

03;12

## Поступательная неравновесность во фронте ударной волны в смеси аргона и гелия

© П.В. Козлов, С.А. Лосев, Ю.В. Романенко

Институт механики Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова  
E-mail: kozlov@inmech.msu.su

Поступило в Редакцию 19 мая 2000 г.

Экспериментально показано, что в смеси аргона с гелием в соотношении один к одному во фронте ударной волны нарабатывается на порядок больше возбужденных метастабильных атомов аргона, чем в чистом аргоне, при одинаковом значении числа Маха и одинаковом начальном давлении аргона. Предложены выражения для определения средней "продольной" температуры фронта ударной волны и расчета концентрации возбужденных частиц, учитывающей "продольный" характер температуры.

В работе [1] на примере ударной волны в аргоне было экспериментально показано существование в поступательно-неравновесной области ударной волны средней температуры  $\tilde{T}_f$ , превышающей равновесную температуру горячего газа за фронтом ударной волны в 1.7 раза. В качестве оценки неравновесности внутри фронта ударной волны для "температуры столкновения вдоль направления движения ударной волны" ("продольной" температуры) в точке  $x = 0$  было предложено выражение

$$T_{x=0} = \frac{m}{2k} \cdot \left[ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2kT_1}{m}} + V_2 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2kT_2}{m}} \right]^2, \quad (1)$$

где  $x$  — расстояние (в длинах свободного пробега холодных частиц) вдоль направления движения ударной волны,  $m$  — масса частиц,  $k$  — постоянная Бланка,  $V_2$  — скорость течения горячего газа за ударной волной,  $T_1$  и  $T_2$  — температура холодного и горячего газа. Начало координат в точке  $x = 0$  определено в соответствии с моделью фронта ударной волны, опубликованной Мотт-Смиттом в 1951 г. [2].

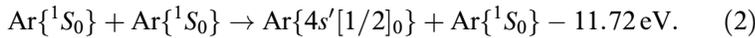
Из формулы (1) следует, что при фиксированных  $T_1$  и  $T_2$  изменение  $V_2$  влечет за собой изменение величины "продольной" температуры  $T_{x=0}$ , что в эксперименте должно сказаться на изменении  $\tilde{T}_f$ . Проверке этого предположения посвящена данная экспериментальная работа. В настоящем эксперименте исследовались ударные волны, распространяющиеся в аргоне и в смеси аргона с гелием в соотношении один к одному. При числе Маха ударной волны  $M = 6$  ( $T_1 = 293$  К,  $T_2 = 3553$  К) формула (1) дает значения для аргона  $T_{x=0} = 11434$  К и для смеси аргона с гелием  $T_{x=0} = 17086$  К. Для смеси масса частиц  $m$  рассчитывалась по молекулярному весу смеси газов.

В работе [3], посвященной неравновесному излучению молекул  $I_2$  за фронтом ударной волны в двухкомпонентной смеси с сильным разбавлением (97–99.9%), приведены экспериментальные данные об увеличении интенсивности неравновесного излучения молекул  $I_2$  с увеличением скорости звука газа-разбавителя. Авторы связывают эффект неравновесного излучения с высоким парциальным числом Маха тяжелой компоненты. Вследствие отсутствия соответствующей информации о сечениях и константах упругих и неупругих процессов при вычислении интеграла столкновений вдоль направления движения ударной волны, авторы [3] ограничиваются введением максимального интеграла столкновений и при этом получают качественное согласие расчета с экспериментом. Такой подход представляется нам эквивалентным введению в работе [1] феноменологического определения средней температуры во фронте ударной волны  $\tilde{T}_f$ . Настоящая работа расширяет экспериментальный диапазон исследований эффектов, связанных с поступательной неравновесностью в двухкомпонентной смеси. Предлагается описание эффекта в терминах феноменологических усредненных параметров.

