

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 τ / τ_0 , (где τ - время пребывания плазмы у зонда; τ_0 - время установления зондового тока). Вопрос о влиянии критерия 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 износостойчивости 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. Electrodes 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 превышает время установления приэлектродных слоев, 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 электродами 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; РК - давление в камере сгорания В этом случае больше времени пребывания плазмы у зонда ($>$). 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