

УДК 537.527

ГАЗОВЫЕ РАЗРЯДЫ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА**А. П. Ершов, И. Б. Тимофеев, В. А. Черников, В. М. Шибков**

Московский государственный университет, Москва, Россия

Представлены результаты измерений микроскопических параметров плазмы поперечного разряда постоянного тока и импульсно-периодического разряда с токами $I \sim 1-10$ А в сверхзвуковом потоке воздуха с числом Маха $M \approx 2$ в области давлений 10–100 торр. Описаны эксперименты по созданию СВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке газа в этих условиях.

Интерес к разрядам в сверхзвуковых потоках газа в последнее время резко вырос в связи с попытками использования газоразрядной плазмы для радикального снижения лобового сопротивления при сверхзвуковых полетах в атмосфере. Однако при исследовании свойств разряда постоянного тока в сверхзвуковых потоках в ранних работах [1, 2] основное внимание уделялось вопросам организации разряда и измерению его внешних параметров. В работах [3, 4] упор делался на механизм снижения лобового сопротивления с помощью такого разряда. При этом отсутствие измерений параметров плазмы не позволило однозначно определить причину его аэродинамического воздействия. Некоторые экспериментальные данные о микроскопических параметрах плазмы получены лишь в работе [5]. Таким образом, имеющихся данных о параметрах плазмы разрядов даже постоянного тока явно недостаточно не только для обоснованного решения прикладных вопросов, но и для понимания физической картины горения разряда в сверхзвуковых потоках газа.

Цель настоящей работы — провести по возможности комплексное измерение параметров плазмы разряда постоянного тока (включая импульсно-периодический режим горения) в сверхзвуковом потоке воздуха различными диагностическими методами. Условия экспериментов: число Маха потока $M \leq 2$, область давлений затопленного пространства 10^1-10^2 торр. Кроме того, представляется полезным дополнить работу описанием эксперимента по организации СВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке в этих же условиях как наиболее реального типа разряда для создания плазмы перед движущимся объектом.

Для проведения экспериментов использовалась барокамера, представляющая собой цилиндр из нержавеющей стали длиной 3 м и диаметром 1 м, вакуумная система которой позволяла откачивать ее до давления 10^{-5} торр. Сверхзвуковой поток воздуха создавался при наполнении барокамеры атмосферным воздухом через электрический гидравлический клапан, на выходной трубе которого размещалось цилиндрическое сопло Лавала с выходным диаметром 26 мм, рассчитанное на число Маха $M = 2$ при $p = 40$ торр. Для визуализации структуры сверхзвукового потока использовалась теневая установка с импульсной лампой вспышкой длительностью 1 мкс.

Для создания СВЧ-разряда использовался магнетронный генератор с длиной волны 2,4 см и импульсной СВЧ-мощностью до 0,5 МВт. Модулятор с регулируемым напряжением до 30 кВ и максимальным током 40 А позволял варьировать длительность СВЧ-импульса от 1 до 300 мкс и частоту следования в пределах 1–1000 Гц. Этот же модулятор использовался для создания импульсно-периодического разряда. Разряд постоянного тока создавался с помощью независимого источника питания с напряжением до 5 кВ и током до 3 А. В двух последних случаях напряжение от источников питания подключалось через регулируемое балластное сопротивление к электродам, выполненным из стального прутка $\varnothing 3$ мм с симметрично сточенными на плоскость концами с межэлек-

тродным расстоянием 10 мм, размещенным на расстоянии $\sim 0,5$ см ниже среза сопла.

Схема синхронизации работы электрического гидравлического затвора и источника питания обеспечивала необходимые временные интервалы между открытием клапана и включением и выключением разряда.

СВЧ-мощность вводилась в барокамеру через диэлектрическую линзу, осуществляющую фокусировку СВЧ-энергии в область вблизи сопла Лаваля. Для дополнительной фокусировки использовалось также металлическое сферическое зеркало, располагаемое соосно с СВЧ-линзой с противоположной стороны сверхзвукового потока воздуха.