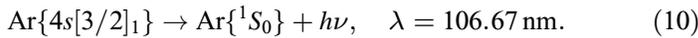
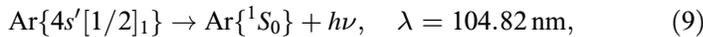
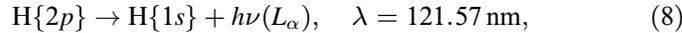
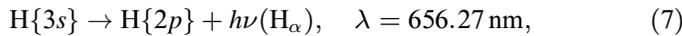
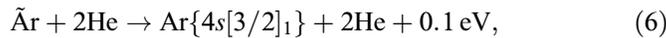
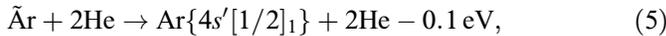
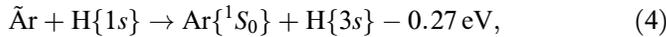
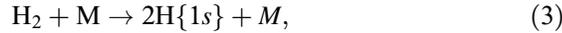
Эксперименты проводились на однодиафрагменной ударной трубе диаметром 50 мм, изготовленной из нержавеющей стали. Камера низкого давления заполнялась смесью аргона с водородом или смесью гелия, аргона и водорода, в качестве толкающего газа служил водород. Использовались наборные диафрагмы из лавсановой пленки толщиной 20  $\mu\text{m}$ . Откачка камеры низкого давления проводилась до давления  $10^{-2}$  Торр, натекание составляло около  $2 \cdot 10^{-4}$  Торр/мин. Для наполнения камеры низкого давления использовались аргон марки ВЧ, гелий и водород промышленной чистоты. Для измерения скорости ударной волны применялись пьезоэлектрические датчики. Точность измерения скорости была не хуже 1%. Смотровые окна в измерительной секции

были изготовлены из  $MgF_2$ . Для спектральных измерений использовался монохроматор BM-50 с дифракционной решеткой 1200 lin/mm с дисперсией 1.66 nm/mm. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались фотоэлектрический умножитель ФЭУ-100 (область спектральной чувствительности 170 ÷ 800 nm), цифровой осциллограф DL-922 и многоканальный спектроанализатор OSA-WP4. Временное разрешение схемы измерения с фотоумножителем составляло 1  $\mu$ s.

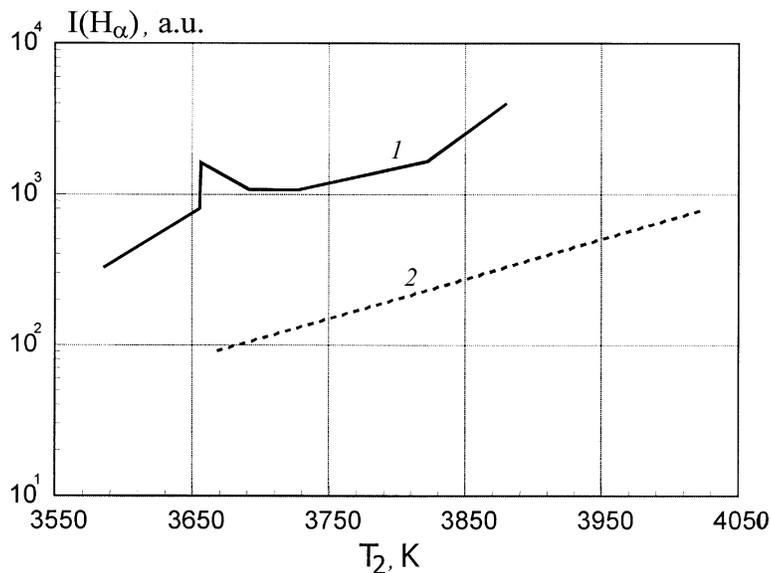
В работе [1] описана экспериментальная модель, предложенная для исследования поступательной неравновесности во фронте ударной волны в аргоне при использовании малой примеси водорода, в качестве индикатора неравновесности. В соответствии с этой моделью во фронте ударной волны нарабатывается некоторое количество метастабильных атомов аргона с концентрацией  $n^0(\tilde{Ar})$ , где  $\tilde{Ar} \equiv Ar\{4s'[1/2]_0\}$  в реакции



В настоящей работе использовались смеси  $Ar:H_2 = 99:1$  при  $P_1 = 10$  Torr и  $He:Ar:H_2 = 50:49.5:0.5$  при  $P_1 = 20$  Torr. Приведем основные процессы, которые происходят в данных смесях при температурах  $T_2 < 4000$  K за фронтом ударной волны при наличии во фронте процесса (2):



