

03; 04

© 1992

ПРОДОЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Г.И. Мишин, А.И. Климов,
А.Ю. Гридин

Изучение особенностей горения электрического разряда в сверхзвуковом потоке газа и обтекания возбужденным плазменным потоком электродов, измерительных датчиков различных элементов конструкций и тел необходимо для решения ряда научно-технических задач. Наиболее интересные результаты в этом направлении были получены в работах [1-4]. Экспериментальные исследования обтекания моделей, пролетающих со сверхзвуковой скоростью через область тлеющего разряда, были проведены на баллистической трассе авторами работы [1]. Изучение особенностей сверхзвукового обтекания моделей в аэродинамической трубе в условиях возбуждения и подогрева газа с помощью поперечного электрического разряда осуществлено в работе [2] и продольного разряда в работе [3]. Некоторые особенности горения электрического разряда в сверхзвуковых потоках и струях изучались в [4].

В настоящее время остаются, в частности, невыясненными следующие вопросы:

- устойчивость горения разряда в сверхзвуковом потоке газа;
- зависимость изменения параметров разряда от изменения числа Маха потока;
- зависимость характера обтекания тел от удельного энерговыклада в разряд и направления тока разряда;
- изменение полного давления P_T и статического давления P_1 в сверхзвуковом потоке при создании в нем разряда.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению продольного электрического разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке газа с числом Маха $M \leq 4$.

Эксперименты проводились на аэродинамической трубе диаметром 40 мм и временем работы ~ 2 с (рис. 1). Вакуумная камера трубы (1) объемом 1 м³ откачивалась до исходного давления $P_3 \sim 30$ Тор. В трубе использовались различные сменные сопла (2), рассчитанные на создание в рабочей секции (3) сверхзвукового потока.

Электромагнитный клапан (4) на входе сопла отделял атмосферу от вакуумной камеры. Труба была выполнена из кварцевого стекла. Рабочая секция (РС) трубы изготовлена из капролона.

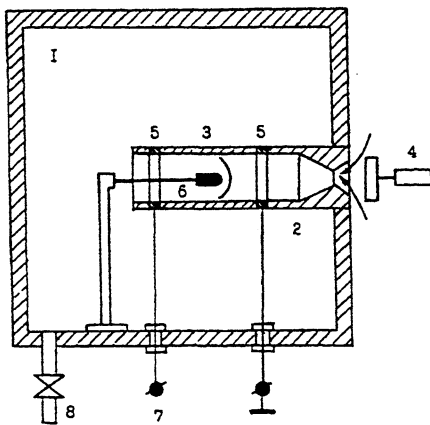


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - вакуумная камера, 2 - сменные сверхзвуковые сопла, 3 - рабочая секция, 4 - электромагнитный клапан, 5 - кольцевые электроды, 6 - модель, 7 - выход на высоковольтный источник питания, 8 - клапан откачки камеры.

В основной серии экспериментов в РС использовались кольцевые электроды (5), установленные заподлицо со стенками трубы. В РС на державках устанавливались измерительные датчики и исследуемые модели. В эксперименте использовались модели (6) в виде конусов, клиньев, цилиндров и пластин с закругленными передними кромками. Модели выполнялись из капролона и на них могли размещаться измерительные датчики и электроды.

Во второй серии экспериментов система круглых электродов монтировалась заподлицо на поверхности лобовой части плоской модели (секционированный анод или катод) и через соответствующую систему балластных сопротивлений R_0 соединялись с высоковольтным источником питания (7). Заземленный электрод при этом был выполнен в виде тонкой пластины толщиной $\sim 0,2$ мм, устанавливавшейся на расстоянии 20–50 мм вверх по потоку.

Источник постоянного тока обеспечивал на выходе напряжение до 15 кВ и максимальный ток 8 А. Балластное сопротивление в цепи разряда было всегда больше сопротивления плазмы $R_{пл}$. Измерение напряжения U_p и тока I_p на разрядном промежутке осуществлялось с помощью безиндуктивных делителей и калиброванных сопротивлений. Ввод высоковольтных проводов питания в вакуумную камеру осуществлялся через герметические разъемы. Для визуализации процессов обтекания моделей сверхзвуковым возбужденным потоком в РС и в вакуумной камере были предусмотрены смотровые окна из оптического стекла.

