

ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕКТРОНОВ ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ

В.А.Горелов, Л.А.Кильдюшова, А.Ю.Киреев

(Поступило в Редакцию 15 июня 1994 г.)

В настоящее время в аэрофизике наблюдается повышенный интерес к исследованиям физико-химических процессов, происходящих при распространении в воздухе сильных ударных волн со скоростями $V_S = 8-15$ км/с. Результаты работ, выполненных по этой теме в 60-70-х годах, дополняются более тщательным изучением всех особенностей процессов в газе. Цель этих исследований — разработка подробных моделей явлений для численных расчетов гиперскоростного обтекания тел. Особое внимание уделяется процессам неравновесной ионизации в условиях нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР) [1,2]. Важным параметром, влияющим на релаксационные процессы в этих условиях, является температура электронов T_e .

В данной работе приводятся результаты определения T_e за фронтом сильной ударной волны в воздухе при $V_S = 7-12$ км/с и давлении газа перед волной $P_1 = 0.1-0.2$ мм рт.ст.

Эксперименты по измерению T_e проводились в электроразрядной ударной трубе ЭРУТ [3]. Толкающий газ — гелий, нагретый мощным разрядом конденсаторной батареи. Диаметр канала трубы $D = 60-110$ мм. Для определения T_e был использован метод тройного электрического зонда [4].

В экспериментах применялись два варианта зондовых систем: цилиндрические зонды одноразового использования с диаметром зондовых электродов $d_p = 0.08$ мм и плоские зонды с электродами размером 2×7 мм (толщина 0.1 мм). Регистрирующая система обеспечивала временное разрешение $\tau \sim 0.1$ мкс. Пространственное разрешение измерительной системы $\Delta x \sim 2$ мм. Оценочное время установления структуры пространственного заряда около зонда $\tau_p \simeq 10\tau_D / \sqrt{2kT_i/m_i}$ составляло $\sim 2 \cdot 10^{-9} - 2.5 \cdot 10^{-10}$ с при $V_S = 7$ и 10 км/с соответственно (τ_D — радиус Дебая).

Измеренное распределение T_e при прохождении ударной волны в воздухе ($P_1 = 0.1$ мм рт.ст., $V_S = 10$ км/с, диаметр канала $D = 110$ мм) представлено в верхней части рис. 1 кривой 1 (с точками).

Ось абсцисс направлена по оси канала ударной трубы. В соответствии с работой [5] координате $X = 0$ соответствует значение $n_e = 0.5n_{em}$ в релаксационной зоне (n_{em} — максимальные значения электронной концентрации n_e в области сжатого газа за ударной волной). Распределение концентрации электронов, полученное в эксперименте, показано в нижней части рис. 1 в виде зависимости от X мольной доли свободных электронов C_e (кривая 1).

Значениям $X < 0$ соответствуют точки на оси канала трубы перед ударной волной в зоне фотоионизации воздуха ультрафиолетовым излучением газа за ударной волной (эффект предшествующей ионизации [6]).

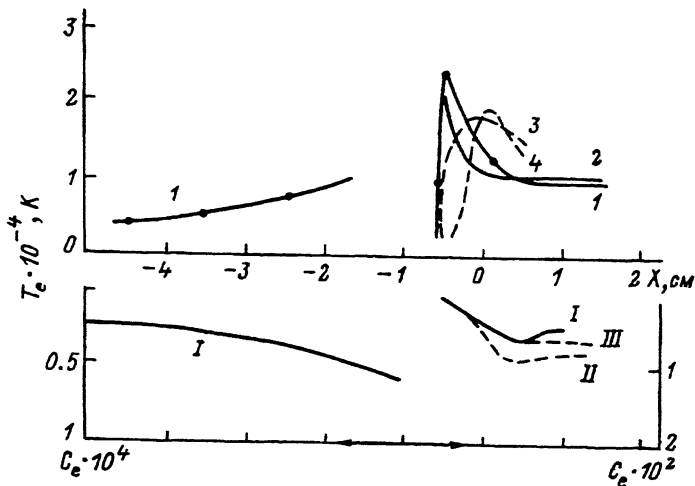


Рис. 1.

Отметим характерные особенности наблюдаемого распределения T_e . Во всем рассмотренном диапазоне изменения V_S в зоне ударного фронта наблюдается резкий пик величины T_e . При $V_S \leq 7.5$ км/с непосредственно за пиковым значением наблюдается быстрое падение T_e ниже уровня равновесной температуры за волной и затем возрастание до квазистационарного уровня. По мере увеличения V_S уровень падения T_e уменьшается и при $V_S \geq 8$ км/с наблюдается выход на квазистационарное значение непосредственно после начального пика.

