

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ H_2O_2 НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

УДК 536.46

В. А. Забайкин, Е. В. Перков, П. К. Третьяков

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск

Экспериментально исследовано воздействие малых добавок инертных и реагирующих примесей (типа перекиси водорода, продуктов ее разложения, CO_2 и др.) на воспламенение и горение водорода в высокотемпературном сверхзвуковом воздушном потоке. Показано, что введение примесей непосредственно в топливо не оказывает значительного влияния на горение H_2 , в то время как впрыск перекиси водорода либо небольших добавок чистого водорода перед соплом резко сокращает время задержки воспламенения, что указывает на активное влияние продуктов реакции. Сравнительные эксперименты с инертными добавками показали, что их воздействие проявляется только через снижение температуры воздушного потока.

Известно [1–6], что химически активные добавки к окислителю либо горючему при определенных параметрах среды могут оказывать существенное влияние на задержку воспламенения и время протекания химических реакций. В частности, в [1] численно показано, что добавление перекиси водорода в количестве менее 10 % (по объему) в метановоздушную смесь либо в смесь CH_4/O_2 /воздух с начальным уровнем температур $1200 \div 2025$ К значительно уменьшает время задержки воспламенения. Добавление водорода или пропана в смесь $CH_4/O_2/Ar$ также приводит к снижению времени задержки воспламенения [3]. В работе [4] показано, что добиться воспламенения H_2 в спутном сверхзвуковом воздушном потоке ($M = 2$, $T \leq 1400$ К) можно сжиганием части водорода в предкамере или подмешиванием 10 % H_2O_2 к топливу. Чистый водород в этих условиях не воспламенялся. При этом в [1, 4] отмечается важное влияние радикалов OH и H на ускорение химических реакций. Попутно выделен и эффект изменения концентрации NO при добавлении H_2O_2 , так же как и H_2 в [7].

Перекись водорода, в отличие от многих других химически активных веществ (например, веществ, содержащих фтор, или силанов, применение которых также возможно [5, 6]), в нормальных условиях значительно менее токсична, так как продуктами ее разложения являются H_2 , O_2 и вода. Кроме того, H_2O_2 применяется во многих областях техники, и производство ее освоено в промышленных масштабах. К недостаткам H_2O_2 можно отнести химическую нестабильность при объемной концентрации свыше 37,4 %, что накладывает определенные ограничения на транспортировку и время хранения высококонцентрированной перекиси водорода.

Цель данной работы — экспериментальная проверка возможности использования H_2O_2 и продуктов ее разложения (H_2 , H_2O) для улучшения воспламенения водорода и управления процессом горения в сверхзвуковом потоке горячего воздуха.

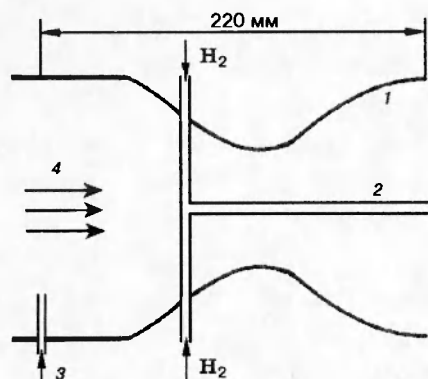


Рис. 1

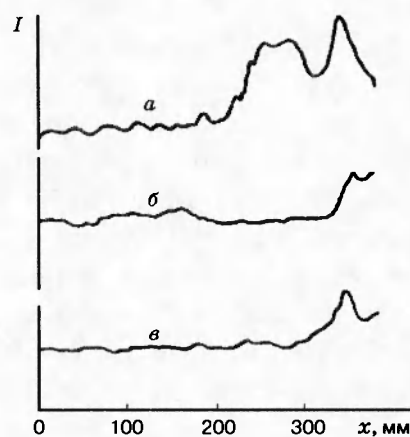


Рис. 2

Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — профилированное сопло, 2 — инжектор для подачи основного водорода, 3 — место подачи примесей в форкамеру, 4 — горячий воздух

Рис. 2. Осциллограммы интенсивности излучения радикала ОН по длине факела при подаче в инжектор:

а — только H_2 , б — $H_2 + H_2O$, в — $H_2 + H_2O_2$

Схема установки и эксперимента представлена на рис. 1. Нагретый в электродуговом подогревателе воздух проходил через форкамеру и далее истекал через сверхзвуковое осесимметричное сопло диаметром 50 мм. Водород поступал в инжектор диаметром 10 мм, расположенный по оси сопла. В струе горячего воздуха происходило его самовоспламенение и горение. Структура факела и интенсивность горения исследовались путем регистрации распределения излучения радикалов ОН [8], а форма факела фиксировалась видеокамерой. Был выбран базовый режим, в котором наблюдалось устойчивое горение H_2 с четкой задержкой воспламенения: число Маха воздушного потока $M = 2,2$; давление $p_0 = 7,2$ атм; температура торможения $T_0 = 2000$ К; расходы воздуха и водорода 580 и 4,6 г/с. Перекись водорода или другую исследуемую жидкость помещали в емкость объемом 16 см³, закрытую сверху поршнем.