Давление торможения P_T измерялось трубкой Пито диаметром ~ 3 мм, устанавливаемой либо в потоке, либо на моделях. Статическое давление P_1 измерялось коническими насадками с малыми

углами (менее 10°) при вершине. Измерительные отверстия располагались на боковых поверхностях этих конусов. Трубки Пито и измерительные насадки изготавливались из материалов с различной каталитической способностью и были соединены с измерительными датчиками давления типа ДМИ-1. Сигналы с выходов этих датчиков поступали на входы осциллографов типа С8-17. Точность измерения P_1 и P_T была не хуже 8%.

Для визуализации течения перед исследуемыми моделями и датчиками использовался прямой теневой метод, а также метод оптической интерферометрии.

Измерение температуры торможения T_T проводилось с помощью миниатюрной термодпары из вольфрам-рений, покрытой защитным слоем из алунда и расположенной в углублении лобовой части модели. Чувствительность используемых термодпар составляла $6 \cdot 10^{-2}$ мВ/град. Стационарное значение T_T устанавливалось за время меньше 0,5 с.

В ходе подготовленных и контрольных экспериментов были измерены параметры холодного (без плазмы) сверхзвукового газового потока и его однородность по сечению трубы. Было определено, что расход газа через сопло, рассчитанное на создание потока с числом $M=2$, составлял $m=72$ г/с. Измеренные значения давления торможения P_T и статического давления P_1 составляли ~ 430 Тор и ~ 70 Тор соответственно. Пульсации давления не превышали 10%. Значение числа M потока, восстановленное по измеренным величинам P_T и P_1 , составило на оси трубы 2.10 ± 0.05 .

С помощью теневого метода был определен отход Δ головной УВ от цилиндрической модели, диаметром 5 мм. При этом величина числа M потока, восстановленная по измеренной величине Δ на основании работы [6], также оказалась близкой к расчетному значению.

Разряд в РС без потока при $P_1 = 70$ Тор и токе разряда $I_p = 530$ мА имел диффузный характер и горел практически по всему сечению трубы. По своим параметрам он был близок к тлеющему разряду. Концентрация электронов составляла $\sim 0.5 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$, температура электронов была 1-2 эВ, температура газа T_1 в разряде не превышала 1050 ± 50 К, величина E/P составляла 3-5 В/см·Тор, $U_p = 700$ В.

Разряд в сверхзвуковом потоке становился контрагированным. Диаметр светящегося жгута составлял ~ 10 мм. Параметры разряда U_p и I_p в потоке имели пульсирующий характер с частотой пульсаций $\sim 3 \cdot 10^3$ Гц и глубиной модуляции ~ 50 %. Среднее значение U_p при $I_p = 0.53$ А и $P_1 = 70$ Тор составило 1700 В, то есть величина U_p с потоком в ~ 2.4 раза превышала соответствующую величину U_p без потока газа. Важно отметить, что в случае создания разряда между двухмерной моделью с секционированным катодом и пластинчатым заземленным электродом светящаяся плазма плотно покрывала всю поверхность модели, в том числе и область донного течения, как бы „обволакивая“ модель. При этом светящийся возбужденный газ не сносился вниз по потоку и не отрывался от модели.

Было обнаружено, что при $I_p < 0.1$ А в РС происходила резкая смена режимов горения разряда: контрагированный, сильно светящегося разряда с относительно высокой проводимостью $0.6-0.8 \cdot 10^{-3}$ см/Ом трансформировался в необычный диффузный слабосветящийся разряд с проводимостью в 10-15 раз более низкой, чем первоначальный. По внешнему виду и по характеру светимости он напоминал коронный разряд, поэтому мы условно назвали его „сильноточным коронным“ разрядом (в отличие от обычного слаботочного коронного разряда без потока газа с $I_p = 10^{-6} - 10^{-3}$ А).

Аналогичное тестирование было проведено и для сопла, создающего сверхзвуковой поток с числом $M 3.6 \pm 0.1$ ($P_1 \approx 15$ Тор, $P \approx 255$ Тор).

