

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА И ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.95 : 537.52

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗРЯДА**А. П. Ершов, С. А. Каменщиков, Е. Б. Колесников, А. А. Логунов,
А. А. Фирсов, В. А. Черников***(кафедра физической электроники)*

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

Предложен и экспериментально апробирован в сверхзвуковом аэродинамическом канале прямой метод измерения и мониторинга скорости потока с помощью создания в нем маломощного поперечного импульсно-периодического разряда.

При исследовании высокоскоростных потоков с подводом тепла или тепловыделением необходимым элементом диагностики является мониторинг скорости потока. В экспериментах, как правило, скорость потока определяется косвенным образом. Чаще всего в аэродинамических трубах скорость определяют по перепаду давления, размещая по длине и сечению канала систему датчиков давления [1]. Однако такая система требует проведения дополнительной калибровки и определения расчетных коэффициентов. Схемы, применяемые в лазерных измерителях скорости [2], достаточно сложны. Поэтому в последнее время вырос интерес к методам, основанным на использовании вспомогательных разрядов [3]. Однако практически все предложенные методы малоприменимы для горючих смесей.

В настоящей работе предлагается метод, основанный на создании в потоке маломощного импульсного разряда с поперечным размещением электродов. При этом скорость потока определяется как $v = \Delta s / \Delta t$, где величиной Δt является длительность импульса разряда, а в качестве Δs выступает протяженность разряда вдоль потока.

Свойства поперечного импульсного разряда в сверхзвуковых струях воздуха были детально исследованы в работах [4, 5]. Скорость распространения разряда определяется суперпозицией двух скоростей: скорости потока и скорости ионизации, определяемой процессами переноса. При больших давлениях и относительно небольших токах скорости процессов переноса существенно меньше скорости потока, и скорость распространения разряда определяется скоростью нейтрального газа.

Два фактора влияют на возмущение скорости нейтрального газа при организации разряда в потоке — наличие электродов и тепловыделение в разряде. Изменение скорости потока в канале за счет введения электродов пропорционально отношению

площадей поперечных сечений электродов и канала. Оценка согласно [6] показывает, что это изменение пренебрежимо мало (порядка 1%). Результаты моделирования влияния разряда на параметры сверхзвукового потока [7] показывают, что при маломощных и коротких разрядных импульсах скорость потока в межэлектродном промежутке практически не отличается от скорости невозмущенного потока.

Эксперименты проводились на аэродинамической установке, предназначенной для исследования плазменно-стимулированного воспламенения и горения сверхзвукового потока углеродно-воздушных смесей. Она представляет собой баллонно-вакуумную систему кратковременного (около 3 с) действия. Через иллюминаторы из полированного оргстекла в канал вводились два вольфрамовых электрода диаметром 0.8 мм, заключенных в керамические трубки диаметром 1.5 мм с расстоянием между центрами 10 мм, которые размещались симметрично относительно оси канала. Импульсно-периодический разряд создавался с помощью источника питания с напряжением $U \approx 10$ кВ, позволяющего менять длительность импульса от 3 до 100 мкс при скважности $Q = 10^3$. При этом средняя потребляемая электрическая мощность не превышала 100 Вт. Фотосъемка разряда осуществлялась цифровой видеокамерой, длительность кадра которой можно было изменять от 3 мкс до 1 с, при частоте повторения 50 кадров в секунду. Аксиальная протяженность L_z разряда определялась по сделанным фотоснимкам.

Для определения корректности предложенного метода было проанализировано влияние на результат измерений ряда факторов: длительности импульса, величины разрядного тока, чувствительности скоростной камеры, а также величины полного давления. Измерения были проведены во всех секциях канала.

Типичный вид импульсного разряда в потоке воздуха в первой и последней секциях канала при двух

длительностях импульса и двух значениях полного давления в ресивере P_0 показан на рис. 1. Как видно из приведенных фотоснимков, протяженность плазменной струи в потоке существенным образом зависит от длительности разрядного импульса Δt и практически не зависит от величины P_0 .

Зависимость аксиальной протяженности разряда от длительности импульса $L_z(\Delta t)$ определялась в результате усреднения данных не в одном, а в серии пусков при различной чувствительности камеры и значениях разрядного тока. Влияние этих факторов оказалось в пределах статистического разброса. Типичный вид зависимости $L_z(\Delta t)$ для первой секции канала наглядно демонстрирует рис. 2, а. Усредненная зависимость $L_z(\Delta t)$ позволила корректно перейти к зависимости продольной составляющей скорости потока от длительности импульса (рис. 2, б). Видно, что найденное значение скорости падает по мере роста длительности импульса, стремясь к некоторой постоянной величине. В то же время вариация полного давления слабо сказывается на результатах. Аналогичные результаты имеют место в других секциях канала, при этом скорость потока в первой секции является наибольшей по сравнению с другими. Такое поведение скорости как в зависимости от длительности импульса, так и по длине канала связано, очевидно, с возникновением вихревых возмущений в потоке, т. е. с турбулентностью последнего. Их наличие вызывает появление составляющих скорости, перпендикулярных к оси потока, приводя к нарушению линейной зависимости длины

плазменной струи от длительности зондирующего импульса. Поэтому следует ограничиваться относительно небольшими значениями длительности разрядного импульса, чтобы минимизировать влияние вихревых возмущений.

