

К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.95: 537.52

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПРОПАН-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ**А. Ф. Александров, А. П. Ершов, С. А. Каменщиков, А. А. Логунов,
В. А. Черников***(кафедра физической электроники)*

E-mail: erшов@ph-elec.phys.msu.su

Экспериментально получен взрывной режим горения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси, инициированный импульсным разрядом магнитоплазменного компрессора. Обнаружена обратная волна сверхзвукового горения, распространяющаяся со скоростью 450 м/с навстречу потоку.

Работа является продолжением исследований воспламенения и горения топлива в сверхзвуковом потоке, проводимых на физическом факультете МГУ в течение последних лет [1–3]. Она посвящена экспериментальному исследованию горения сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси, инициированного мощным импульсным разрядом.

В экспериментах использовалась баллонно-вакуумная аэродинамическая труба кратковременного действия [3]. Давление воздуха в камере высокого давления P_0 могло меняться от 1 до 10 атм, в камере низкого давления p от 760 до 1 торр, давление пропана $P_{\text{рг}}$ было фиксированным $P_{\text{рг}} = 5$ атм. Сверхзвуковой канал трубы с обратным уступом содержал четыре взаимозаменяемых секции, позволяющих размещать тот или иной генератор плазмы и наблюдать за процессом горения. Пропан вводился в канал через топливораздаточные фланцы как непосредственно в сверхзвуковой тракт, так и в область за уступом.

Плазма создавалась импульсным плазмотроном типа магнитоплазменного компрессора (МПК), длительность первого квазипериода которого составляла 70 мкс, а начальное напряжение на накопительном конденсаторе U_0 могло изменяться в пределах 3–5 кВ. В зависимости от внешних параметров из плазмотрона истекает плазменная струя той или иной конфигурации, скорость которой на стадии энерговыделения составляет 1–2 км/с. Это значительно превышает скорость воздушного потока (около 500 м/с), поэтому на этапе энерговыделения поток не оказывает значительного влияния на процесс формирования плазменной струи. По данным спектральных измерений равновесная температура плазмы в центре струи в течение разрядного тока достигает величины 1–2 эВ, концентрация электронов достигает в центре струи величины порядка

 10^{17} см^{-3} , а на периферии около 10^{15} см^{-3} [4].

Для регистрации процесса горения использовался диагностический комплекс, состоящий из 20 датчиков давления, расположенных вдоль всего канала, рефракционного датчика, двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), спектрометра и персонального компьютера. Датчики давления позволяли определять профиль статического давления вдоль канала как функцию времени. Генератор импульсной плазмы находился в месте размещения датчика 11, датчики 8 и 9 были размещены ближе к соплу, а датчик 7 — непосредственно на выходе сверхзвукового сопла, т.е. три этих датчика регистрировали распространение возмущения давления против потока. Датчик 13 и последующие фиксировали изменение давления по потоку.

На рис. 1 показаны сигналы датчиков давления для случаев разряда МПК в потоке воздуха (а) и пропан-воздушной смеси (б). В отсутствие пропана импульсный разряд вызывает слабое возмущение давления в канале, которое достаточно быстро затухает, распространяясь как по потоку, так и против него. Совершенно другой вид имеют сигналы с датчиков давления в случае напуска пропана: наблюдается резкий пик давления в канале, характерный для взрывного режима горения, а возмущение давления распространяется по всему каналу практически с одинаковой амплитудой. Однако за сверхзвуковое сопло возмущение не распространяется (5-й датчик соответствует входу в сверхзвуковое сопло).

Приведенные сигналы показаны в достаточно большом временном масштабе. Переход к более мелкому масштабу позволяет выявить определенную закономерность. На рис. 2 приведены сигналы датчиков давления в таком масштабе, в этом случае генератор плазмы находился в месте размещения датчика 15. На рис. 2 отчетливо видно

