

получаемых результатов при $\text{Kn}_{0,d} \left(\frac{p_0}{p_\infty} \right)^{0.5} < 2 \cdot 10^{-3}$.

Метод имеет ограничения, определяемые размером рабочего объема газодинамической установки, с одной стороны, и режимами, соответствующими переходу течения от континуального к свободномолекулярному, когда происходит размытие волновой структуры струйного течения, с другой стороны.

Следует отметить, что указанный метод может быть особенно полезен при определении производительности крионасосов и криоловухек, но имеет верхний предел применимости, вследствие взаимодействия струйного течения с поверхностями вакуумной камеры.

Поступила 20 X 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Г. Основы вакуумной техники. М., «Энергия», 1969.
2. Основные данные новых вакуумных установок. США, ОНТИ, 1971.
3. Кобзев П. М., Холод Ю. В., Юферов В. Б. Криосорбционная откачка в интервале 760 мм рт. ст.—ультравacuум.—ЖТФ, 1969, т. 39, № 3, с. 567.
4. Козлов Л. В., Нусинов М. Д. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М., «Машиностроение», 1971.
5. Микулин Е. И. Криогенная техника. М., «Машиностроение», 1969.
6. Волчков В. В., Иванов А. В. Толщина и внутренняя структура прямого скачка уплотнения, образующегося при истечении сильно недорасширенной струи в пространство с малой плотностью.—Изв. АН СССР. МЖГ, 1969, № 3, с. 160.
7. Немченко В. И., Ющенкова Н. И. Структура сверхзвуковой струи низкой плотности.—ПМТФ, 1969, № 6, с. 110.
8. Ребров А. К., Чекмарев С. Ф., Шарафутдинов Р. Г. Влияние разреженности на структуру свободной струи.—ПМТФ, 1971, № 1, с. 136.

УДК 593.95

О МОДЕЛИРОВАНИИ НАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛЕТА В ИОНОСФЕРЕ

Б. Е. Жестков, А. Я. Книвель

(Москва)

При имитации условий полета космических летательных аппаратов (КЛА) в верхних слоях атмосферы необходимо наряду с другими параметрами моделировать ионизацию, возбуждение и диссоциацию потока [1]. Моделирование этих параметров существенно, в частности, при исследовании датчиков, предназначенных для измерений параметров полета на борту КЛА, испытаниях конструкционных материалов, определении аэродинамических характеристик КЛА.

В данной работе с помощью многоэлектродных зондов, детектора метастабильных частиц и каталитических датчиков исследованы ионизированная, диссоциированная и возбужденная составляющие высокоскоростного свободномолекулярного потока на установке [2], моделирующей условия полета в верхних слоях атмосферы. Показано, что степень ионизации и диссоциации, а также концентрации метастабильных частиц в потоке соответствует натурным значениям этих параметров на высотах $H = 120-200$ км.

1. Исследования проводились в интенсивном свободномолекулярном потоке азота, выделенном с помощью газодинамического источника из высокотемпературной разреженной струи. Скорость свободномолекуляр-

ного потока достигает $v = 3,5-4$ км/с, интенсивность $j = nv = 2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, скоростное отношение $S = 5-10$, диаметр потока $D \sim 0,1$ м [2], температура торможения $T_0 = 5000-6200$ К, давление торможения $p_0 = (2-5)10^4$ Па [2]. Нагрев газа осуществлялся в высоко-частотном безэлектродном разряде [3].

В форкамере установки газовая, вращательная и колебательная температуры совпадают с погрешностью не хуже 10% ($T_0 = T_K = T_B$), а электронная температура примерно в 2 раза выше $T_- = 2T_0$ [2, 3].

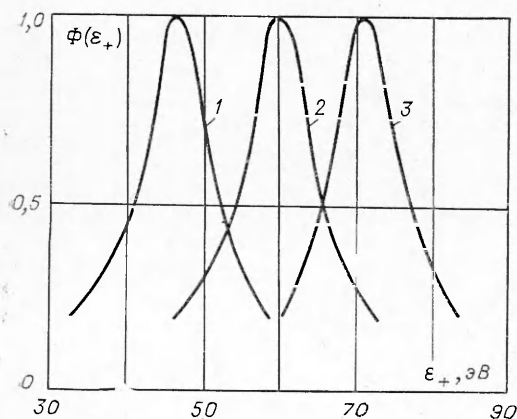
При расширении газа внутренние степени свободы не успевают релаксировать. Колебательная и электронная температуры, степень ионизации и диссоциации стабилизируются по оценкам на уровне, соответствующем значениям этих параметров в критическом сечении. При $T_0 = 5000$ К и $p_0 = (3-5)10^4$ Па в потоке $T_K = 4000$ К, степень диссоциации $\alpha_0 = 1-3\%$, степень ионизации $\alpha_+ \sim 10^{-2}\%$. Вращательная температура стабилизируется на значительно более низком уровне $T_B = 400$ К [2].