В ходе эксперимента сначала подавался воздух в форкамеру, затем основной водород поступал в инжектор; производились запуск плазмотрона, выход на заданный режим и регистрация этого режима для последующего сравнения. Затем открывался клапан на магистрали подачи H_2O_2 , давление водорода из основной магистрали передавалось поршню. Перекись из емкости через диафрагму поступала в основную магистраль водорода, где смешивалась с ним и выбрасывалась через инжектор. Расход H_2O_2 обычно составлял 0,5 г/с. В экспериментах использовали перекись водорода стабильной (3 и 37,4%) и нестабильной (65%) концентраций. С целью сравнения вместо H_2O_2 применяли также дистиллированную воду.

Проведенные эксперименты показали, что на базовом режиме (подача только H_2) задержка воспламенения (по расстоянию) составила $x = 230$ мм от среза инжектора (рис. 2, а). С добавкой воды задержка воспламенения увеличивалась до $x \approx 340$ мм (рис. 2, б). При подаче H_2O_2 с концентрациями 3 и 37,4% практически никаких отличий от случая подачи воды не наблюдалось.

С добавкой перекиси водорода 65 %-й концентрации задержка воспламенения незначительно уменьшалась ($x \approx 320$ мм). Необходимо отметить, что зарегистрированный эффект находится в пределах точности регистрации и стабильности поддержания режима. Достоверным можно считать факт, что при концентрации $\text{H}_2\text{O}_2 \sim 65\%$ изменение задержки воспламенения по сравнению с добавкой воды не превышает 6 %.

Более существенный эффект наблюдается при подаче H_2O_2 в форкамеру. Базовый режим по воздуху и подаче H_2 в инжектор оставался прежним. Система подачи несколько отличалась, так как перекись водорода подавалась по отдельной магистрали и выдавливалась воздухом. Место подачи находилось в 130 мм от критического сечения сопла (220 мм от среза инжектора). В этом эксперименте применялась перекись водорода только 65 %-й концентрации. Регистрация излучения ОН оптико-механическим сканером, прямое наблюдение и видеосъемка показали, что при подаче H_2O_2 задержка воспламенения сразу исчезала.

В опытах с H_2O с увеличением расхода воды задержка воспламенения водорода увеличивалась, а при достижении расхода 5 г/с заметно снижалась и общая интенсивность горения. Визуальные наблюдения и цветная видеозапись свидетельствуют в пользу того, что не вся вода успевает испариться, часть ее попадает в зону горения в виде мельчайших капель. При длительной подаче воды (свыше 5 с) с таким расходом факел терял устойчивость, кратковременно фиксировался в районе четвертой и пятой «бочек» воздушной струи, а затем самопроизвольно затухал.

Аналогичное увеличение задержки воспламенения, а затем и погасание факела наблюдались и при подаче газообразной инертной примеси — углекислого газа, максимальный расход которого доходил до 20 г/с. Таким же оставалось поведение факела при замене CO_2 воздухом. В проведенных экспериментах эти газообразные добавки при больших расходах могли снижать температуру торможения воздушного потока на $100 \div 200$ К.

Надо отметить, что воздействие на водородный факел путем ввода H_2O , CO_2 , а затем и дополнительного воздуха в форкамеру приводило к ситуации, наблюдавшейся в [9], когда при снижении температуры воздуха на 130 К точка стабилизации последовательно смещалась на две «бочки» ниже по потоку. Таким образом, можно считать установленным, что охлаждение воздушного потока является основным фактором, воздействующим на факел при впрыске пассивных примесей. В то же время различие результатов при введении H_2O_2 в топливо и в форкамеру вызвано значительно отличающимися начальными условиями вступления H_2O_2 в химические реакции. В эксперименте с добавлением H_2O_2 прямо в топливо значительная доля воды, содержащейся в этой смеси (концентрация $\text{H}_2\text{O}_2 \leq 65\%$), только снижала скорость прогрева горючего до температуры самовоспламенения. А так как активные радикалы здесь изначально отсутствуют из-за низкой температуры топлива ($T \leq 300$ К), то задержка воспламенения только возрастала, в отличие от [4]. Но при подаче H_2O_2 в форкамеру там в любом случае успевало произойти воспламенение перекиси водорода (либо ее разложение, в том числе на H_2 , O_2 , H_2O) и образование активных радикалов, которые и воздействовали на струю водорода, истекающую из инжектора. Наличие же воды (в количестве, не превышающем десятые доли грамма) здесь не играло большого значения, так как понижение общей температуры воздуха при таком расходе воды незначительно.

