

Р. Х. Зиятдинов

ЗОНДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СКОРОСТНОМ ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ

Ключевые слова: электростатический зонд, импульсный зондовый ток, сверхзвуковой плазменный поток.*Приведены результаты зондовых измерений в сверхзвуковом потоке плазмы продуктов сгорания. Измерения проводились с применением импульсной методики, а также в режиме определения вольтамперных зондовых характеристик. Показано, что изменение формы токовых импульсов связано с деструкцией электрических приэлектродных слоев.**Keywords:* electrostatic pulsed probe, high-velocity plasma, current-voltage characteristics.*The results of pulsed electrostatic probe and sweep double-probe current-voltage characteristic measurements in high-velocity plasma are presented. The article shows, that pulsed probe current in high-velocity plasma distorts because of electrostatic probe layers structures are not formed.*

Зондовые методы находят широкое применение для исследования характеристик различных плазменных образований [1, 2]. Как правило, зондовые методы используются в стационарных плазмах или в плазменных потоках, движущихся с дозвуковой скоростью. Известны импульсные зондовые методы диагностики плазмы [2, 3]. В ряде случаев они применяются для диагностики плазмы продуктов сгорания [4, 5].

Импульсные методы основаны на определении динамических характеристик зонда при ступенчатом измерении зондового потенциала. Зондовый ток при импульсном питании не совпадает по форме с импульсом приложенного напряжения и имеет нестационарные выбросы на переднем и заднем фронтах. Аналогичные выбросы наблюдались рядом авторов как в разреженной, так и в плотной плазме [2, 3, 5, 6]. Типичная осциллограмма зондового тока при импульсных измерениях представлена на рис. 1.

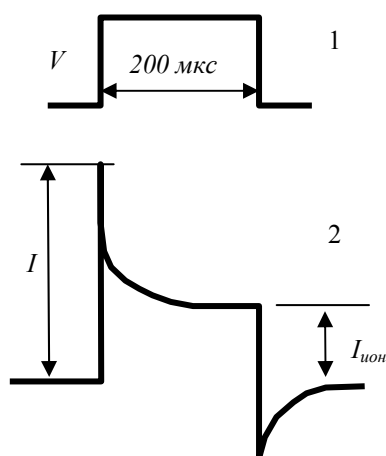


Рис. 1 – Осциллограммы импульсов напряжения (1) и зондового импульсного тока в плазме продуктов сгорания (2)

Причину возникновения нестационарных выбросов тока многие авторы объясняют по-разному. В работе [2] появление выбросов тока объясняется образованием тока смещения, возникающего из-за емкостного импеданса, образованного зондом и пристеночным электрическим слоем. В работе [3] в качестве возможной причины нестационарных выбросов токов

рассматривается дополнительный ток смещения, обусловленный движением границы приэлектродного слоя. В ряде работ [4, 5, 6] указывается, что в слабоионизированной плазме нестационарные выбросы тока при импульсном питании полностью обусловлены электронным явлением. В начальный момент времени ($t=0$) электроны вследствие малой инерционности мгновенно создают электронный ток на положительно заряженный электрод. В дальнейшем ($t > 0$) электронный ток уменьшается при перераспределении носителей заряда в приэлектродном слое.

В работе [7] проведен теоретический анализ работы импульсного зонда в скоростном плазменном потоке и сделан вывод о зависимости характера импульсного зондового тока от скорости потока. В качестве критерия изменения формы импульсного

тока выбрано соотношение $\frac{\tau_{\text{проб}}}{\tau_{\text{уст}}}$, (где $\tau_{\text{проб}}$ – время

пребывания плазмы у зонда; $\tau_{\text{уст}}$ – время установления зондового тока). Вопрос о влиянии критерия

$\frac{\tau_{\text{проб}}}{\tau_{\text{уст}}}$ на характер импульсного тока является

важным как для развития импульсных методов диагностики, так и в связи с актуальностью применения зондовых методов для диагностики высокоскоростных плазменных потоков с низкой электронной плотностью. В данных условиях применение общепринятых методов диагностики затруднено.