С увеличением T_0 выше 5000 К степень ионизации и диссоциации быстро растет. Эти режимы, представляющие интерес для моделирования природных условий, исследовались в работе. Отметим, что исследуемый интенсивный свободномолекулярный поток имеет слабое самосвечение, вызванное, по-видимому, распадом метастабильных состояний $a^1\Pi_g$ молекул азота. В потоке присутствует также излучение из зоны разряда и рекомбинационное излучение из области струи непосредственно на выходе из сопла. Поэтому в работе наряду с исследованием ионизированной и диссоциированной составляющих потока были проведены измерения потоков метастабильных молекул и УФ-излучения. Как известно, в верхней атмосфере присутствуют все эти составляющие.

2. Электронный и ионный компоненты потока изучались с помощью модифицированного многоэлектродного зонда, позволяющего исследовать ионизированную составляющую при наличии интенсивного потока нейтрального газа. Обычные многоэлектродные зонды [4] выполняются в виде камеры с отверстиями, обращенными к исследуемому потоку. В исследуемом интенсивном потоке в камере такого зонда устанавливается давление $p \sim 0,1$ Па, при котором нарушается нормальная работа зонда. Нами использовался зонд, выполненный в виде полого усеченного конуса с коллектором из сетки 50×50 мкм. При такой конструкции зонда уменьшаются возмущения, вносимые зондом, и обеспечивается проток газа

через зонд, что позволяет обеспечить в зонде низкое давление, близкое к статическому давлению в потоке.

По результатам измерений с помощью многоэлектродных зондов энергия ионов в потоке при $T_0 = 5000-6200$ К составляет соответственно $W_+ = 45-70$ эВ, температура ионов равна $T_+ \sim 4000$ К, а температура электронов $T_- \sim 7$ эВ. Типичные функции распределения ионов по энергиям представлены на фиг. 1 (1 — $T_0 = 5000$ К, 2 — $T_0 = 5600$ К, 3 — $T_0 = 6200$ К). Скоростное отношение для ионов составляет $S_+ \sim$



Ф и г. 1

~20. Высокие значения энергии ионов в потоке, по-видимому, объясняются явлением их неизотермического ускорения при истечении высокотемпературной струи в вакуум.

По измеренным с помощью многоэлектродных зондов интенсивностям $j_+ = n_+v_+$ потоков ионов и значениям средней скорости ионов v_+ с использованием значений интенсивности $j = nv$ и скорости v нейтрального потока определялась степень ионизации в потоке

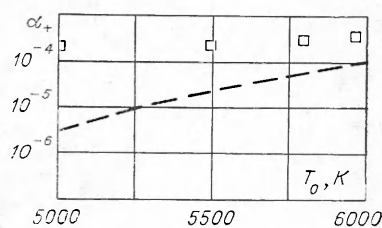
$$\alpha_+ = n_+/n, \beta_+ = j_+/j.$$

Измеренные значения степени ионизации α_+ в потоке сопоставлены на фиг. 2 с равновесными значениями степени ионизации при температуре T_0 (штриховая кривая). Степень ионизации в потоке на 1—2 порядка превышает равновесную, соответствующую T_0 . Это объясняется неравновесностью плазмы разряда. Температура электронов в разряде составляет $T_- = 1-2$ эВ. Полученные значения степени ионизации в потоке согласуются со значениями степени ионизации в форкамере, оцененными по величине скин-слоя в разряде [3].

