

# КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ, ВОЗНИКАЮЩИМИ В НЕРАВНОВЕСНЫХ ПОТОКАХ СМЕСЕЙ ГАЗОВ

О.В. Кунова, Е.А. Нагнибеда

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия  
E-mail: kunova.olga@gmail.com, e\_nagnibeda@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию влияния колебательной неравновесности набегающего потока на структуру релаксационной зоны ударной волны. На основе поуровневого описания [1] численно исследованы течения бинарных смесей  $N_2/N$ ,  $O_2/O$  и пятикомпонентного воздуха  $N_2/O_2/NO/N/O$  за ударным фронтом при разных колебательных распределениях молекул невозмущенного потока.

Внутри ударного фронта процессы колебательного энергообмена и химические реакции предполагались «замороженными» с постоянными составом смеси и заселенностями колебательных уровней молекул. Считалось, что в набегающем потоке заселенности колебательных уровней молекул имеют вид максвелловского распределения с колебательной температурой  $T_{v0}$ .

Для описания различных режимов течения вводились два параметра:  $\beta = T_{v0}/T_0$ , характеризующий степень начальной неравновесности, и  $f(M_0, \gamma) = T_1/T_0$ , определяющий интенсивность ударной волны. Здесь  $T_0$  и  $T_1$  – температура смеси в набегающем потоке и непосредственно за ударной волной,  $M_0$  – число Маха в набегающем потоке,  $\gamma$  – показатель адиабаты. Рассматривались следующие условия:

1.  $f > \beta = 1$ . В этом случае ударная волна возникает в равновесном газе, когда  $T_{v0} = T_0$ .
2.  $f > \beta > 1$ . Данное условие реализуется при относительно больших числах Маха и слабонеравновесном набегающем потоке.
3.  $\beta > f > 1$ . Это условие имеет место при значительной начальной колебательной неравновесности и небольших числах Маха.

Показано, что колебательное возбуждение молекул набегающего потока приводит к существенному изменению характера релаксации газа за ударной волной. В частности, в третьем случае наблюдается дезактивация сильно возбужденного газа за ударным фронтом в отличие от традиционной ситуации возбуждения колебаний молекул в релаксационной зоне. На рис. 1 представлена область изменения чисел Маха, при которых при заданной начальной неравновесности реализуется такой режим релаксации. Ранее эффекты, связанные с неравновесностью набегающего потока, обсуждались в [2]. В настоящей работе приведены численные оценки влияния колебательного возбуждения молекул перед ударным фронтом на заселенности колебательных уровней, химический состав, макропараметры и скорость установления равновесия в релаксационной зоне в рассмотренных смесях.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ НИР 6.38.73.2012.

## Л и т е р а т у р а

1. *Kunova O.V., Nagnibeda E.A.* State-to-state description of reacting air flows behind shock waves // *Chem. Phys.* 2014. Vol. 441. P. 66-76.
2. *Осинов А.И., Уваров А.В.* Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // *Успехи физических наук.* 1992. Т. 162. №. 11. С. 1-42.

## Vibrational and Chemical Relaxation behind the Shock Waves Formed in Non-equilibrium Gas Mixtures Flows

O.V. Kunova, E.A. Nagnibeda

Saint Petersburg State University, Russia

In the present paper, non-equilibrium flows of the 5-component air mixture  $N_2/O_2/NO/N/O$  and binary mixtures  $N_2/N$  and  $O_2/O$  behind shock waves are studied taking into account the state-to-state vibrational and chemical kinetics. Peculiarities of macroscopic parameters and vibrational distributions behind a shock wave formed in an initially vibrationally excited mixture are studied.

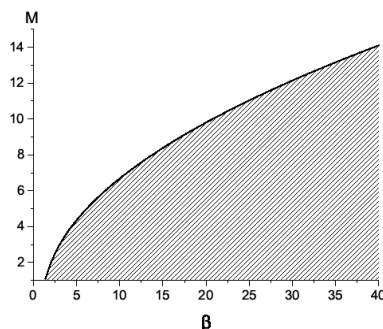


Рис. 1. Значения чисел Маха в зависимости от параметра  $\beta$ , характерные для сильнонеравновесного газа ( $T_{v0} > T_1 > T_0$ ).