ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.95: 537.52

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ПРОПАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

А. Ф. Александров, А. П. Ершов, А. А. Логунов, О. С. Сурконт, В. А. Черников, В. М. Шибков

(*кафедра физической электроники*)

E-mail: ershov@ph-elec.phys.msu.su

Экспериментально исследовано воспламенение сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси электродным разрядом при варьировании способа подачи пропана в сверхзвуковой поток, конфигурации электродов относительно потока и длительности энерговклада.

Еще в 1960-е годы в ЦАГИ был проведен цикл исследований электрических разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха с целью нагрева последнего (см. обзор [1]). Сейчас разряды в сверхзвуковых потоках составляют обширный раздел плазменной аэродинамики, охватывая частотный диапазон от разрядов постоянного тока (РПТ) до сверхвысокочастотных (СВЧ) разрядов, причем не только в потоках воздуха, но и в топливно-воздушных смесях. Накопленный опыт позволяет утверждать, что применение газоразрядной плазмы является наиболее перспективным для воспламенения таких потоков. Однако выбор оптимальных условий воспламенения, т. е. способов организации разряда и его характеристик, далеко не закончен.

В настоящей работе изучались возможности воспламенения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси электродным разрядом при варьировании способа подачи пропана в сверхзвуковой поток, конфигурации электродов относительно потока и длительности разрядного тока. В экспериментах использовалась баллонно-вакуумная аэродинамическая труба кратковременного (приблизительно 3 с) действия с соплом Лаваля, рассчитанным на число Маха $M = 2$, сверхзвуковой канал которой содержал рабочую секцию с зоной внезапного расширения, предотвращающую возможное запирание канала после воспламенения смеси [2]. В этой зоне зажигался тот или иной вид электродного разряда. Эксперименты были выполнены в диапазоне начальных давлений в системе подачи воздуха $P_0 = 1$–6 атм, давлений в барокамере $p = 50$–300 Торр и постоянном начальном давлении пропана $P_1 = 5$ атм.

Были выполнено две серии экспериментов. В первой серии с помощью специального смесителя происходило предварительное (до сопла Лаваля) перемешивание воздуха с пропаном до соотношения, близкого к стехиометрическому. Секция, в которой происходило воспламенение и проводились измерения, была выполнена из кварцевой трубы диаметром 50 мм и длиной 0.5 м.

Электрический разряд создавался как поперек, так и вдоль потока. Источником питания служил импульсный модулятор с регулируемым напряжением до 24 кВ, током до 40 А, длительностью импульсов $\tau = 2$–1000 мкс и частотой повторения импульсов $f = 1$–10 Гц. Модулятор также мог работать в режиме одиночных импульсов. Основные эксперименты были проведены с поперечным к потоку размещением электродов.

Для определения факта воспламенения потока использовались два независимых метода. В первом проводилась регистрация излучения радикала CH, во втором — регистрация заряженных частиц (электронов, ионов) с помощью электрического зонда [3]. Измерения проводились на большом (существенно превышающем протяженность разряда) расстоянии от электродов вниз по потоку.

Во второй серии экспериментов использовался аэродинамический канал, рабочая секция которого имела прямоугольное сечение с зоной внезапного расширения 25×40 мм (представляющей собой обратный уступ) и была снабжена кварцевыми окнами. За рабочей секцией размещались две измерительные секции того же сечения. Пропан вводился через топливораздаточные фланцы как непосредственно в сверхзвуковой тракт, так и в область за уступом. Для регистрации факта воспламенения использовались датчики давления, размещенные во всех секциях рабочего канала. Воспламенение потока осуществлялось продольно-поперечным разрядом (ППР) постоянного тока, для создания которого использовался источник питания с выходным напряжением до 5 кВ и максимальным током до 20 А, величина которого регулировалась набором балластных сопротивлений.