В работе были измерены величины статического давления P_1 и давления торможения P_T в сверхзвуковом потоке в случае горения в нем продольного электрического разряда при различных значениях вводимой в разряд удельной электрической энергии q , относительная величина которой (число Дамкёлера) $Q = q / C_p T_1$ ($C_p T_1$ - удельная энтальпия потока воздуха, входящего в область разряда).

Было обнаружено, что при включении разряда статическое давление с точностью до ошибок измерений не изменялось. В то же время величина давления торможения $P_{T,q}$ при ионизации воздуха значительно уменьшалась по сравнению с P_T , причем уменьшение зависело от числа M набегающего потока. При $M=2.1$ величина $P_{T,q}/P_1$ в потоке с разрядом ($I_p = 0.6$ А) уменьшалась на ~40% по сравнению с контрольными замерами P_T без разряда, а при $M 3.6$ - на ~60%.

На рис. 2 представлены результаты измерения характеризующего явление параметра

$$K = \frac{P_{T,q}/P_1}{P_T/P_1} = \frac{P_{T,q}}{P_T}$$

для потоков ионизованного воздуха с числами $M=2.1$ (кружки) и $M=3.6$ (точки) при различных значениях Q . Можно видеть, что величина $K(Q)$ постоянна в диапазоне Q от ~0.2 до 2.5 (при $Q < 0.2$ разряд переходил от режима нормального горения к „коронному сильноточному“ режиму).

Величину изменения $K(Q)$ вследствие нагревания сверхзвукового потока газа за счет внешнего подвода энергии при постоянном статическом давлении P_1 можно найти, следуя теоретическим положениям работы [7], согласно которым в этом случае должны выполняться следующие соотношения

$$u_q = u_1, \quad T_q/T_1 = \rho_1/\rho_q = M^2/M_q^2 = 1 + q/C_p T_1;$$

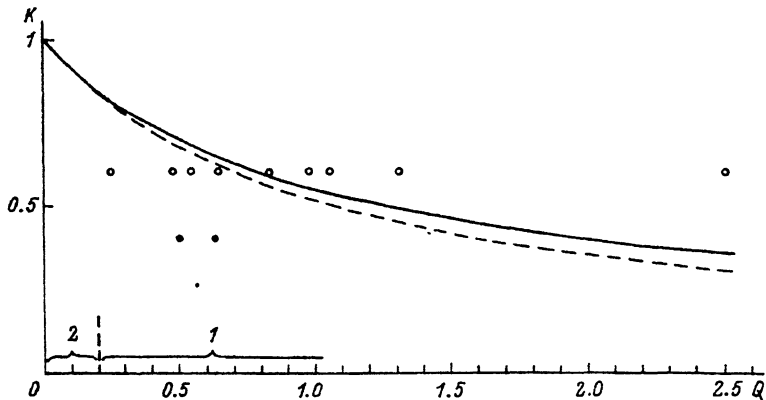


Рис. 2. Зависимости относительной величины давления торможения $K = P_{T, q} / P_T$ от относительной величины вклада электрической энергии в разряд Q . Эксперимент: кружки $M = 2.1$, точки $M = 3.6$. Расчет по „тепловой“ модели: сплошная кривая $M = 2.1$, пунктирная кривая $M = 3.6$.

1 – область режима нормального горения разряда.

2 – область „сильноточного коронного“ разряда.

$$k = \frac{P_{T, q}}{P_T} = \frac{M^2}{M_q^2} \left\{ \frac{M_q^2}{M^2} \left[\frac{2\gamma M_q^2 - (\gamma - 1)}{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)} \right] \right\}^{\frac{1}{\gamma - 1}},$$

где $U_{1, q}$; $T_{1, q}$; $\rho_{1, q}$; M и M_q соответственно скорости, температуры, плотности и числа Маха до и после зоны энергоподвода.

Используя конкретные для данных чисел M и величины m , T_1 и полагая, что границы светящейся разрядной зоны с площадью поперечного сечения S_p совпадают с границами токовой трубки газа, соответствующей зоне энергоподвода, были сделаны оценки кинетической мощности потока N_K и величины параметра Дамкёлера Q в струе ионизованного воздуха:

$N_K = m(M) \cdot c_p \cdot T_1(M) \frac{S_p}{S_{тр}}$, $S_{тр}$ – площадь поперечного сечения трубы;

$$Q = \frac{q}{c_p \cdot T_1(M)} = \frac{N_p}{N_K},$$

где N_p – мощность поступающей в разряд электрической энергии.

