

03

Неравновесное излучение ударной волны в воздухе в области вакуумного ультрафиолета

© В.А. Горелов, А.Ю. Киреев

Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), г. Жуковский
E-mail: va_gorelov@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2012 г.

Разработана численная модель генерирования неравновесного молекулярного излучения в спектральной области вакуумного ультрафиолета (ВУФ излучение — длина волны короче 200 нм) за ударной волной в воздухе в диапазоне изменения ее скорости 4.5–9.5 км/с. Численная модель верифицирована с использованием результатов экспериментов в ударной трубе по исследованию эффекта фотоионизации воздуха перед фронтом ударной волны в диапазоне длин волн 85–105 нм. Установлены некоторые особенности неравновесного ВУФ излучения, в частности генерирование его в очень тонком высокотемпературном слое за фронтом ударной волны.

В последнее десятилетие в аэрокосмических исследованиях большое внимание уделяется изучению особенностей лучистых тепловых потоков к поверхности космических аппаратов (КА) в условиях высокоскоростного входа в атмосферу Земли. Это обусловлено разработкой аэрокосмических проектов с возвращением КА или их элементов на Землю. При скорости входа в атмосферу свыше 7 км/с излучение ударного слоя около КА необходимо учитывать в суммарном балансе теплового потока к его поверхности. Наименее изученной составляющей лучистого теплового потока является область вакуумного ультрафиолета (ВУФ) при длинах волн $\lambda < 200$ нм. Это связано с тем, что ВУФ излучение интенсивно поглощается в тракте спектрометрической аппаратуры. К настоящему времени количественные данные по измерению ВУФ излучения ударной волны в воздухе ограничены оценочными результатами отдельных измерений при $\lambda \geq 120$ нм [1,2]. Но, как показывают результаты численного моделирования и летных

экспериментов, вклад ВУФ излучения в лучистый тепловой поток может быть значительным.

В данной работе предлагается численная модель генерирования неравновесного ВУФ излучения прямой ударной волны в воздухе и методика ее экспериментальной верификации с использованием результатов экспериментов по исследованию эффекта фотоионизации воздуха перед фронтом ударной волны. Рассматриваемый диапазон скорости ее распространения $V_S = 4.5-9.5$ km/s, спектральный диапазон излучения 85–105 nm. Предполагается, что в этих условиях основной вклад в ВУФ излучение воздуха вносит излучение молекул азота в системах полос Берджа–Хопфилда I, II.

При численном моделировании рассматривается многокомпонентный состав воздуха в ударном слое, представляющий собой при высоких температурах смесь молекул, атомов, ионов и электронов (N_2 , O_2 , NO, O, NO^+ , N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ и e). Принята многотемпературная модель колебательной неравновесности, т.е. заранее предполагается различие между температурами поступательных и колебательных степеней свободы молекул N_2 , NO, O_2 (T , T_{VN_2} , T_{VNO} , T_{VO_2}). Электронная температура T_e считается отличной от поступательной и колебательной температур. Вращательная температура молекул предполагается равной поступательной. Диссоциация (рекомбинация) молекул N_2 , NO, O_2 и обменные процессы с образованием молекул NO рассматриваются с учетом колебательно–диссоциационного взаимодействия (различные модели). В кинетическую модель включены ионизационные реакции: ассоциативная ионизация с формированием ионов NO^+ , N_2^+ , O_2^+ , процессы обмена зарядом между ионизованными и нейтральными атомами и молекулами смеси и ионизации атомов и молекул электронным ударом [3]. Для определения концентраций излучающих молекул азота в состояниях $b^1\Pi_u$ и $b^1\Sigma_u^+$ применяется урвневая модель неравновесного заселения (разрушения) электронно-колебательного состояния N_2 в соударениях с тяжелыми нейтральными и заряженными частицами и электронами. Константы скоростей реакций с участием электронов зависят от их температуры, которая определяется с помощью балансного уравнения с учетом энергообмена электронов в упругих и неупругих соударениях с нейтральными и заряженными молекулами и атомами. Базовая модель расчета T_e учитывает также появление в ходе реакций ассоциативной ионизации электронов с энергией порядка kT .