Внешний вид СВЧ-разряда в отсутствие потока существенным образом зависит от давления затопленного пространства. При относительно низких давлениях ($p < 100$ торр) разряд представляет собой многоплазмодную структуру. Концентрация электронов в плазмоидах — порядка 10^{12} см⁻³. При этом внутри отдельных плазмоидов наблюдаются ярко светящиеся образования, вытянутые вдоль вектора напряженности электрического поля ϵ . С повышением давления степень неоднородности разряда увеличивается, и при атмосферном давлении разряд представляет собой набор ярко светящихся тонких каналов (нитей) с концентрацией электронов в них $\sim 10^{15}$ см⁻³ и газовой температурой ~ 2000 К [6].

Наличие сверхзвукового потока воздуха кардинально не меняет внешнего вида СВЧ-разряда. При этом поток не вызывает сноса разряда как целого, и разряд существует в фокальной области пучка в течение всего СВЧ-импульса. Для малых длительностей ($\tau = 2-20$ мкс) наблюдается незначительный вынос плазмы из объема разряда, который растет с увеличением длительности и достигает величины 1—2 см при $\tau = 300$ мкс (рис. 1).

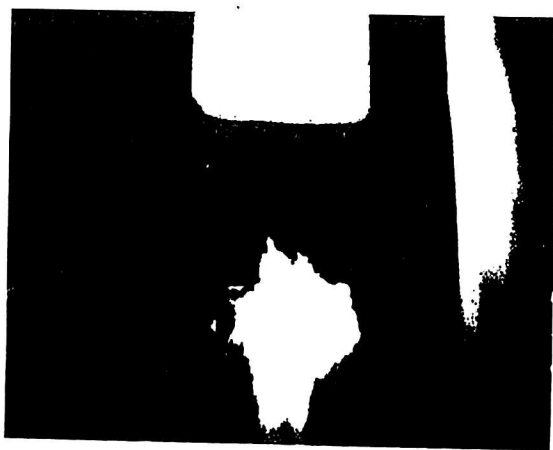


Рис. 1. СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке воздуха:
 $p = 350$ торр; $\lambda = 2,4$ см;
 $\tau = 300$ мкс; $W = 200$ кВт

Иная картина наблюдается при импульсно-периодической модуляции разряда постоянного тока (рис. 2). Внешне разряд в сверхзвуковом потоке представляет собой два яркосветящихся канала с четко очерченными границами без зоны перемыкания той же яркости. Вместо этого между каналами наблюдается слабо-светящаяся диффузная зона, через которую замыкается разрядный ток. С увеличением длительности импульса длина каналов растет пропорционально длительности, достигая величины 12 см при $\tau = 500$ мкс (см. рис. 2, з). Этот размер фактически близок к длине плазменной струи в непрерывном режиме разряда постоянного тока (см. рис. 2, б). Отметим, что в условиях проведения экспериментов не было замечено существенного влияния разряда на структуру сверхзвуковой воздушной струи.

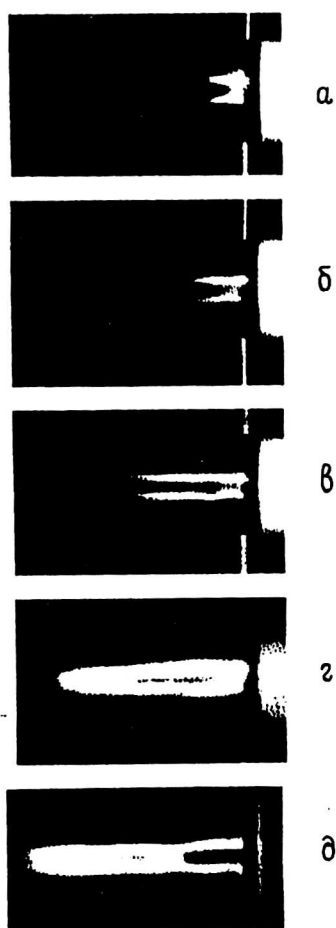


Рис. 2. Типичная картина импульсно-периодического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха: $p = 40$ торр; $i = 4,5$ А; $f = 70$ Гц; длительность импульса τ , мкс: а — 25; б — 50; в — 250; г — 500; д — разряд постоянного тока

Регистрация временных зависимостей тока и напряжения разряда, плавающего потенциала и электрического поля проводилась на двухлучевом запоминающем осциллографе С8-17. Осциллографирование тока и напряжения разряда показывает, что они имеют ярко выраженный пульсирующий, близкий к периодическому характер, причем напряжение изменяется практически пилообразно, а ток — колоколообразно. Частота пульсаций существенно зависит от давления воздуха в затопленном пространстве: она уменьшается с 15 до 2 кГц при увеличении давления газа с 25 до 120 торр, причем с повышением давления наблюдалось уменьшение глубины модуляции, а сами колебания тока носили более хаотичный характер. В меньшей степени частота пульсаций зависит от разрядного тока — она уменьшается с увеличением разрядного тока.