Для проверки полученных результатов были использованы два независимых метода. Первый основан на измерении распределения статического давления по длине сверхзвукового канала, во втором скорость измерялась с помощью трубок Пито–Прандтля [1]. На рис. 3 представлены результаты измерения скорости холодного потока различными методами в зависимости от продольной координаты X вдоль канала. За начало отсчета принят выходной срез сопла.

Видно, что в области первой секции значения скорости потока, полученные различными методами, в пределах ошибки практически совпадают. Дальнейшее расхождение величин скорости по длине канала связано, по-видимому, с вихревыми эффектами, возникающими при развитии значительной турбулентности в потоке. Кроме того, в потоке могут существовать косые скачки уплотнения, возникающие на стыках секций канала. Оба эти эффекта приводят к значительным ошибкам (и даже к полной неприменимости метода) при определении скорости потока при помощи Пито–Прандтля. Расчет скорости потока по распределению статического давления приводит к более высоким значениям скорости также из-за того, что в этом методе течение потока в канале предполагается квази-

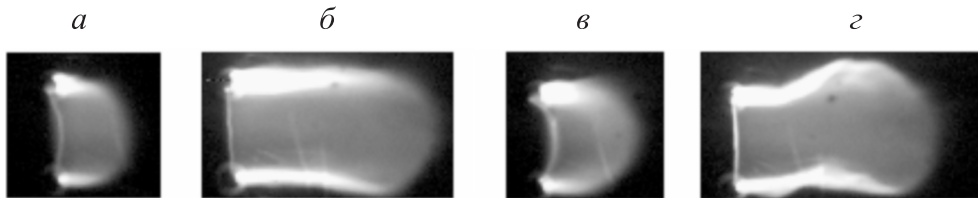


Рис. 1. Фотоснимки импульсного разряда в потоке воздуха в канале

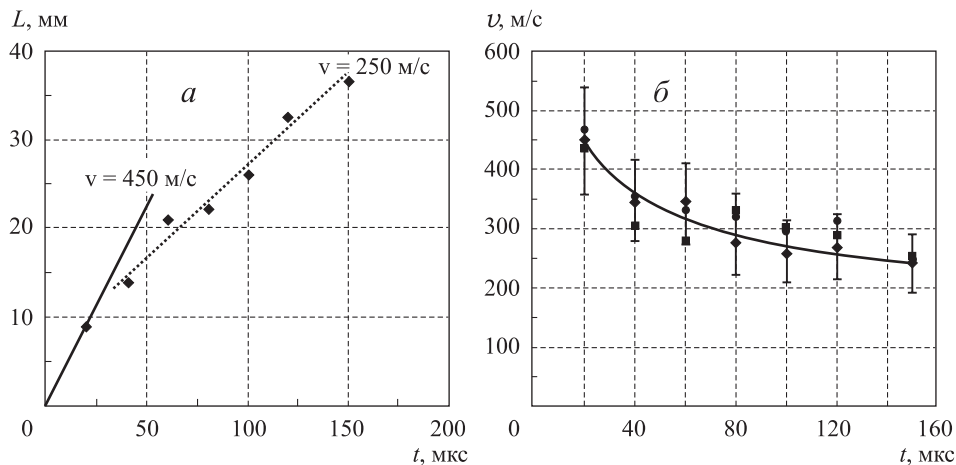


Рис. 2. Зависимость длины разряда и скорости потока от длительности импульса в первой секции: (а) $P_0 = 2$ атм; (б) $\diamond P_0 = 2$ атм, $\blacksquare P_0 = 3$ атм, $\bullet P_0 = 5$ атм

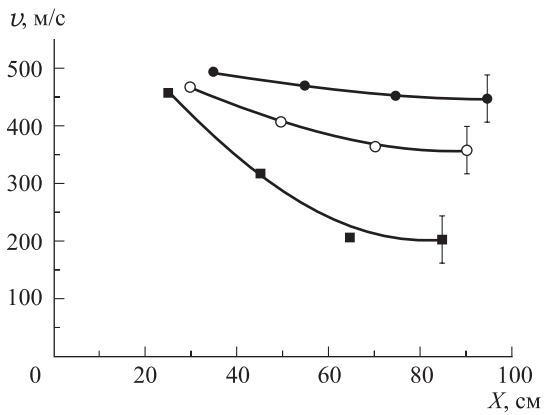


Рис. 3. Распределение скорости потока по длине сверхзвукового канала. $P_0 = 2$ атм; ● — метод статического давления, ○ — предлагаемый метод, ■ — метод трубок Пито

стационарным, что не выполняется в условиях развитой турбулентности.

Хотя представленные выше результаты получены для потока воздуха, первые эксперименты в потоке пропан-воздушной смеси показали применимость предлагаемого подхода и в этом случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке комплексной программы научных исследований

Президиума РАН № 09 «Исследование вещества в экстремальных условиях» Подпрограмма 2 «Фундаментальные проблемы магнитоплазменной аэродинамики».

Литература

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М., 1976.
2. Дубнищев Ю.Н. Лазерные доплеровские измерительные технологии. Новосибирск, 2002.
3. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа. М., 2001.
4. Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б. и др. // Теплофизика высоких температур. 2004. **42**, № 4. С. 516.
5. Ершов А.П., Сурконт О.С., Тимофеев И.Б. и др. // Теплофизика высоких температур. 2004. **42**, № 5. С. 669.
6. Горлин С.М., Слезингер И.И. Аэромеханические измерения. М., 1964.
7. Громов В.Г., Ершов А.П., Левин В.А., Шибков В.М. // Теплофизика высоких температур. 2006. **44**, № 2. С. 185.

Поступила в редакцию
06.07.2007