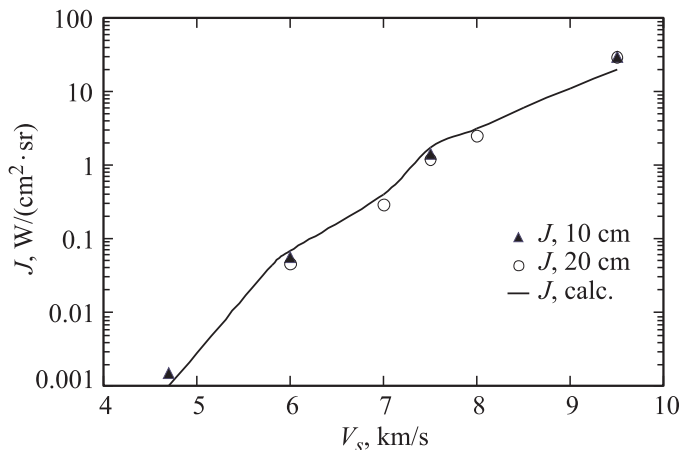


Рис. 1. Измеренные и расчетные значения интенсивности ВУФ излучения ударной волны.

Обеднение возбужденных состояний N_2 в ходе радиационного высвечивания учтено с использованием данных по коэффициентам Эйнштейна, любезно предоставленных авторам работы проф. С.Т. Суржиковым (ИПМ РАН).

Для верификации представленной численной модели разработана оригинальная методика определения ВУФ излучения ударной волны по эффекту фотоионизации воздуха перед ее фронтом. В проведенных исследованиях этого эффекта установлено, что перед ударной волной происходит фотоионизация молекул O_2 в диапазоне длин волн $\lambda = 85-105$ nm и при концентрации электронов в зоне фотоионизации $N_e \leq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ можно пренебречь процессами рекомбинации и прилипания электронов перед ударной волной [4,5]. Эксперименты выполнены в электроразрядной ударной трубе ЦАГИ. С помощью зондовых и СВЧ методов измерены распределения концентрации электронов перед фронтом ударной волны при ее скорости $V_s = 4.7-9.5$ km/s. В этом диапазоне скоростей ВУФ излучение ударной волны является существенно неравновесным [5].

Для анализа результатов экспериментов рассматривалось фотоионизирующее излучение области газа за ударной волной, представляю-

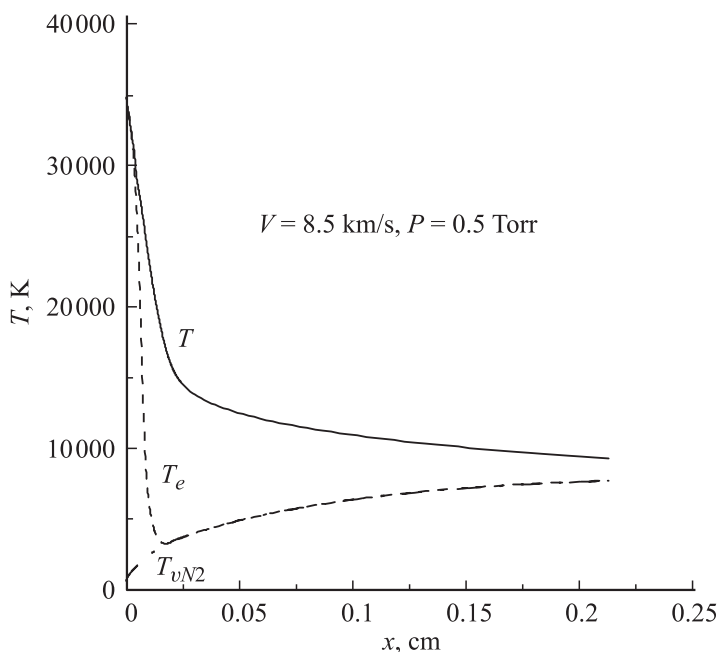


Рис. 2. Распределения температур за фронтом ударной волны.

щей дисковый источник, толщина которого равнялась протяженности „пробки“ газа, сжатого в ударной волне, а радиус r равен внутреннему радиусу канала ударной трубы. В этом случае может быть получена формула для распределения концентрации электронов по оси канала ударной трубы перед фронтом ударной волны при усредненном значении коэффициента поглощения в спектральной области фотоионизации молекулы кислорода k .

$$N_e(x) \approx \frac{2\pi k}{VI} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} J_\lambda d\lambda \int_x^\infty dx \int_0^{\theta_R} \exp(-kx/\cos\theta) \sin\theta d\theta, \quad (1)$$

где (λ_0, λ_1) — область длин волн для процесса фотоионизации кислорода, I — „цена электрона“ в процессе фотоионизации, $\theta = \arctg(r/x)$,