Разряд в сверхзвуковом потоке воздуха характеризуется высокой разностью потенциалов. Несмотря на малое межэлектродное расстояние, максимальные значения напряжения на разряде при давлении, например 40 торр, составляют около 3 кВ. ВАХ разряда, построенная для усредненных по периоду значений тока и напряжения, является слабопадающей: при изменении усредненного тока на порядок (от 0,2 до 2 А) усредненное по периоду напряжение на разряде падает от 1,7 до 1,4 кВ.

Кроме интегральной ВАХ, измерялись распределение потенциала пространства и напряженности электрического поля вдоль потока. Для этого использовался двойной зонд, описанный ниже, который мог как перемещаться вдоль потока, так и вращаться вокруг своей оси. При этом каждый из зондов был соединен с землей через делитель 47 МОм — 47 кОм, напряжения с меньших сопротивлений делителей осциллографировались. Полученное распределение

усредненного во времени и объеме плавающего потенциала в разряде постоянного тока показано на рис. 3. Распределения потенциала в обеих канадах вдоль потока близки к зеркально-симметричным относительно направления истечения сверхзвуковой струи. Максимальное значение поля достигается вблизи электродов и монотонно уменьшается вниз по потоку. Временная зависимость плавающего потенциала в анодной и катодной частях разряда в одинаковых условиях различна. Электрическое поле имеет как продольную, так и поперечную компоненту.



Рис. 3. Аксиальное распределение потенциала в разряде постоянного тока в сверхзвуковом потоке воздуха: $p = 40$ торр; $I = 1,1$ А

Для измерения концентрации электронов использовались три независимых метода: определение концентрации электронов по штарковскому уширению линии водорода H_{β} с $\lambda = 486,1$ нм (в этом случае в сверхзвуковой поток воздуха добавлялось малое количество водорода), СВЧ-интерферометрия и специально разработанный нами для условий сверхзвукового потока плазмы метод зондов.

Для измерения концентрации электронов по уширению спектральных линий, а также колебательной и газовой температур была собрана диагностическая установка, включающая в себя спектрограф СТЭ-1, систему линз и зеркал, многоканальный оптический регистратор спектра и персональный компьютер. Для измерения пространственного распределения параметров плазмы использовалась специальная призма, позволяющая изменить ориентацию разряда на 90 град по отношению к входной щели спектрографа. Изображение разряда проецировалось через выходное окно барокамеры с помощью кварцевых линз и зеркал на щель спектрального прибора. Диаметры и фокусные расстояния линз выбирались такими, чтобы на щели спектрографа получить уменьшенное ($\kappa = 10$) изображение разряда и полностью использовать при этом светосилу прибора. Линейная дисперсия спектрографа СТЭ-1 изменялась от 0,35 до 1 нм/мм в спектральном диапазоне 300—600 нм. Датчик для регистрации излучения плазмы, разработанный на основе ПЗС линейки, формирует видеосигнал, пропорциональный интенсивности излучения. Видеосигнал кодируется аналого-цифровым преобразователем, размещенным на интерфейсной карте, и передается в память компьютера в виде массива данных. Программа обработки позволяет получить на экране компьютера и распечатать на принтере спектры исследуемых разрядов. Система работает в двух режимах: синхронном и асинхронном. В синхронном режиме импульсы

формирования разряда синхронизованы с циклами экспозиции и считывания ПЗС линейки. Такой режим позволяет исследовать одиночные разряды либо синхронно накапливать информацию об импульсно-периодических разрядах. Асинхронный режим дает усредненный за время наблюдения спектр и может использоваться для исследования разрядов постоянного и переменного токов.

