

03;07;12

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАВНОВЕСНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ВОЗДУХЕ

© М.К.Гладышев, В.А.Горелов, А.Ю.Киреев, В.Г.Чебуреев

В последние годы в аэрофизике наблюдается волна интереса к исследованию особенностей неравновесного излучения гиперзвукового вязкого ударного слоя около аэрокосмических аппаратов (см., например, [1]). Главное направление этих исследований — уточнение численных моделей неравновесных процессов излучения в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета. Важным этапом при этом является экспериментальная верификация разрабатываемых моделей. В лабораторных условиях трудно смоделировать натурные условия излучения гиперзвукового вязкого ударного слоя. Это связано с тем, что моделирование неравновесных кинетических процессов в современных аэродинамических установках представляет, в общем, нерешенную проблему. Вместе с тем может быть осуществлен “ступенчатый” подход к задаче верификации. Он состоит в том, что кинетическая схема излучательных процессов проверяется на модели прямой ударной волны путем сопоставления результатов численных расчетов с данными эксперимента в ударных трубах, а затем верифицированная таким образом кинетическая модель используется для расчета излучения в режиме вязкого ударного слоя и апробации ее в специальных натурах экспериментах, проводимых при фиксированной скорости полета [1].

В настоящем сообщении приводится краткое описание результатов экспериментального исследования характеристик неравновесного излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне волн за сильной ударной волной, распространяющейся в воздухе со скоростями $V_s = 5-10$ км/с, выполненного с целью осуществления вышеупомянутого метода верификации.

Эксперименты проводились на электроразрядной ударной трубе ЦАГИ — ТЭР [2]. В трубе ТЭР в качестве толкающего газа использовался гелий, нагретый до высокой температуры электрическим разрядом конденсаторной батареи. Рабочий газ — воздух, осушенный силикагелем, который подавался в канал низкого давления через капиллярный натекатель в режиме непрерывной прокачки. Канал

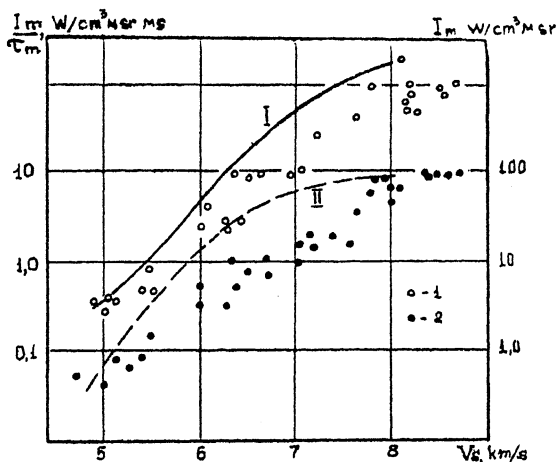


Рис. 1.

низкого давления представляет собой секционную стеклянную конструкцию длиной 5 мм и диаметром 57 мм.

Скорость ударной волны регистрировалась ФЭУ с точностью 2%. Система регистрации УФ излучения включала: дифракционный монохроматор МС-80 с обратной дисперсией 3.5 нм/мм; приемники излучения — фотоумножители, работающие в диапазоне 200–400 и 300–600 нм соответственно; широкополосный усилитель; цифровой запоминающий осциллограф. Временное разрешение регистрирующей системы составляло 0.1 мкс. В качестве эталонных источников сравнения при энергетической калибровке системы использовались дейтериевая газоразрядная лампа и ленточная вольфрамовая лампа, прошедшие предварительную метрологическую аттестацию.

В экспериментах регистрировалось изменение интенсивности излучения в зависимости от времени после прохождения фронта ударной волны $I_\lambda(t)$. Исследовалось излучение в наиболее ярко выраженных молекулярных системах полос в диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{--}400$ нм, в частности при $\lambda = 235 \pm 7$ нм (система NO (γ)), 391 ± 2.5 нм (система $N_2^+(1-)$), 385 ± 2.5 нм (система CN) и 400 ± 1 нм (континуум).

Анализ полученных осциллограмм $I_\lambda(t)$ обнаруживает ярко выраженный пик неравновесного излучения на фронте ударной волны, величина которого I_m в 5–10 раз превосходит квазиравновесный уровень излучения за ударной волной I_r . На рис. 1 точками 2 показаны результаты измерения I_m при $\lambda = 235 \pm 7$ нм в зависимости от скорости V_s при давлении воздуха перед ударной волной $P_1 = 0.1$ Тор.