На рис. 2 показаны зависимости $T_{e2} = f(V_S)$ для значений электронной температуры в квазистационарной области сжатого газа за ударной волной (кривая 1) и максимальные значения T_{em} в пике (кривая 2). Кривая 1 — расчетное равновесное значение температуры газа за ударной волной. Видно, что при $V_S \leq 9$ км/с измеренные значения

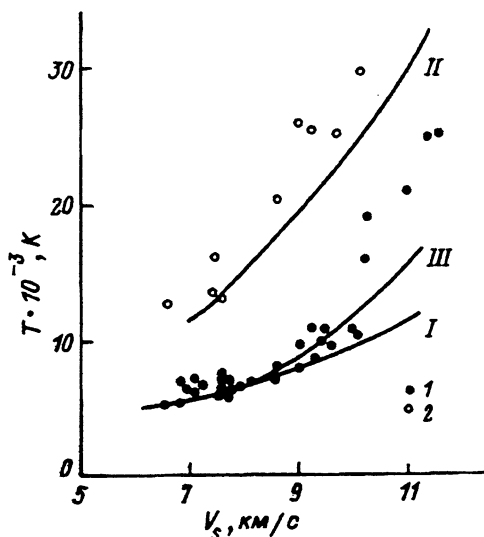


Рис. 2.

T_e в квазистационарной зоне согласуются с равновесной величиной T_2 за ударной волной. При $V_S > 9$ км/с, когда проявляется нарушение ЛТР по ионизации [2], измеренные величины T_e начинают превышать величину равновесной температуры.

По мере приближения к ударному фронту величина T_e перед ударной волной быстро возрастает. Непосредственно перед фронтом значение T_e приближается к величине электронной температуры в квазистационарной зоне.

В разработанной численной модели процессов ионизации воздуха при $V_S > 8$ км/с для определения T_e учитывались следующие процессы, влияющие на электронную температуру: упругие столкновения электронов с атомами и молекулами; возбуждение вращательных и колебательных степеней свободы молекул N_2 , O_2 , NO ; процессы ассоциативной ионизации и диссоциации с участием электронов; потери энергии при ионизации атомов и молекул электронным ударом. Результат расчета зависимости $T_e = f(X)$ в рамках разработанной модели (сплошная среда) представлены на рис. 1 кривой 2.

На рис. 2 расчетные зависимости $T_{em} = f(V_S)$ и $T_{e2} = f(V_S)$ представлены кривыми II и III соответственно. Кривой 3 на рис. 1 показан результат расчета $T_e = f(X)$ методом Монте-Карло [5], а кривой 4 — расчет T_e по методу Берда [5].

Анализируя представленные результаты, следует отметить согласие в главном — наличие пиковых значений T_e во фронте ударной волны. Заметим, что во всем диапазоне рассмотренных значений T_e полученные экспериментальные данные превышают расчетные (рис. 2). Наблюдаемая в эксперименте ширина пика T_e является промежуточной между расчетом по модели сплошной среды и методу Монте-Карло. Отметим, что в расчетных моделях не учитывался эффект предшествующей ионизации. Сжатие в ударной волне электронов, образующихся перед ударным фронтом и имеющих температуру $\sim 10^4$ К, может повлиять на пиковое значение T_e в области релаксационной зоны. Этот эффект требует отдельного детального численного анализа.

В заключение сопоставим результаты измерения концентрации электронов за ударной волной с данными, полученными численными расчетами. В нижней части рис. 1 кривой II показан результат расчета C_e по методу Монте-Карло [5]. Отрезком III представлен результат расчета C_e в квазистационарной зоне в рамках используемой в данной работе модели сплошной среды с учетом ступенчатого процесса ионизации электронным ударом (упрощенная двухступенчатая модель).

Список литературы

- [1] Залогин Г.Н., Лунев В.В., Пластинин Ю.А. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 1. С. 105–112.
- [2] Горелов В.А., Кильдюшова Л.А. // Письма в ЖТФ. 1981. Вып. 7. С. 1294–1297.
- [3] Гладышев М.К., Горелов В.А., Чернышев В.М. // Тр. ПАГИ. 1975. Вып. 1656. С. 74–83.
- [4] Chen S.L., Sekiguchi T.S. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. N 8. P. 2363–2375.
- [5] Carlson Ann.B., Hassan H.A. // J. Thermophys. and Heat Transfer. 1992. Vol. 6. P. 400–404.
- [6] Горелов В.А., Кильдюшова Л.А., Чернышев В.М. // Тр. ПАГИ. 1980. Вып. 2043. С. 148–161.