Для независимого измерения концентрации электронов использовался 8-мм СВЧ-интерферометр с диэлектрическими (полистироловыми) антеннами, собранный по классической схеме. Отношение длины к диаметру антенн составляло порядка 20, обеспечивая близкий к минимальному угол расходимости пучка. Антенны интерферометра размещались перпендикулярно оси струи. Для оценки средней концентрации электронов $\langle n_e \rangle$ использовалась модель бесконечного (поперек направления зондирования) плоского слоя в приближении геометрической оптики. Возможность применения такой модели обусловлена тем, что антенны размещались в зоне смешения струй, там, где поперечный размер приблизительно в три раза превышает длину зондирующей волны, что позволяет пренебречь ее рефракцией. При этом ошибка измерения $\langle n_e \rangle$ не превышает 20% [7]. В выражении для фазового сдвига $\Delta\varphi$ учитывалась поправка на частоту столкновений ν_{en} :

$$\Delta\varphi = -\pi F \frac{d \langle n_e \rangle}{\lambda n_{e\text{кр}}} \frac{\omega^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2},$$

где F — формфактор;

$n_{e\text{кр}}$ — критическая концентрация электронов, которая для используемой длины волны $\lambda = 8$ мм равна $n_{e\text{кр}} = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

d — размер струи в направлении зондирования;

ω — круговая частота СВЧ-поля.

Несомненным преимуществом метода зондов при диагностике сугубо неоднородного объекта является локальность измеряемых параметров. Нестационарность объекта требует разработки автоматизированной системы зондовых измерений. При этом к трудностям диагностики классического дугового разряда, связанным с высокими значениями зондового тока и температуры газа, добавляются еще две проблемы: высокие (киловольтные) значения потенциала пространства относительно земли и чрезвычайно высокий (киловольтный) уровень его колебаний. Работы, в которых решалась подобная задача, авторам неизвестны.

Совокупность экспериментальных условий, отмеченная выше, диктует необходимость применения метода двойного зонда и использования оптической развязки. Была разработана электрическая схема, состоящая из двух блоков: собственно зондового и измерительного, подключенного к компьютеру. Блоки соединены оптическими световодами длиной 100 м. Для снятия ВАХ используется схема с разрядом емкости. Оптический сигнал, сформированный в зондовом блоке и пропорциональный зондовому току, передается в измерительный блок, где осуществляются обратное преобразование и оцифровка сигнала. В конкретной схеме мгновенные значения тока измеряются через каждые 10 мкс, число точек задается пользователем. Линейность преобразования проверяется путем автоматизированной процедуры специальной настройки схемы с использованием резистора, которая проводится перед началом измерений.

Особенностью наблюдаемых ВАХ двойного зонда в разряде являлись ярко выраженные области насыщения ионного тока и резкая область перехода между ними. Из-за сильного уровня флуктуаций использовалось либо численное, либо радиотехническое сглаживание.

Для интерпретации зондовых измерений необходимы анализ режима работы зонда и решение соответствующей прямой задачи, т. е. расчет ВАХ в условиях эксперимента. Принципиальной особенностью рассматриваемой плазмы является наличие очень сильных собственных электрических полей при том, что во всех зондовых теориях собственное поле разряда полагается равным нулю. Исключение составляет лишь работа [8], где описан вид электронной ветви ВАХ в условиях, когда можно пренебречь диффузией электронов по сравнению с их дрейфом в собственном поле разряда. Наличие сверхзвукового режима обтекания и возможное влияние химических реакций еще больше усложняют ситуацию. Таким образом, теория зондов в исследуемых условиях должна быть построена заново.

Для выяснения физики взаимодействия сверхзвуковых потоков плазмы с зондом в сильных электрических полях было проведено аналитическое описание работы зонда, причем для разработки теоретических основ и проверки упрощающих предположений потребовалось подробное математическое моделирование в двумерной нестационарной постановке.

Расчетная система уравнений включала: уравнения газодинамики, уравнения Максвелла, уравнения баланса числа ионов и движения ионов, уравнение баланса электронной температуры. Частоты соударений, скорости и сечения реакций и другие характеристики плазмы воздуха вычислялись по известным формулам.

Рассматривался случай, когда цилиндрический зонд ориентирован нормально к электрическому полю разряда E и скорости потока газа V_g , причем $E \perp V_g$. Задача решалась с помощью специального комплекса программ для решения систем уравнений в частных производных на нерегулярных треугольных адаптируемых сетках.