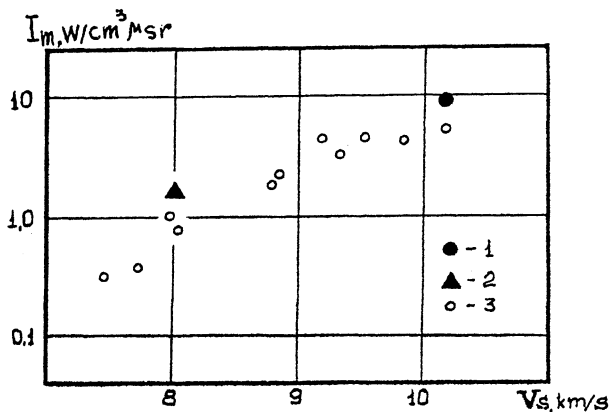


Рис. 2.

Точками 1 показана соответствующая зависимость I_m/τ_m (τ_m — время достижения максимума излучения за ударной волной), характеризующая скорость нарастания интенсивности ультрафиолетового излучения в неравновесной зоне в спектральном интервале, включающем излучение в системе NO (γ) (переход $A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi$).

На рис. 2 представлены результаты измерения максимума неравновесного излучения I_m (точки 3) для спектрального интервала $\lambda = 391 \pm 2.5$ нм, содержащего излучение в системе $N_2^+(1-)$ (переход $B^2 \Sigma \rightarrow X^2 \Sigma$). Для сравнения на рис. 2 представлены результаты расчетов $I_m(V_s)$ (точка 2).

Расчет излучения за ударной волной проводился на основе численного решения уравнений, моделирующих процессы возбуждения и высвечивания в ходе реакций рекомбинации, соударения с электронами, атомами и молекулами с учетом резонансных реакций обмена энергией между молекулами в основном и электронно-возбужденном состояниях. Расчетная модель неравновесных физико-химических процессов за ударной волной учитывала реакции между компонентами N_2 , O_2 , NO, O; N, NO^+ , O_2^+ , N_2^+ , N^+ , O^+ и e, неравновесный характер возбуждения колебаний молекул, реакции диссоциации, ионизации и обменные реакции. Константы скоростей реакций выбиралось по рекомендациям работы [3,4]. Влияние колебательного возбуждения на диссоциацию молекул определялось по модели работы [4]. Расчет I_m и I_m/τ_m — кривые I и II на рис. 1.

Отметим, что при сравнении расчетных и экспериментальных зависимостей $I_m/\tau_m = f(V_s)$ в расчетные данные

вводилась поправка на "толщину фронта ударной волны" (зону возрастания поступательной температуры в скачке). Результаты измерения излучения настоящей работы могут быть сравнены с результатами работы [5], в которой при $V_s = 10$ км/с и $P_1 = 0.1$ Тор получен спектр излучения воздуха в неравновесном пике в широком диапазоне длин волн. Наблюдается согласие результатов наших измерений излучения при $\lambda = 391$ нм и $\lambda = 400$ нм с данными [5]. На рис. 2 результат, полученный в [5], показан точкой 1. Особо отметим, что излучение при $\lambda = 385$ нм (CN), наблюдаемое на установке ТЭР, примерно в 2-3 раза ниже уровня соответствующего излучения в [5], что позволяет сделать вывод о более низком уровне углеводородных примесей в условиях электроразрядной ударной трубы ТЭР. Работа выполнена по гранту РФФИ 94-01-01381.

Список литературы

- [1] Levin D.A. et al. // AIAA Paper. 1992. 92-2871.
- [2] Gorelov V.A. et al. // AIAA Paper. 1994. 94-2051.
- [3] Park C. // J. of Thermophysics and Heat Transfer. 1993. V. 7. N 3. P. 385-398.
- [4] Losev S.A. et al. // AIAA Paper. 1994. 94-1990.
- [5] Sharma S.P., Whiting E.E. // AIAA Paper. 1994. 94-0253.

Центральный
аэрогидродинамический
институт
Москва

Поступило в Редакцию
25 сентября 1995 г.