Поэтому можно ожидать еще большего эффекта как при повышении концентрации H_2O_2 , так и при подаче в форкамеру чистого водорода. Эксперименты с вводом H_2 в форкамеру показали, что эффект воздействия H_2 и H_2O_2 на основной факел водорода очень похож. В обоих случаях при подаче добавок в форкамеру задержка воспламенения сразу

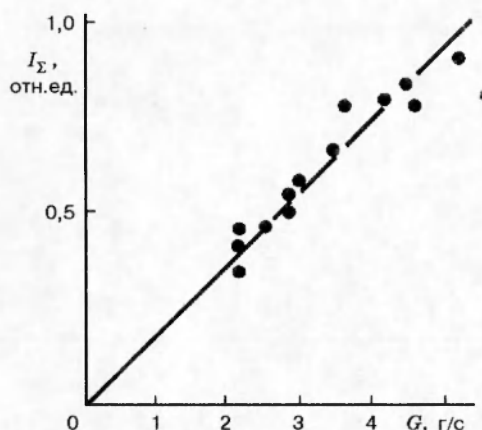


Рис. 3. Интегральная интенсивность излучения радикала ОН при различных расходах H_2 в инжектор

уменьшается до нуля (свечение начинается от кромки инжектора, но достаточно интенсивное горение заметно за скачком уплотнения первой «бочки»). Так продолжается во все время подачи данных примесей.

Вариант с добавкой H_2 изучен наиболее детально. Расходы дополнительного водорода составляли $\Delta G = 0,1 \div 1,3$ г/с, кроме отдельного случая с большим расходом ($5 \div 6,7$ г/с), когда инжектор был снят и регистрировалось излучение на выходе из сопла при подаче только дополнительного водорода. При $\Delta G = 0,1 \div 1,3$ г/с тепловизором не было зарегистрировано никакого излучения ни в ультрафиолетовой, ни в видимой областях спектра, что говорит об отсутствии возбуждения радикалов ОН, а также и Н, т. е. реакции окисления H_2 здесь не происходит. (Это означает, что либо весь H_2 сгорел в форкамере, либо произошло «замораживание» реакции при расширении потока в сопле). При расходе водорода $\Delta G = 5 \div 6,7$ г/с в ультрафиолетовой области спектра наблюдается слабое излучение (на пределе чувствительности фотоэлектронного умножителя), а визуально на выходе из сопла заметно свечение зеленого цвета. Данный факт может указывать на завершение реакций с участием меди, так как из этого материала изготовлено все сопло, включая дозвуковую часть.

В дальнейшем все эксперименты проводились только с малой добавкой водорода ($\Delta G < 1,3$ г/с).

Регистрация тепловизором интенсивности излучения ОН показала, что на базовом режиме ($G = 4,6$ г/с) добавка водорода в количестве 1 г/с не только изменяет задержку воспламенения, но и влияет на форму факела и общую интенсивность горения. Это может быть связано либо с неполным сгоранием основного водорода и увеличением полноты сгорания при добавке H_2 , либо с воспламенением и догоранием добавочного H_2 , не полностью сгоревшего в форкамере. Для выяснения данного обстоятельства была проведена серия экспериментов при $G = 2,2 \div 5,2$ г/с.

Зависимость интегральной интенсивности излучения радикала ОН от расхода водорода показана на рис. 3 (H_2 подается только в инжектор). Экспериментальные точки достаточно хорошо ложатся на прямую линию. Это говорит о том, что полнота сгорания при данных режимах близка к 100% [8]. Поэтому увеличение интенсивности горения при добавке H_2 в форкамеру связано с недогоранием там части водорода.

