхзвуковыми реагирующими потоками в камерах сгорания прямоточных двигателей.

Ключевые слова: сверхзвуковое горение, вспомогательные топлива, скорость ламинарного пламени, эффективность сгорания.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51507.18764

Для обеспечения высокой эффективности применения углеводородного топлива в прямоточных двигателях при числе Маха $M = 2-3$, $T = 800-1000$ К и $p = 0.5-1$ атм на входе в камеру сгорания (КС) [1] требуются выполненные условия $M \geq 1$ для части канала КС, занятой пламенем. В этой области время пребывания потока составляет единицы миллисекунд. Например, согласно [2], времени задержки воспламенения керосина 2 мс соответствуют температуры порядка 1400 К, а продуктов крекинга керосина — 1550 К. Таким образом, для реализации горения в канале необходимо повышение температуры, достигаемое в том числе за счет механизма подмешивания продуктов сгорания (ПС) в турбулентных вихрях, что проиллюстрировано расчетами поля величин времени протекания химических реакций в диффузных сверхзвуковых пламенах [3]. Поэтому реакционная способность топлив при высоких начальных температурах является их важной характеристикой. Регулировка числа Маха ниже точки впрыска топлива осуществляется путем изменения коэффициента избытка окислителя α [4], но стабилизация требуемой скорости пламени подобным способом затруднена. Так, для КС с двумя пилонами было показано, что при регулировке расхода топлива через инжектор верхнего (по потоку) пилона возникают гистерезисные явления около $M = 1$ [5].

Применение топлив, которые при сгорании высвобождают энергию значительно быстрее керосина, позволило бы на сравнительно меньшей длине участка КС менять профиль давления в канале (подробнее см. [6]). К таким топливам относятся водород, этилен,

моносилан, применявшиеся как в наземных, так и в полетных экспериментах, но их размещение на борту летательных аппаратов сопряжено со значительными трудностями. Известные жидкости, успешно применявшиеся в тестах высокоскоростного горения, сильно токсичны либо пирофорны. По этой причине применение дополнительных топлив при исследованиях процессов в КС гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей в последнее время ограничивалось газами. Цель настоящей работы — предложить экспресс-метод отбора возможных жидких дополнительных топлив.

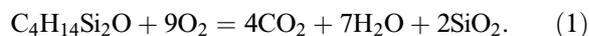
Помимо экспериментов с моделями КС и численных расчетов кинетики реакций в сверхзвуковых потоках активность топлив можно оценивать также полуэмпирическими методами. Существует, например, монотонная зависимость между ламинарной скоростью распространения пламени в топливно-воздушных смесях (ТВС) водорода, синтез-газа [7], этилена и задержкой воспламенения этих топлив в подогретом сверхзвуковом потоке [8]. Структуру фронта ламинарных предсмешанных пламен можно представить состоящей из зоны прогрева, в которой реагенты подогреваются до высоких температур, и смежной с ней зоны реакции, в которой происходит значительное изменение состава смеси. Скорость таких пламен определяется температуропроводностью смесей и временем протекания реакций в них (порядка 1 мс при 1 бар). Таким образом, скорость ламинарного пламени может указывать на кинетику реакций в ТВС, в том числе при высоких начальных температурах. Поэтому результаты исследования ламинарных пламен могут

Основные продукты сгорания ТМДС (в мольных долях)

α	p , atm	T , K	N_2 , %	H_2O , %	CO_2 , %	SiO_2 (liq.), %	CO , %	H_2 , %
1	1	2418	71	14	6.2	3.8	1.6	0.6
0.85	1	2420	69	14	4.5	4.2	4.4	2.2

применяться для реализации систем со сверхзвуковым горением. Следует отметить, что в сверхзвуковых потоках существуют только турбулентные пламена — как предсмешанные, так и диффузные, т. е. ламинарное предсмешанное пламя является крайне упрощенной экспериментальной моделью и пригодно преимущественно для скрининга возможных вспомогательных топлив. В настоящее время основные способы измерения ламинарных скоростей сгорания ТВС осуществляются в сферических взрывах и с помощью горелок.

В качестве примера топлив с хорошей химической кинетикой можно взять кремнийорганические соединения. Некоторые из них в отличие от аналогов (алюмоорганика, бороорганика) относительно безопасны в обращении, при этом устойчивы к нагреву до 400°C [9] и являются жидкостями. Согласно тестам, проведенным в 50-х годах XX века, они сгорают быстрее керосина и нередко быстрее этилена [10]. В современной работе [11] была верифицирована скорость горения тетраметилсилана, соответствующая ранее измеренной (0.6 м/с). Можно обратить внимание на 1, 1, 3, 3-тетраметилдисилоксан (ТМДС), используемый как восстановитель в органическом синтезе [12]. Его температура кипения 71°C, плотность 0.76 г/см³. Термическая стабильность этого соединения ниже, чем у алкилзамещенных силанов, однако в состав продуктов его сухого пиролиза по доминирующему механизму входит 50% диметилсилана [13], что позволяет ожидать сохранения химико-кинетических свойств перегретого ТМДС. Нами была получена экспресс-оценка ламинарной скорости горения этого соединения методом фоторегистрации сферического взрыва ТВС. Реакция сгорания ТМДС