Полученные расчетные зависимости $K(Q)$ для $M 2.1$ и $M 3.6$, приведенные на рис. 2 соответственно сплошной и пунктирной линиями, представляют собой монотонно падающие с ростом Q кривые, в то время как экспериментальные значения $K(Q)$ не изменяются при увеличении Q в десять раз. Таким образом, „тепловая“ версия механизма является полностью исключается.

Следует также отметить, что уменьшению P_T на 40% должно было соответствовать увеличение температуры потока T_1 (а значит и T_T) на ~ 150 К. Такое изменение T_T в эксперименте легко можно было бы зарегистрировать термодинамическим и интерферометрическими методами. Однако проведенные с точностью не хуже, чем 10%, прямые измерения показали, что при создании разряда в сверхзвуковом потоке не происходило изменения T_1 и T_T по сравнению с соответствующими величинами без разряда. Поэтому следует сделать вывод о том, что основная доля электрического тока в продольном разряде в сверхзвуковом потоке расходовалась на создание плазмы без ее нагревания джоулевым теплом.

Рассмотрение теневых снимков обтекания плоской модели, толщиной 6 мм с закругленной передней кромкой, без разряда и с разрядом показало, что при включении разряда головная УВ становится более плоской, отход УВ увеличивается, на ней появляются нерегулярные изломы, а на модели исчезают висячие скачки. При увеличении тока разряда наблюдалась деструкция и диссипация головной УВ. Наиболее значительные изменения обтекания модели происходили, когда в ней располагался секционированный катод, т.е. в случае движения электронов навстречу потоку газа.

Уменьшение P_T в плазменной сверхзвуковой струе и аномальное обтекание датчика давления плазменным потоком обусловлено наличием заряженной компоненты и, вероятно, возникновением в слабоионизованном газе определенных структур. Обратим внимание, что в потоке плазмы при наличии скачков уплотнения могут происходить процессы стимулированной контракции „плазменной конденсации“, зарегистрированные в работе [8].

В связи с этим укажем, что уменьшение давления торможения при увеличении числа Маха потока ионизованного газа объясняется, по-видимому, возрастанием длин свободного пробега его компонент, связанному с уменьшением давления в струе газа при относительно меньшем снижении ее температуры.

В экспериментах с датчиком полного давления было установлено существование сложного строения плазменной струи по поперечному сечению, а именно наличие „керна“ толщиной на несколько мм меньше, чем поперечник светящейся области струи, где четко фиксировалось значительное уменьшение величины P_T по сравнению с контрольным замером без разряда. Однако в „оболочке“ (толщиной 3–4 мм вокруг „керна“) величина P_T была на 10–15% больше, чем P_T в контрольном опыте. Указанные экспериментальные факты свидетельствуют о том, что в данном случае имеет место самоорганизация („структурирование“) плаз-

менного неравновесного сверхзвукового потока, возбужденного электрическим разрядом.

В заключение авторы выражают благодарность А.В. Бодронову за помощь в проведении экспериментов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Мишин Г.И., Серов Ю.Л., Явор И.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 11. С. 65.
- [2] Грачев Л.П., Грицов Н.Н., Мишин Г.И., Харламов Л.Л., Ходатаев К.В. Поперечный разряд в сверхзвуковой струе воздуха. Препринт ФТИ, № 1414, Л., 1989. с. 33.
- [3] Витковский В.В., Грачев Л.П., Грицов Н.Н., Кузнецов Ю.Е., Лебедеико В.В., Скворцов В.В., Ходатаев К.В., Янков В.П. // ТВТ. 1989. Т. 28. № 5. С. 1156-1163.
- [4] Алферов В.И., Дмитриев Л.М. // ТВТ. 1985. № 4. С. 677-681.
- [5] Ферри А. Аэродинамика сверхзвуковых течений. М.: Гос. издат. техн. лит., 1953.
- [6] Краснов Н.Ф. Аэродинамика тел вращения. М.: Машиностроение, 1964.
- [7] Баргльме Ф. Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981.
- [8] Мишин Г.И., Климов А.И., Гридин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 16.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
РАН. С.-Петербург

Поступило в Редакцию
7 июля 1992 г.