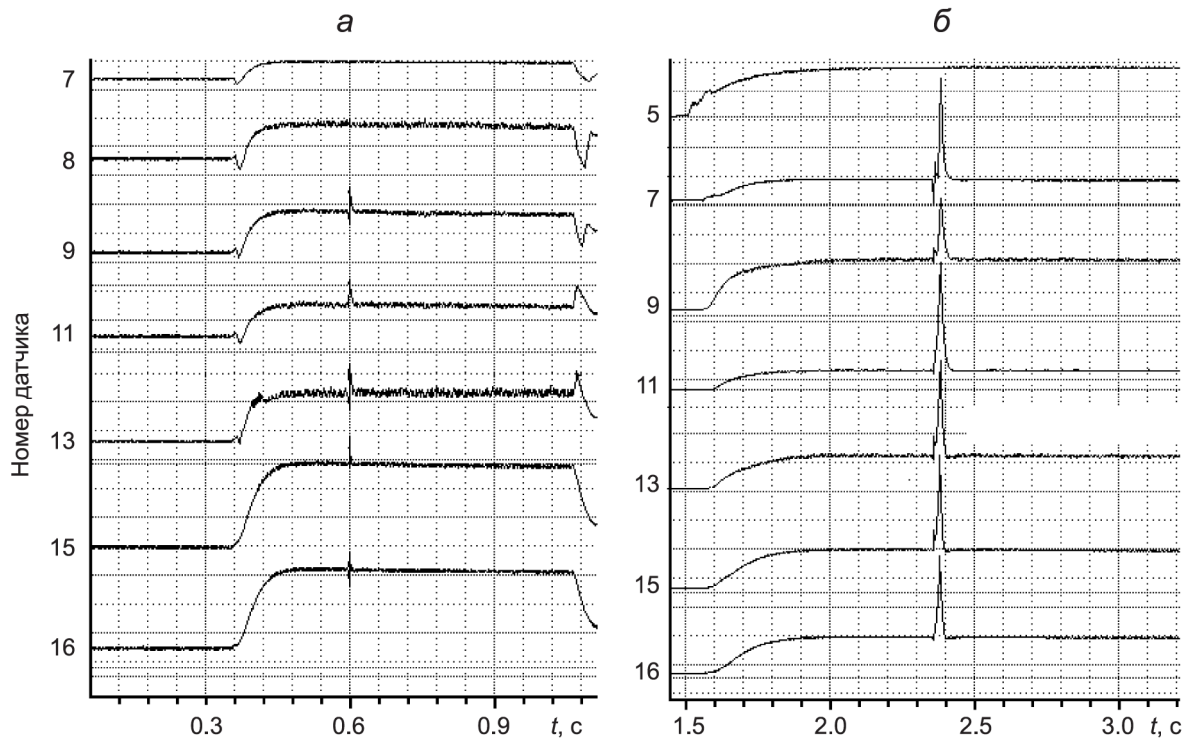


Рис. 1. Осциллограммы датчиков давления при $U_0 = 3.7$ кВ, $P_0 = 2.5$ атм, $P_{\text{пр}} = 0$, $p = 40$ торр, $\tau = 70$ мкс (а) и $U_0 = 3.7$ кВ, $P_0 = 2.5$ атм, $P_{\text{пр}} = 5$ атм, $p = 40$ торр, $\tau = 70$ мкс (б)

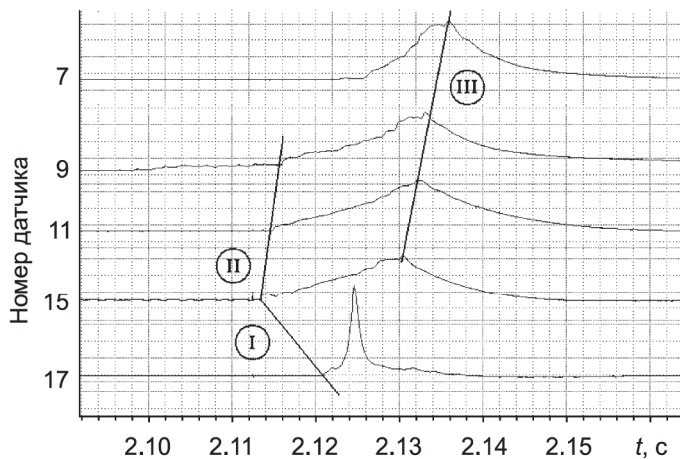


Рис. 2. Осциллограммы датчиков давления при $U_0 = 3.7$ кВ, $P_0 = 2.5$ атм, $P_{\text{пр}} = 5$ атм, $p = 40$ торр, $\tau = 70$ мкс

распространение волн возмущения давления, связанных с собственно разрядом МПК, по потоку (символ I) и против него (символ II). Кроме того, на обоих рисунках регистрируется обратная волна возмущения давления, распространяющаяся против потока (символ III). Под номером 17 на рис. 2 приведены сигналы с датчика давления, расположенного у входа в вакуумную барокамеру. Первые две волны связаны с фронтами плазменного образования, созданного плазмотроном [4]. Рефракционный метод подтвердил наличие двух ударных скачков, порождаемых плазмой. Средняя скорость первого фронта, распространяющегося по направлению потока, составляет (480 ± 50) м/с, а скорость

второго фронта — (230 ± 30) м/с. Все скорости определяются в системе координат канала. Третья, обратная волна, представленная на рис. 2 (III), представляет наибольший интерес в рассматриваемом процессе. Она обладает постоянной, избыточной амплитудой давления (порядка 1 атм), средней скоростью 400–500 м/с в системе координат канала и сопровождается сильной акустической ударной волной. В формирующей секции до сверхзвукового сопла скорость обратной волны падает до 200 м/с.