Необходимо отметить, что применение зондовых методов в скоростных потоках плазмы ограничено в связи с возникновением дополнительных факторов, искажающих результаты зондовых измерений. В числе этих факторов можно назвать ударную ионизацию в окрестности зонда, нарушение гидродинамической структуры потока и приэлектродных слоев. В скоростной плазме с низкой электронной плотностью возможно появление на электродах зонда высоких электрических потенциалов вследствие электризации [8]. Тем не менее, в ряде случаев применение электростатических зондов в скоростном потоке оправдано и позволяет получать полезную информацию для решения практических

задач. В работе [9] приведены результаты использования электростатического для оценки износоустойчивости лопаток газотурбинных двигателей. Результаты аналогичных исследований с использованием электростатических зондов представлены в [10, 11, 12]. В [10] была выявлена связь характера электризации зонда, установленного в скоростном потоке, с интенсивностью испарения стенок канала генератора низкотемпературной плазмы.

В работе [13] приведены результаты исследования динамики импульсных зондов в сверхзвуковых и дозвуковых плазменных потоках. Была выявлена зависимость формы импульсного тока от скорости потока. При сверхзвуковом режиме потока нестационарные выбросы тока не наблюдались, и форма импульсов тока совпадала с импульсом напряжения. При дозвуковом режиме потока импульсные токи имели нестационарные выбросы, характерные для зондов в стационарной плазме. Исследование состояния приэлектродных слоев и их влияние на динамику импульсного тока не проводилась.

В данной работе приведены результаты исследования импульсных зондовых токов в скоростном потоке плазмы продуктов сгорания с учетом состояния приэлектродных электрических слоев. В качестве источника плазмы использовалась модельная камера с твердым топливом. Применялись двойные симметричные зонды. Electroды зонда диаметром 1 мм устанавливались перпендикулярно оси потока. В качестве электродов применялись проводники с малой эмиссионной способностью (молибден). Исследования показали, что при температурах, характерных для изучаемого объекта, плавающий потенциал таких электродов практически не изменяется при нагревании. Таким образом удалось избежать влияния термоэлектронной эмиссии на токовые характеристики зондов. Длительность импульсов напряжения выбиралась с учетом времени полного восстановления приэлектродных электрических слоев и варьировалась в пределах 100-1000 мкс с учетом данных работы [5]. Параллельно с целью анализа состояния приэлектродных слоев определялись вольтамперные характеристики зондов на различных скоростных режимах. Известно [1, 2], что характер вольтамперных зондовых характеристик связан со структурой приэлектродных электрических слоев.

Результаты исследования подтвердили результаты работы [7, 13] о влиянии скорости потока на характер импульсного зондового тока. Типичная осциллограмма импульсных токов представлена на рис.2. На дозвуковом участке импульсы тока имеют нестационарные выбросы, характерные для стационарной плазмы. В этом случае время пребывания плазмы у зонда $\tau_{\text{преб}}$ превышает время установления приэлектродных слоев $\tau_{\text{уст}}$, и скорость амбиполярной диффузии ионов на зонд выше скорости потока. Вольтамперные характеристики имели вид, типичный для стационарной плазмы (рис.3). Соответственно, приэлектродные электрические слои на дозвуковом режиме не искажались. Необходимо отметить, что зондовые кривые пересекают ось напряжений не в начале координат. Это означает, что между электро-

дами существует разность потенциалов, несмотря на отсутствие тока от внешнего источника питания. Это указывает на различие плавающих потенциалов электродов. Одной из причин данного явления может являться термоэлектрический эффект, вызванный неоднородностью плазменного потока в местах расположения электродов.

На сверхзвуковом участке потока нестационарные выбросы импульсного зондового тока отсутствуют, и по форме импульсный ток совпадает с импульсом напряжения (рис.2).

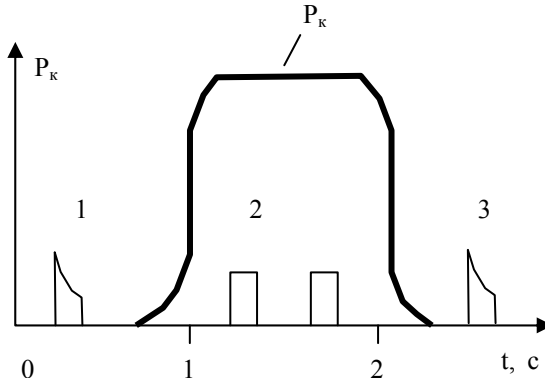


Рис. 2 – Зависимость динамической реакции токовых импульсов от режима истечения: 1,3 – дозвуковое истечение; 2 – сверхзвуковое истечение; P_k – давление в камере сгорания

В этом случае $\tau_{\text{уст}}$ больше времени пребывания плазмы у зонда ($\tau_{\text{уст}} > \tau_{\text{преб}}$). В итоге приэлектродные слои у электродов не формируются. Это обстоятельство является важным, так как позволяет измерять с помощью зондов электропроводность плазменного потока в режиме свободной диффузии зарядов. Предположение об отсутствии приэлектродных слоев подтверждается при анализе вольтамперных характеристик зондов (рис. 3). Вольтамперные характеристики имеют линейный характер независимо от величины приложенного потенциала.