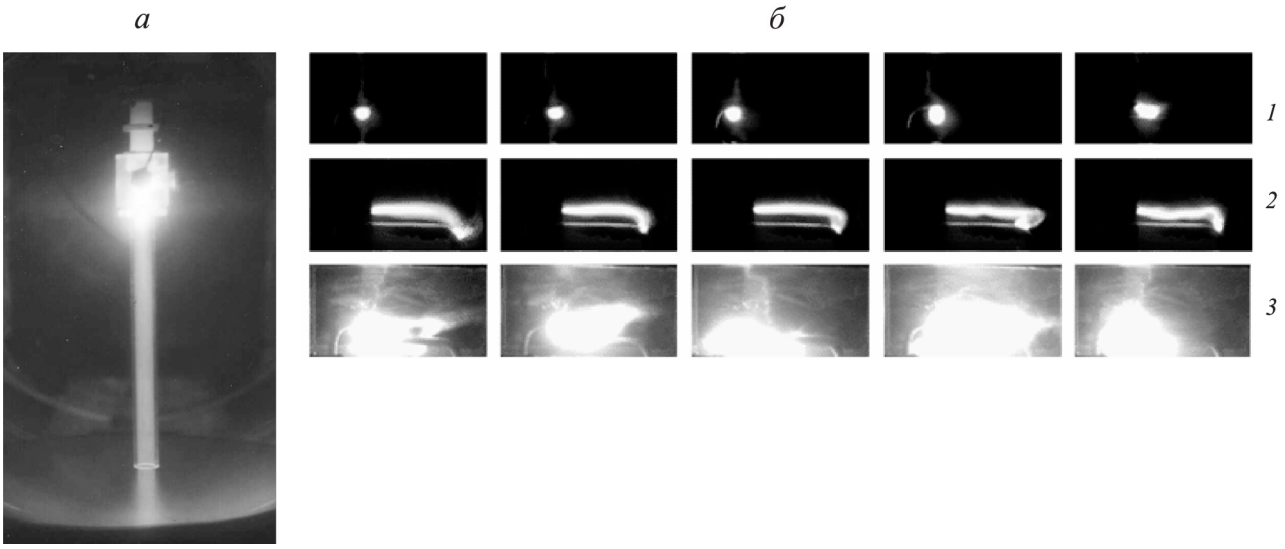

Рис. 1. Воспламенение сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси: *а* — поперечным импульсно-периодическим разрядом, $P_0 = 2$ атм, $p = 200$ Торр, $\tau = 200$ мкс, $f = 10$ Гц, $I = 20$ А; *б* — продольно-поперечным разрядом, $\tau = 1$ с, $I = 18$ А: без потока, $p = 50$ Торр (*1*); в потоке: $P_0 = 2$ атм, $p = 50$ Торр (*2* — воздуха; *3* — пропан-воздушной смеси)

Интегральная картина разряда и воспламенения потока регистрировалась цифровым фотоаппаратом, скоростная съемка осуществлялась цифровой CCD камерой. Типичная картина воспламенения потока разрядом в двух описанных выше сериях экспериментов показана на рис. 1. Поток направлен сверху вниз для импульсного разряда и слева направо в случае ППР.

Измеренные осциллограммы напряжения разряда позволили аналогично [4] оценить среднее (по пространству и времени) значение электрического поля в разрядном канале. Сравнение значений электрического поля в импульсном поперечном разряде (ИПР), РПТ и ППР в сверхзвуковых потоках воздуха и при наличии добавки пропана, которая во всех экспериментах не превышала 30%, показано на рис. 2. Видно, что значение электрического поля в плазме определяется разрядным током и давлением в ресивере. Длительность импульса, конфигурация электродов относительно потока и добавка пропана практически не влияют на величину поля — отличие лежит в пределах ошибки измерений.

В экспериментах с воспламенением предварительно перемешанного потока импульсным разрядом определялась величина минимальной длительности импульса, необходимой для воспламенения, в зависимости от разрядного тока. Для этого использовался режим одиночного импульса; при данной величине тока длительность импульса уменьшалась до момента исчезновения сигналов излучения СН и зонда. Порог воспламенения определялся путем изменения тока при максимальной длительности импульса (≈ 1000 мкс).

В экспериментах с многоточечной подачей пропана в канал сначала находились оптимальные условия для воспламенения путем варьирования

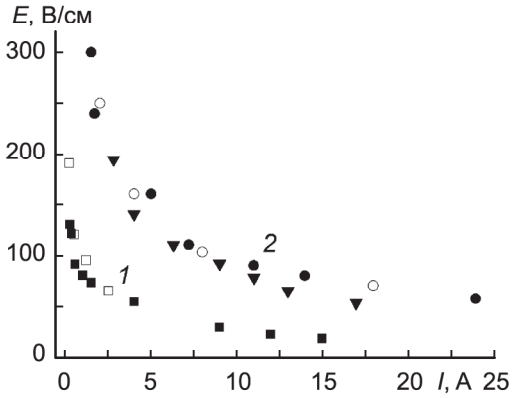

Рис. 2. Напряженность электрического поля в плазме электродных разрядов в сверхзвуковых потоках газа: *1* — $P_0 = 1$ атм, воздух, поперечный разряд: ■ — ИПР [4], □ — РПТ; *2* — $P_0 = 4$ атм: ● — ИПР, воздух [4]; ▼ — ППР, воздух; ○ — ИПР, воздух с пропаном

отношения поступающих масс пропана и воздуха и положения электродов разряда. На рис. 3, *а* показана вероятность воспламенения W пропан-воздушной смеси плазмой ППР в зависимости от массового соотношения пропана и воздуха ($\alpha = m_1/m_2$, где m_1 и m_2 — соответственно массы пропана и воздуха, поступающие в сверхзвуковой канал). Видно, что наилучшее воспламенение наблюдается при соотношении масс пропана и воздуха $\alpha \approx 0.08$. Далее вариацией тока определялся порог воспламенения.