3. Исследование возбужденной составляющей потока проводилось с помощью детектора, позволяющего регистрировать ионы, метастабильные частицы и ультрафиолетовое излучение. Детектор представляет собой электронный умножитель ВЭУ-1А, помещенный в сетчатый экран с передним коническим обтекателем. Перед входным отверстием экрана детектора были установлены две сетки (ячейки 50×50 мкм) и сменные светофильтры (размещенные на дополнительном координатнике). Одна из сеток находилась под потенциалом корпуса зонда ($\phi_1 = 0$), а на другую подавался потенциал, позволяющий анализировать ионную составляющую (электронная составляющая отсекалась за счет большого отрицательного потенциала первых динодов ВЭУ). При потенциале на анализирующей сетке $\phi_2 \approx 0$ и убранном свето фильтре (режим 1) детектор регистрирует ионы, метастабильные частицы, колебательно-возбужденные молекулы и кванты света, энергия которых превышает работу выхода первого динода ВЭУ. При подаче на анализирующую сетку потенциала, превышающего энергию ионов в потоке $e\phi_2 > W_+$, детектор регистрирует метастабильные частицы, колебательно-возбужденные молекулы и ультрафиолетовое излучение.

Наконец, при наличии перед детектором светофильтра, детектор регистрирует ультрафиолетовое излучение, прошедшее через светофильтр. По результатам измерений в указанных режимах могут быть оценены потоки УФ-излучения, концентрации метастабильных, колебательно-возбужденных и ионизированных частиц. Детектор может использоваться и как зонд для анализа ионов по энергиям.

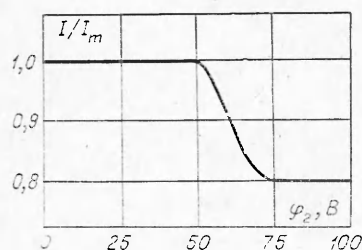
Зависимость тока детектора от потенциала анализирующей сетки ϕ_2 показана на фиг. 3. На участке характеристики $\phi_2 < 45$ В регистрируются все ионы потока (интенсивность тепловых ионов фона составляет ~ 0,01 интенсивности быстрых ионов), метастабильные возбужденные частицы и УФ-излучения. При $\phi_2 > 80$ В все ионы отсекаются, а регистрируются только метастабильные, возбужденные частицы и УФ-излучения. По результатам этих измерений относительное содержание метастабильных частиц при $T_0 = 5000-6200$ К составляет 0,7—2%, поток



Ф и г. 2

квантов УФ-излучения равен $\sim 1-2\%$ интенсивности нейтральных частиц. Содержание колебательно-возбужденных частиц на высоких уровнях (с энергией $W_k \geq 4$ эВ) по оценкам на 1—2 порядка ниже.

4. Исследование диссоциированного компонента потока проводилось с помощью чувствительных датчиков теплового потока компенсационного



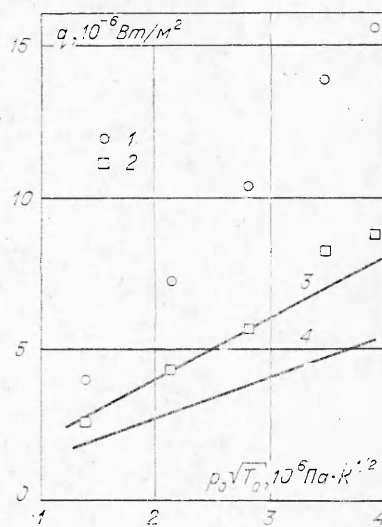
Ф и г. 3

типа [5] по вкладу, даваемому рекомбинирующими на каталитической поверхности атомами в тепловой поток к ней по сравнению с тепловым потоком к некаталитической поверхности. В качестве каталитического материала поверхности датчика было выбрано серебро Ag, а некаталитического — вольфрам W [6]. Различная каталитическая способность материалов, по-видимому, проявляется также при взаимодействии с поверхностью ионов и метастабильных частиц, однако их вклад в тепловой поток, по сравнению с вкладом диссоциированных частиц, мал. Более существен, по-видимому, вклад колебательно-возбужденных частиц.

На фиг. 4 показаны расчетные и экспериментальные зависимости удельного теплового потока в зависимости от параметра $p_0 \sqrt{V T_0}$, где p_0 — давление газа в форкамере; T_0 — температура торможения. Точки 1 соответствуют удельному тепловому потоку к поверхности из серебра, а точки 2 — из вольфрама. Кривая 3 соответствует теоретическому удельному тепловому потоку к некаталитической поверхности с учетом вклада в него ионов, электронов, метастабильных и колебательно-возбужденных частиц, а также светового излучения. Кривой 4 показан тепловой поток к некаталитической поверхности, соответствующий поступательной энергии потока (при коэффициенте аккомодации энергии $a = 1$) $q = \rho v^3/2$, где ρ — плотность; v — скорость потока. Близость значений кривой 3 и точек 2 свидетельствует о том, что вольфрам практически некаталитичен в отличие от серебра (точки 1). Степень диссоциации потока α_0 , оцененная по результатам этих экспериментов, составляет $\alpha_0 = 10-20\%$ при температуре торможения $T_0 = 5500$ К.