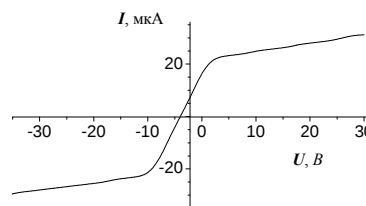


Рис. 3 – Вольтамперные характеристики двойного зонда при дозвуковом истечении плазмы

Необходимо отметить, что вольтамперные характеристики пересекают ось напряжений не в начале координат. В этом случае в цепи зондов возникает разность потенциалов (до 50 В). Следовательно, в сверхзвуковом потоке электроды зонда приобретают высокие плавающие потенциалы. Причиной этого является электризация зондов, связанная с низкой электронной плотностью плазмы [8]. Разница в плавающих потенциалах электродов

вызвана неоднородностью плазменного потока в местах расположения электродов.

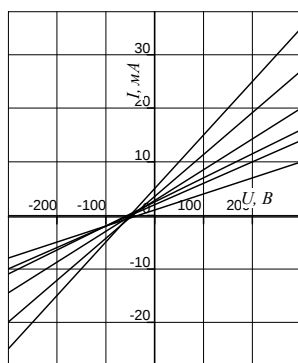


Рис. 4 – Вольтамперные характеристики двойного зонда при сверхзвуковом режиме истечения плазмы

Литература

1. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. Атомиздат, 1969.
2. Чен Ф. Электрические зонды // Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хадлстоуна и С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
3. Smy P.R., Greig J.R. Transient response of the Langmuir probe at low pressures // J. Phys (Brit J. Appl. Phys.) / 1968, D1, №3, p.331-359.
4. Якайтис Ф.Л., Кузьмин В.П., Пинчук В.А., Прокофьев А.И. / Экспериментальное исследование электропроводности продуктов сгорания керосина с воздухом при различной интенсивности процесса горения // Теплофизические свойства низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1970.
5. Алемасов В.Б., Потапов Г.П., Зиятдинов Р.Х., Бугаенко А.Г., Петрик М.М. Исследование электродных методов измерения электропроводности продуктов сгорания. – М.: Наука, 1976. – 62с.
6. Cohen Ira M. Transient current overshoot to electrical probes in a continuum, slightly ionized plasmas // Phys. Fluids, 1973, Vol.16, №5, p.700-701/
7. Мусин А.К. Исчезновение носителей зарядов в плазме, движущейся в электрическом поле / Теплофизика высоких температур, 1964, Т.2. – 142с.
8. Зиятдинов Р.Х. О зондовых измерениях в потоке слабоионизированной плазмы / В сб. Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов. Казань, вып.1, 1978 (Казанский авиационный институт).
9. Couch R.P. Detecting abnormal turbine engine deterioration using electrostatic methods / I. Aircraft, 1973, 15, №10, p.592-595.
10. Алемасов В.Е., Зиятдинов Р.Х., Абдршин Р.Н. Использование электростатических методов для оценки качественных характеристик источников низкотемпературной плазмы / Плазменная техника, технология и их применение на предприятиях республики / Тезисы докладов конференции / Казань, 1981, с.78-79.
11. Зиятдинов Р.Х. Контроль динамики образования тонких пленок в плазмохимии / Вестник Казанского технологического университета. – 2011, №12, с.233.
12. Зиятдинов Р.Х. Исследование плавающих потенциалов электродов в плазмохимических процессах // Вестник Казанского технологического университета. – 2014, №3, с.277-278.
13. Зиятдинов Р.Х., Абдршин Р.Н. Исследование газодинамических потоков импульсным зондовым методом // Тезисы докладов научно-практического семинара по электрофизике горения. Караганда, 1985, с.101-103.