Результаты этих экспериментов показаны на рис. 3, *б*. Измеренные зависимости электрического поля от разрядного тока позволяют представить полученные данные в энергетической переменной — удельной электрической мощности, вкладываемой в разряд, в зависимости от длительности импульса.

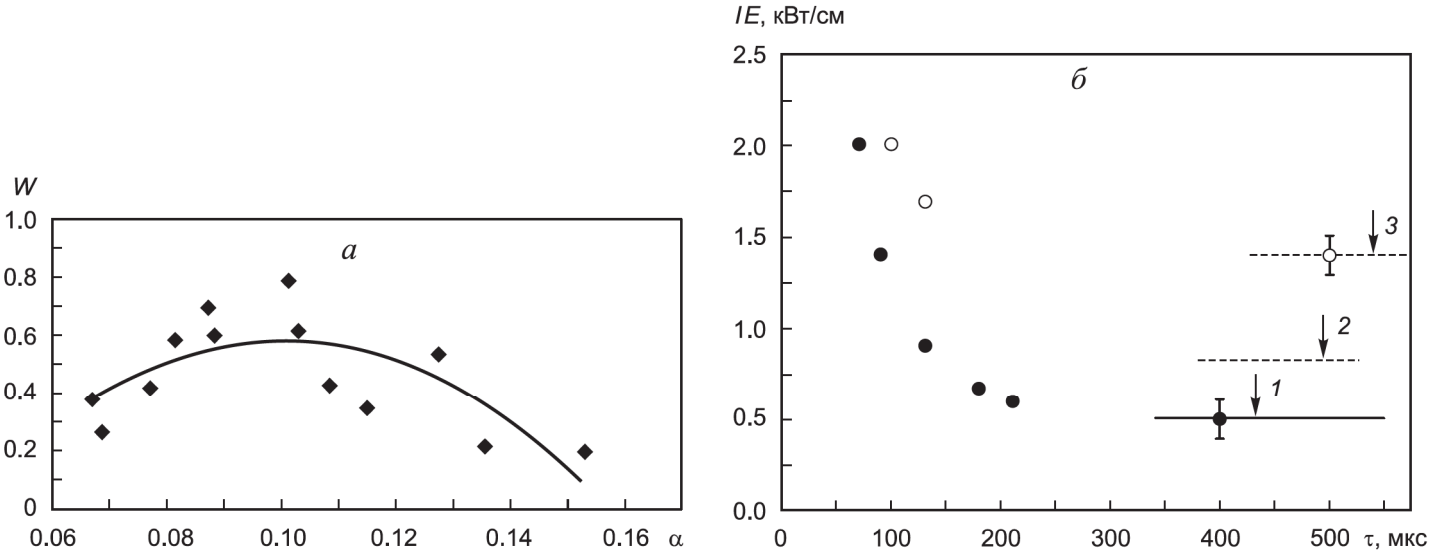

Рис. 3. Относительная вероятность воспламенения смеси ППР от массового соотношения пропана и воздуха: $P_0 = 6$ атм, $p = 25$ Тор, $I = 18$ А (*а*); пороги воспламенения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси (*б*): *1* — ИПР для предварительно перемешанного потока стехиометрического состава; *2* — ППР при подаче в канал оптимальной доли пропана; *3* — ИПР для предварительно перемешанного потока в режиме генерации УВ, $P_0 = 4$ атм, $p = 200$ Торр, $M = 2$

Видно, что с уменьшением тока минимальная длительность импульса, обеспечивающая воспламенение предварительно перемешанной смеси, увеличивается, при этом наблюдается порог по мощности на единицу длины разрядного канала $EI \approx 0.5$ кВт/см. Для ППР и оптимальной доли пропана, инжектируемой в канал, порог воспламенения выше и составляет $EI \approx 0.8$ кВт/см. По-видимому, это связано с неполным перемешиванием пропана с воздухом. Наконец, при высоких энерговкладах наблюдается воспламенение с генерацией ударной волны, порог этого эффекта приблизительно в три раза превышает порог обычного воспламенения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН № П-09 «Исследование вещества в экстремальных условиях», подпрограмма 2 «Фундаментальные проблемы магнитоплазменной аэродинамики».

Литература

1. *Алферов В.И.* // Известия РАН. МЖГ. 2004. № 6. С. 163.
2. *Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б.* и др. // Нелинейный мир. 2005. **3**, № 1–2. С. 54.
3. *Ardelyan N.V., Ershov A.P., Chuvashev S.N.* et al. // 42nd AIAA Aerospace sciences meeting and exhibit. Reno (USA), 2004. AIAA 2004-1016.
4. *Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б.* и др. // ТВТ. 2004. **42**, № 4. С. 516.

Поступила в редакцию
06.07.07