Результаты численного расчета [9] показывают, что в отличие от случая зонда в режиме сплошной среды в дозвуковом потоке, в сверхзвуковых потоках обязательно ограничение сверху на радиус применяемого зонда. Формирование зон разрежения приводит к тому, что отношение E/n_g существенно усиливается в одной из двух зон разрежения (со стороны, где усилено поле). Это приводит к сильному локальному росту электронной температуры и скорости ионизации. Эта дополнительная ионизация сильно влияет на общий ток зонда (может повышать его в несколько раз).

Этот эффект может существенно возмущать плазменный поток и сильно влиять на его вольт-амперную характеристику, что ограничивает область применимости зондовой диагностики. Однако если радиус зонда не слишком велик, то применима простая аналитическая формула для связи ионного тока насыщения и концентрации ионов:

$$I_i(R) \approx e4\pi\mu_i R L N_i E_0 (T_g/T_\infty)^{1/3},$$

- где $I_i(R)$ — значение ионного тока насыщения;
 μ_i — подвижность ионов;
 R — радиус зонда;
 L — длина рабочей части зонда;
 T_g — температура нейтральных частиц газа;
 E_0 — напряженность электрического поля вблизи зонда;
 e — заряд электрона.

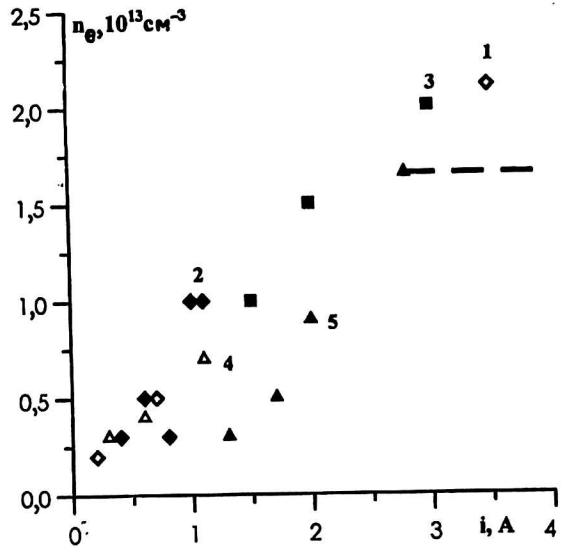
При ее применении значение напряженности электрического поля находилось по разности плавающих потенциалов зондов, а температура газа бралась из спектроскопических измерений.

На рис. 4 показано сопоставление трех независимых методов измерения концентрации заряженных частиц в плазме разряда постоянного тока, а также импульсно-периодического разряда. В наших условиях концентрация электронов линейно увеличивается с ростом разрядного тока. Зондовый и спектральный сиг-

налы получены из области струи на расстоянии $z \approx 30-40$ мм от электродов, а СВЧ-зондирование проводилось для $z \approx 40-50$ мм, соответствующей области слияния струй. При токах разряда $I > 2,5$ А имеет место отсечка зондирующего сигнала, т. е. при этих токах средняя по объему концентрация превышает критическую.

Рис. 4. Сравнение концентрации электронов в разряде постоянного тока и ИПР-разряде, измеренной различными методами, $p = 40$ торр:

○ — 1 — зонд $\varnothing 0,2$ мм; ◆ — 2 — зонд $\varnothing 0,5$ мм; ■ — 3 — спектральный метод; △ — 4 — микроволновый интерферометр; △ — 5 — микроволновый интерферометр в импульсно-периодическом разряде; - - - - - уровень отсечки



Из рис. 4 видно, что наблюдается хорошее совпадение концентрации электронов, измеренной различными независимыми методами. Это свидетельствует в пользу новой зондовой методики измерения концентрации электронов, разработанной нами для случая очень высоких значений собственного электрического поля разряда и сверхзвуковых потоков газа.

Газовая температура измерялась по относительным интенсивностям линий вращательной структуры полосы (0; 2) с длиной волны канта $\lambda = 380,5$ нм второй положительной системы азота и полосы (0; 0) с длиной волны канта $\lambda = 388,3$ нм циана. Колебательная температура оценивалась по относительной интенсивности молекулярных полос второй положительной системы азота [10].