Таким образом, исследуемый высокотемпературный свободномолекулярный поток достаточно хорошо моделирует натурные условия взаимодействия верхней атмосферы Земли с КЛА. Скорость потока $v = 3,5-4$ км/с, интенсивность $j = 5 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{17}$ см⁻²с⁻¹, степень ионизации $\beta_+ = 10^{-2}$, степень диссоциации $\alpha_0 = 10-20\%$, относительная концентрация возбужденных частиц $\gamma \sim 1-3\%$.

Для сравнения приведем соответствующие значения при полете КЛА на высотах $H = 120-200$ км. Скорость потока $v = 8$ км/с, интенсивность $j = 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ см⁻²с⁻¹, степень ионизации $\beta_+ = 10^{-5}-10^{-3}$, степень



Ф и г. 4

диссоциации $\alpha_0 = 10-50\%$, относительная концентрация возбужденных частиц $\gamma \geq 10-15\%$ [7, 8]. Приведенные данные показывают достаточно удовлетворительное соответствие натуральных условий лабораторным.

Поступила 2 XI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев А. И., Омелик А. И. Моделирование натуральных аэродинамических условий в верхних слоях атмосферы.—Труды ЦАГИ, 1975, вып. 1641.
2. Баринов И. С., Жестков Б. Е., Омелик А. И., Орлова З. Т. Вакуумная аэродинамическая труба с высокой температурой торможения.—ТВТ, 1973, т. 11, № 3, с. 602.
3. Жестков Б. Е., Омелик А. И., Орлова З. Т. Некоторые характеристики индукционного разряда пониженного давления в азоте.—ТВТ, 1970, т. 8, № 4, с. 707.
4. Скворцов В. В., Носачев Л. В., Нецветайлов Е. М. Исследование характеристик многоэлектродного зонда в условиях потока разреженной плазмы.—Косм. исследования, 1969, т. 7, № 3, с. 415.
5. Жиляев И. Р., Омелик А. И. Термоэлектрический измеритель тепловых потоков компенсационного типа.—ТВТ, 1973, т. 11, № 2, с. 380.
6. Агафонов В. П., Вергушкин В. К., Гладков А. А., Полянский О. Ю. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М., «Машиностроение», 1972.
7. Околосземное космическое пространство. Справочные данные. М., «Мир», 1968.
8. Челурной В. И. О расхождении значений плотности верхней атмосферы, полученных по лобовому сопротивлению искусственных спутников и по приборам.—«Геомагнетизм и аэрномия», 1974, т. 14, № 4, с. 756.

УДК 533.6.011.5

СВЕРХЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ОСТРОКОНЕЧНЫХ КРЫЛЬЕВ

Г. П. Воскресенский, А. С. Ильина, В. С. Татаренчик

(Москва)

1. Численное решение задачи установившегося сверхзвукового обтекания остроконечных профилированных крыльев с присоединенной к передней кромке ударной волной рассматривалось в работе [1]. Однако приведенные там результаты относились к крыльям с плоской верхней поверхностью. В данной работе приводятся некоторые результаты расчетов для крыльев с профилированными верхней и нижней поверхностями.

Метод, алгоритм и программа решения на ЭВМ данной задачи те же, что и в работах [1—3]. Как и в указанных работах, задача рассматривалась в декартовой системе координат x, y, z с началом в носке крыла. Плоскость $z = 0$ является плоскостью симметрии крыла, а также и всего течения, поскольку скольжение с целью сокращения расчетов исключено. Поверхность крыла задается функцией $y = G(x, z)$, а граница области потока, возмущенной крылом, определяется искомой функцией $y = F(x, z)$.

Задачи для верхней и нижней поверхности крыла в силу того, что граница возмущенной области опирается на переднюю кромку крыла, рассматриваются раздельно. Газодинамические функции в возмущенной области определяются из краевой задачи для системы дифференциальных уравнений в частных производных (уравнений движения, неразрывности