

О ПРИЧИНАХ ОБРАЗОВАНИЯ ПИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НЕРАВНОВЕСНОГО
ГАЗА ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

В.С.Воробьев, И.Т.Якубов

В ряде работ, опубликованных за последние годы [1,2], экспериментально обнаружен пик излучения за ударными волнами. Излучение неравновесного релаксирующего газа значительно превосходит свой уровень по достижению равновесия. Попытки объяснить это явление не были успешны. Здесь показано, что причиной образования пика излучения являются: 1) неравновесное распределение излучающих атомов

по состояниям, 2) нагрев электронного газа неупругими столкновениями с молекулами. Результаты вычислений сравниваются с экспериментом.

Для описания состояния неравновесной плазмы, образующейся за ударной волной, кроме трех уравнений сохранения, следует привлечь уравнение кинетики ионизации и баланс энергии электронов [3,7]:

$$\frac{d}{dx} (n_e v) = S_e, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{3}{2} n_e T_e v \right) + n_e T_e \frac{dv}{dx} = S_{ee}. \quad (2)$$

Здесь T_e - температура электронов, n_e - их концентрация, v - скорость потока газа, x - расстояние фронта, S_e - источник электронов. На первом этапе релаксации в нем преобладает ассоциативная ионизация, а затем ионизация электронами. В источнике энергии электронов S_{ee} учтем, как обычно, упругие столкновения с ионами, ассоциативную ионизацию и ионизацию электронами. Кроме того, весьма важны неупругие столкновения с колебательно-возбужденными молекулами [6], несмотря на то, что за сильными волнами ($v \gg 10$ км/сек) молекулы быстро диссоциируют и число их мало [7].

Распределение атомов по состояниям можно исследовать с помощью уравнений Фоккера-Планка в пространстве энергии [4,5]. Используем полученное ранее [5] выражение для концентрации атомов на уровне

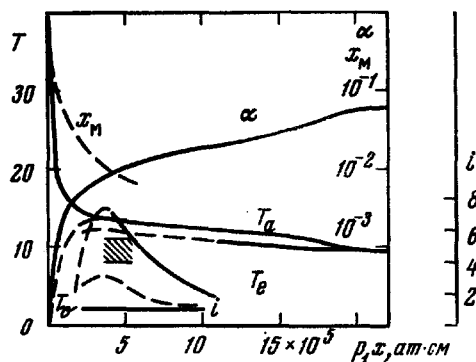
$k - n_k$:

$$n_k = (n_1 \sum_{i \geq k} S_i + n_e^2 \sum_{i < k} S_i) / (\sum_i S_i), \quad (3)$$

где $S_i = (n_i^0 D_i)^{-1} (n_i^0 - \text{локально равновесное значение } n_i)$, D_i - коэффициент диффузии в дискретном пространстве энергий, обусловленной столкновениями атом-электрон [5].

Результаты решения для волны в воздухе приведены на рисунке. Там же дан профиль i (средняя кривая) - отношения интенсивности излучения в 35-39-линиях азота к своему значению в равновесии и нанесены результаты эксперимента [2]. Здесь T - температуры в 10^3 К, α - степень ионизации, X_N - доля молекул N_2 . Пунктиром даны участки кривых, известных менее надежно. Заштрихованная область соответствует величине и положению экспериментального максимума i [2].

Чтобы учесть роль возможной неопределенности, связанной с вычислением температуры колебаний T_v и числа молекул, мы провели оценки $\dot{\epsilon}$ сверху и снизу. Нижняя линия (практически горизонтальная) соответствует расчету, когда вклад молекул из S_{ee} исключен, -



Профили параметров неравновесного воздуха за ударной волной 10 км/сек, давление перед фронтом $p_1 = 0,1$ мм рт.ст.

жесткая оценка снизу. Оказывается, что и в этом случае интенсивность излучения не мала, а практически равна равновесной. Верхняя кривая (сплошной участок) построена в предположении $T_e = T_a$ (самой большой из температур) - жесткая оценка сверху. На малых x эта оценка становится неправомерной, поскольку температура колебаний здесь невелика, а молекулы могут нагреть электроны лишь до $T_e = T_v$, чему и соответствует пик верхней кривой $\dot{\epsilon}$.

За сильными ударными волнами возбуждение молекул электронами позволяет объяснить также пик излучения в полосатом спектре. Так, например, населенности первых возбужденных состояний N_2^+ , возникающие при ассоциативной ионизации, быстро достигают локально равновесных значений. Расчетные интенсивности излучения хорошо согласуются с измеренными ранее [2].

Благодарим Л.М.Бибермана и Г.Э.Нормана за ценные обсуждения.

Научно-исследовательский институт
высоких температур

Поступило в редакцию
7 мая 1966 г.

Литература

- [1] Исследование гиперзвуковых течений, под ред. Ф.Р.Риддела. Изд. "Мир", М., 1964.
- [2] R.A.Allen, R.L.Taylor, A.Textoris. VI Conf.intern.Phénom. d'Ionis dans les gas, Paris, v.III, p.381, 1963.

- [3] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Физматгиз, М., 1963.
- [4] Л.П.Питаевский. ЖЭТФ, 42, 1326, 1962.
- [5] В.С.Воробьев. ЖЭТФ, 51, 327, 1966.
- [6] Л.М.Биберман, А.Х.Мнацаканян. Докл. Междунар.конф. по преобраз. тепловой энергии в электрич. Зальцбург, 1966.
- [7] Л.М.Биберман, И.Т.Якубов. Proc. VII Intern. Conf. Ioniz. Phenom. in Gases, Belgrad, 1965.