Двуокись кремния (SiO₂) встречается в природе и входит в состав промышленной продукции. Из-за высоких температур реакции в продуктах сгорания присутствует мелкокристаллическая фаза SiO₂, концентрация которой в воздухе помещений должна жестко ограничиваться. Поэтому тестовый реактор (см. рисунок) работал на разгрузку через легкоразрушаемую диафрагму в замкнутую вспомогательную емкость, которую нужно промывать после каждого эксперимента. Возрастание давления в реакторе было ограничено, и исследования проводились в режиме „постоянного давления“. Диаметр смотрового окна в реакторе 140 мм. В центре реактора находятся два острых электрода. Межэлектродное расстояние варьировалось от 1 до 3 мм. Опыт запускался с помощью искрового генератора с энергией искры порядка



Реактор для исследования ТВС.

нескольких мДж. Объем реактора составлял 1.25 dm³. С помощью гексано-воздушной смеси была получена оценка предельного радиуса неискаженного пламени (~ 2.5 см), при этом прирост давления Δp не превысил 5%. Измерения проводились камерой с максимальной частотой кадров 1200 s⁻¹. Тесты осуществлялись при исходных температурах $T_0 = 280-290$ К.

Ламинарная скорость вычисляется по закону сохранения расхода среды через фронт пламени

$$u_L = (\rho_1/\rho_0)dR/dt = (T_0V_0/T_1V_1)dR/dt = (T_0N_0/T_1N_1)dR/dt, \quad (2)$$

где R — радиус пламени в момент времени t , ρ_0 — плотность ТВС, ρ_1 — плотность ПС, V_0 — удельный объем ТВС при нормальных условиях, V_1 — удельный объем ПС при нормальных условиях, далее из расчета сжигания 1 mol ТМДС: N_0 — количество компонентов ТВС в mol, N_1 — количество компонентов ПС в mol, кроме конденсированной фазы, не занимающей объема. Коэффициент избытка окислителя α задавался около 0.85. Зарегистрированная скорость распространения пламени лежит в пределах 6.3–7 м/с с учетом погрешности измерений. Для вычислений использовались кадры с $R \geq 5$ мм, а коррекция величин скорости с учетом

кривизны фронта пламени не проводилась. Расчет с использованием программы TERMORAS показал, что T пламени ТМДС не превышает 2420 К. Для вычисления N_1 использовались результаты расчета состава ПС (см. таблицу), незначительно отличающиеся от пропорций, следующих из правой части уравнения (1). Оценки u_L ТМДС по формуле (2) лежат в пределах 0.72–0.8 m/s, тогда как у этилена $u_L = 0.7$ m/s.

Таким образом, представляется реалистичным рассматривать вместо газообразных топлив жидкости для управления сверхзвуковыми реагирующими потоками, например, в трактах КС прямоточных воздушно-реактивных двигателей. При выборе подобных соединений должны учитываться опасность в обращении и реакционная способность.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.K. Smart, *AIAA J.*, **50** (3), 610 (2012). DOI: 10.2514/1.J051281
- [2] S. Xu, Q. Liao, *Proc. Eng.*, **99**, 338 (2015). DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.544
- [3] M. Karaca, S. Zhao, I. Fedjoun, N. Lardjane, *Aerospace Sci. Technol.*, **89**, 89 (2019). DOI: 10.1016/j.ast.2019.03.050
- [4] X. Gao, X. Han, Q. Fu, in *Sixth Int. Conf. on intelligent control and information processing (ICICIP)* (Wuhan, China, 2015), p. 501.
- [5] Z. Shaohua, X. Xu, *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: J. Aerospace Eng.*, **232** (10), 1864 (2017). DOI: 10.1177/0954410017708213
- [6] А.Л. Куранов, С.В. Колосенок, А.Б. Никитенко, А.А. Саваровский, Формула полезной модели RU 192 758 U1.
- [7] W. Han, P. Dai, X. Gou, Z. Chen, *Appl. Energy Comb. Sci.*, **1-4**, 100008 (2020). DOI: 10.1016/j.jaacs.2020.100008
- [8] P.K. Tretyakov, A.V. Tupikin, A.L. Kuranov, S.V. Kolosenok, A.A. Savarovskii, V.M. Abashev, *Combust. Explos. Shock Waves*, **56**, 533 (2020). DOI: 10.1134/S0010508220050044
- [9] G. Fritz, *Z. Anorgan. Allg. Chem.*, **273** (3-5), 275 (1953). DOI: 10.1002/zaac.19532730320
- [10] M. Gerstein, *Symp. (Int.) Combust.*, **7** (1), 903 (1958).
- [11] J. Chao, J. Lee, C. Bauwens, S. Dorofeev, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **36**, 471 (2015). DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.019
- [12] J. Pesti, G.L. Larson, *Organ. Process Res. Dev.*, **20** (7), 1164 (2016). DOI: 10.1021/acs.oprd.6b00124
- [13] M.J. Almond, R. Becerra, J.A. Bowes, J.P. Cannady, J.S. Ogden, N.A. Younge, R. Walsh, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **11** (40), 9259 (2009). DOI: 10.1039/B910549B