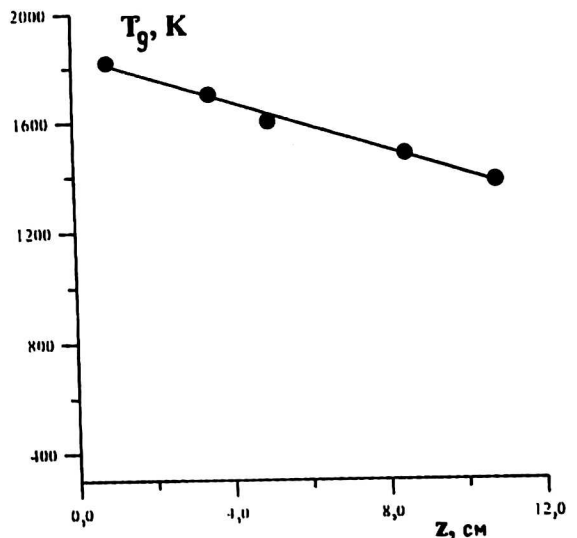


Рис. 5. Аксиальное распределение температуры газа в разряде постоянного тока при $p = 40$ торр в сверхзвуковой струе воздуха

Измерения температуры газа вдоль оси истечения (рис. 5) показали, что в разряде постоянного тока она находится в пределах 1000—2000 К и слабо меняется в аксиальном направлении. Колебательная температура в наших условиях оценивалась величиной 5000—10 000 К. Из этих данных следует, что в исследованном диапазоне параметров плазма характеризуется сильной колебательно-поступательной неравновесностью.

Л и т е р а т у р а

1. Алферов В. И., Бушмин А. С. Электрический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. Вып. 6. С. 1775—1779.
2. Алферов В. И., Бушмин А. С., Калачев Б. В. Экспериментальное исследование свойств электрического разряда в потоке воздуха // Там же. 1966. Т. 51. Вып. 5(11). С. 1281—1287.
3. Витковский В. В., Грачев Л. П., Егорова З. М., Кузнецов Ю. Е. и др. Экспериментальное исследование электрических разрядов постоянного тока в сверхзвуковых и дозвуковых потоках воздуха: Тр. ЦАГИ № 2505. — М.: Изд-во ЦАГИ, 1991. С. 3—27.
4. Бычков В. Л., Грачев Л. П., Есаков И. И., Дерюгин А. А. и др. Расчетно-экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания затупленного тела при наличии продольного электрического разряда: Препринт/ ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. — М., 1997.
5. Chuvashov S. N., Ershov A. P., Klimov A. I., Leonov S. B., Shibkov V. M., Timofeev I. B. Flow Around Body and Characteristics of AC/DC Discharges in Plasma Aerodynamic Experiments // 2-nd Weakly Ionized Gases Workshop: Proc. Norfolk, VA: NASA. 1998. P. 59—67.
6. Зарин А. С., Кузовников А. А., Шибков В. М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. — М.: Нефть и газ, 1996. — 204 с.
7. Ruwahara Ch., Matsuura K., Miyahara A. Density measurement of plasma with a small diameter by microwave interferometer // Japanese Journal of Applied Physics. 1974. V. 13. No. 2. P. 327—333.
8. Акишев Ю. С., Напартович А. П. О зондовых измерениях в тлеющем разряде при повышенном давлении // ДАН. 1978. Т. 242. № 4. С. 812—815.
9. Александров А. Ф., Арделян Н. В., Ершов А. П., Калинин А. В., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М.: Тр. конф. — Махачкала, 1999.
10. Очкин В. Н. Исследование физико-химических свойств плазмы CO₂-лазера: Тр. ФИАН СССР, 1974. Т. 78. С. 3—57.

GAS DISCHARGES IN SUPERSONIC AIR FLOW

A. P. Ershov, I. B. Timofeev, V. A. Chernikov, V. M. Shibkov

Results of investigation of plasma parameters of transversal direct current discharge and pulse periodic discharge with $I \sim 1-10$ A in supersonic air flow at Mach number $M \approx 2$ and pressure 10—100 torr are presented. Formation of MW discharge in supersonic flow at these conditions is described.