Для подтверждения этого предположения были поставлены эксперименты с раз-

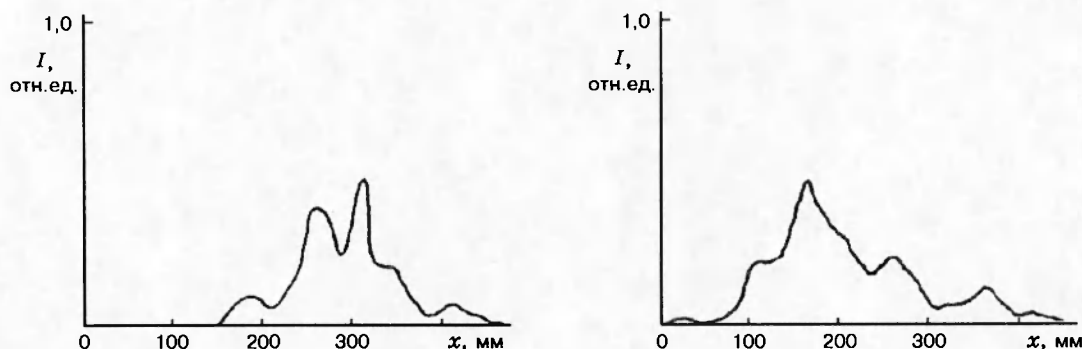


Рис. 4. Интенсивность излучения радикала ОН по длине факела при подаче водорода: а — только в инжектор (3 г/с), б — в инжектор (3 г/с) и в форкамеру (1,1 г/с)

личными значениями ΔG , но с постоянным расходом в инжектор. Оказалось, что при $\Delta G \leq 0,5$ г/с увеличения интенсивности горения основного факела не происходит. С увеличением ΔG интенсивность возрастает как раз на величину, соответствующую превышению значения $\Delta G = 0,5$ г/с (рис. 4).

Таким образом, в исследованном диапазоне расходов в форкамере всегда выгорало 0,5 г/с водорода. Остальная часть не успевала догореть, но сохраняла свою потенциальную активность, облегчала воспламенение основного водорода и догорала вместе с ним. Фактически здесь имеет место процесс лавинной активации горения [10], а механизм воздействия химически активных добавок везде одинаков и осуществляется через свободные радикалы ОН и Н [1, 4].

Вследствие этого становится возможным, используя малый объем химически активных добавок, резко сократить период задержки воспламенения, улучшить устойчивость факела и в итоге повысить эффективность горения. Влияние химически активных добавок можно использовать и для простого управления факелом, так как даже минимальное количество водорода (0,1 г/с) уменьшало задержку воспламенения основного топлива так же эффективно, как и при больших расходах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Golovitchev V. I., Pilia M. L., Bruno C. Autoignition of methane mixtures: The effect of hydrogen peroxide // J. Propulsion and Power. 1996. V. 12, N 4. P. 699–707.
2. Исаак Дж., Кусон Р. А. Способ воспламенения жидких и газообразных горючих в сверхзвуковом потоке // Ракетная техника и космонавтика. 1973. Т. 11, № 7. С. 174–175.
3. Lifshitz A., Sheller K., Burcat A. Shock-tube investigation of ignition in methane-oxygen-argon mixtures // Combust. Flame. 1971. Т. 16, N 3. P. 311–321.
4. Golovitchev V. I., Bruno C. Modeling of parallel injection supersonic combustion // ISTS 94-a-08. Yokohama, Japan, 1994.
5. Гросс Дж., Имэньюл Дж. Газовая динамика лазеров на сверхзвуковом смешении // Хим. лазеры. М.: Мир, 1980. С. 314.
6. Азатян В. В., Арутюнян Г. А. Промотирование окисления водорода с помощью цепного горения силана // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1982. № 3. С. 702–704.

7. Канило П. М. Токсические характеристики ГТД при добавках водорода в камеру сгорания // Проблемы машиностроения. Киев, 1983. № 20. С. 66–70.
8. Горение в сверхзвуковом потоке / В. К. Баев, В. И. Головичев, П. К. Третьяков и др. Новосибирск: Наука, 1984. С. 304.
9. Забайкин В. А., Лазарев А. М., Третьяков П. К. Использование газодинамической структуры свободной воздушной струи для управления горением водородного факела // Структура газофазных пламен: Материалы Междунар. семинара по структуре газофазных пламен. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1988. Ч. 1. С. 145–148.
10. Гуссак Л. А. О форкамерно-факельном инициировании лавинной активации горения // Горение и взрыв: Материалы 3 Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. М.: Наука, 1972. С. 401–408.

Поступила в редакцию 5/IV 1995 г.