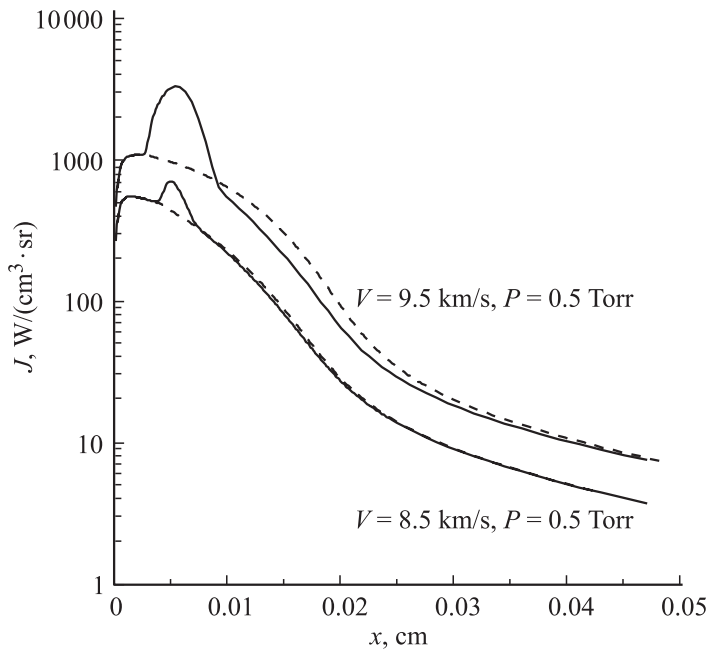


Рис. 3. Влияние выбора модели расчета температуры электронов на распределение интенсивности ВУФ излучения за фронтом ударной волны. Сплошная линия — базовая модель; штриховая линия — модель без учета вклада энергии электронов, образованных в реакциях ассоциативной ионизации.

где r — значение текущего радиуса рассматриваемого излучающего дискового слоя, значение θ_R соответствует радиусу канала трубы R . Проведя интегрирование в (1), можно получить соотношение

$$N_e(x) \approx \frac{2\pi J}{VI} \left[E_3(kx) - E_3(k\sqrt{x^2 + R^2}) \right], \quad (2)$$

где $J = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} J_\lambda d\lambda$ — поток фотоизлучающего ВУФ излучения ударного слоя, E_3 — интегро-экспоненциальная функция 3-го рода. Измеренные значения концентраций электронов $N_e = f(V_s)$ в зоне фотоионизации на разных расстояниях от фронта ударной волны ($x = 10, 20$ см) с

помощью (2) позволяют решить задачу определения интенсивности ВУФ излучения ударной волны J ($\text{W}/\text{sm}^2 \cdot \text{sr}$) в рассматриваемом спектральном интервале.

На рис. 1 символами показаны значения J , полученные при обработке результатов экспериментов. Кривая — результат соответствующего расчета J по представленной выше численной модели.

Анализ полученных результатов позволил установить некоторые особенности генерирования ВУФ излучения ударной волны в рассматриваемом диапазоне V_s и λ . В частности, установлена роль в возбуждении систем Берджа–Хопфилда N_2 столкновений с тяжелыми частицами и свободными электронами, влияние различных моделей колебательно-диссоциационного взаимодействия и особенностей распределения электронной температуры T_e за фронтом ударной волны.

На рис. 2, 3 представлены соответственно результаты расчетов поступательной T , электронной T_e и колебательной T_{VN_2} температур и интенсивности ВУФ излучения в диапазоне 85–105 nm за ударной волной. Наблюдается резкий пик величин T и T_e за фронтом ударной волны с максимальными значениями ~ 35000 К. Вследствие резонансного энергообмена свободных электронов с компонентами плазмы T_e резко изменяется в узкой области с характерной протяженностью ~ 0.02 см. При $V_s \geq 8.5$ km/s существует вторичный максимум излучения, обусловленный влиянием на электронную температуру учета энергии электронов, рожденных в реакции ассоциативной ионизации.

В заключение отметим, что впервые удалось, используя результаты исследования эффекта фотоионизации воздуха перед фронтом ударной волны, получить данные по интенсивности молекулярного неравновесного ВУФ излучения ударной волны при скорости ее распространения 4.5–9.5 km/s. Верифицированная на основе этих данных численная модель позволила определить ряд важных особенностей процесса генерирования ВУФ излучения за фронтом ударной волны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10–01–00579а.

Список литературы

- [1] Bose D., McCorkle E., Bogdanoff D., Allen G. // AIAA Paper–2009–1030. Jan. 2009.

- [2] *Yamada G., Takayanagi H., Suzuki T., Fujita K.* // AIAA Paper–2010–237. Jan. 2010.
- [3] *Горелов В.А., Киреев А.Ю.* // Ученые записки ЦАГИ. 2007. Т. XXXVIII. № 1–2. С. 49–57.
- [4] *Горелов В.А., Киреев А.Ю., Шведченко В.В.* // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 12. (www.chemphys.edu.ru/2011-05-12-001.pdf).
- [5] *Горелов В.А., Киреев А.Ю., Шиленков С.В.* // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XXXXIII. № 5. С. 84–95.