Наличие трех волн возмущения давления подтверждается фотоэлектрическими измерениями. На рис. 3 представлены сигналы с двух ФЭУ, один из которых расположен в конце аэродинамического канала (верхний луч), а другой — у входа в барокамеру (нижний луч). Первый сигнал 1 на верхней осциллограмме соответствует свечению плазменной области, созданной МПК. Ширина этого сигнала по времени соответствует временному интервалу между волнами I и II на рис. 2 и равна 4 мс. Второй сигнал 2 на верхней осциллограмме связан со свечением, возникающим в результате горения пропан-воздушной смеси на фронте обратной волны давления. Он имеет длительность 2–4 мс и приходит с временной задержкой 14–16 мс относительно начала первого импульса. И наконец, сигнал 3 на нижней осциллограмме объясняется горением смеси в прямой волне давления, его длительность около 2–3 мс, и он задержан относительно импульса 1 на временной интервал порядка 11–13 мс. Отметим,

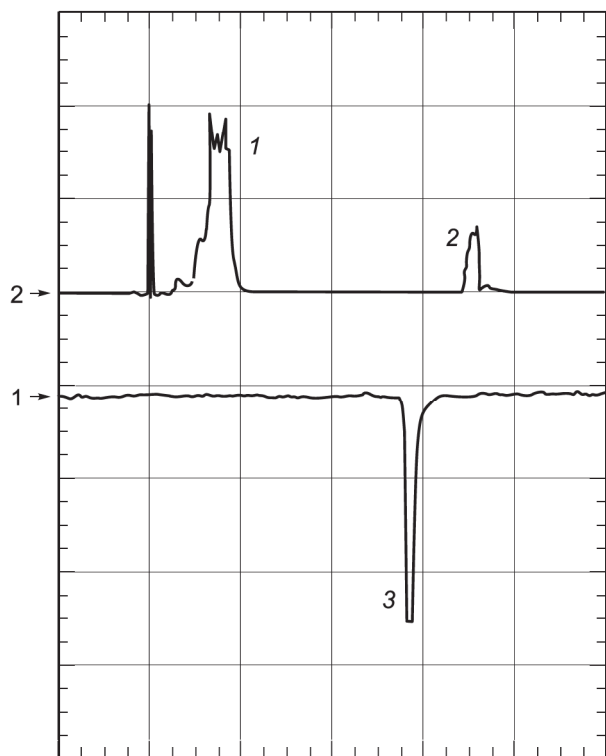


Рис. 3. Осциллограммы сигналов ФЭУ при $U_0 = 3.7$ кВ, $P_0 = 2.5$ атм, $P_{\text{рг}} = 5$ атм, $p = 40$ торр, $\tau = 70$ мкс

что как сигнал свечения в прямой волне, так и сигнал давления (рис. 2, датчик 17) имеют бóльшую амплитуду и меньшую длительность по сравнению с сигналами на фронте обратной волны.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в пределах ошибки наблюдается временная корреляция между сигналами, полученными из раз-

личных источников: фотоэлектрических измерений, данных рефрактометрии и сигналов датчиков давления. На их основании можно сделать следующие предположения.

1. Созданная импульсом МПК плазма распространяется по каналу в виде нагретой области с двумя фронтами, которые четко фиксируются рефракционным методом.

2. В определенный момент времени в некотором сечении канала происходит взрывное воспламенение топливной смеси и ее дальнейшее горение, приводящее к резкому повышению давления в канале. В результате по потоку распространяется волна давления, на фронте которой происходит горение топливной смеси. Против потока начинает распространяться обратная волна возмущения давления, на фронте которой также происходит непрерывное горение топливной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Ориентированные фундаментальные исследования» (грант 07-01-12010).

Литература

1. Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б. и др. // Нелинейный мир. 2005. **3**, № 1–2. С. 54.
2. Aleksandrov A., Vyckov V., Chernikov V. et al. // Proc. of 44rd Aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, USA, 2006. AIAA 2006-1462.
3. Александров А.Ф., Ершов А.П., Колесников Е.Б. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2007. № 4. С. 77.
4. Ершов А.П., Колесников Е.Б., Тимофеев И.Б. и др. // ТВТ. 2006. **44**, № 4. С. 485.

Поступила в редакцию
11.07.2007