В данном эксперименте наблюдение производилось за процессом (7) путем регистрации фотонов, излученных ударной волной в линии  $H_\alpha$ ; таким образом была получена оценка снизу начальной концентрации метастабильных атомов аргона, образовавшихся во фронте ударной волны



**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость интенсивности линии  $H_\alpha$  от температуры  $T_2$ : 1 — смесь He:Ar:H<sub>2</sub>=50:49.5:0.5 при  $P_1 = 20$  Torr, 2 — смесь Ar:H<sub>2</sub>=99:1 при  $P_1 = 10$  Torr.

в результате поступательной неравновесности. Очевидно, что количество фотонов, излученных в линии  $H_\alpha$  серии Бальмера, не превосходит число метастабильных атомов аргона. В случае применения фотоэлектрического умножителя количество фотонов  $N_{hv}(H_\alpha) \sim \int_0^\tau U_{ph}(H_\alpha) dt$ , где  $\tau$  — длительность светового сигнала,  $U_{ph}$  — сигнал с фотоэлектрического умножителя на длине волны  $H_\alpha$ . При использовании многоканального спектроанализатора количество регистрируемых фотонов на длине волны  $H_\alpha$  пропорционально амплитуде сигнала на спектроанализаторе  $I(H_\alpha)$ .

На рис. 1 приведены результаты измерения зависимости интенсивности  $I(H_\alpha)$  от  $T_2$  в серии экспериментов с многоканальным спектроанализатором OSA-WP4. В этой серии экспериментов возможности варьирования параметров были ограничены, с одной стороны, чувстви-

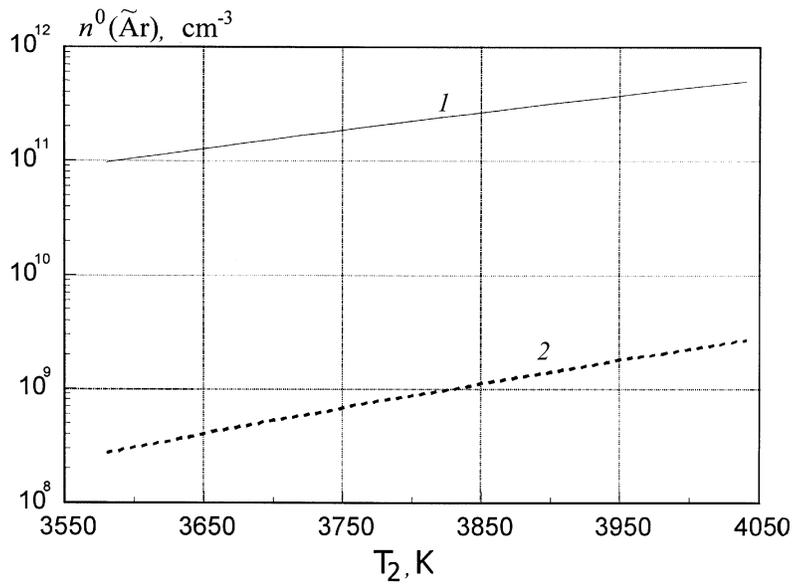
тельностью спектроанализатора, с другой стороны, — температурой  $T_2 \cong 4000$  К, в пределах которой справедлива модель, представленная в (2)–(10). Интенсивность крайней левой точки для линии, полученной в смеси с аргоном, оценена по результатам измерений на ФЭУ. Положение экспериментальных точек на температурной шкале определялось возможностью варьирования режима по количеству диафрагм. На графике видно, что кривая интенсивности излучения линии  $H_\alpha$  в смеси аргона с гелием лежит почти на порядок выше, чем такая же кривая для смеси с аргоном.

В работе [1] по результатам эксперимента была определена средняя температура фронта  $\tilde{T}_f$  в соответствии с измеренной концентрацией метастабильных атомов аргона по формуле Больцмана  $n^0(\text{Ar}) = n \cdot \exp(-E(\text{Ar})/k\tilde{T}_f)$ . Здесь использовано предположение о том, что заселенность метастабильного уровня устанавливается вместе с равновесием по поступательным степеням свободы. Это возможно, если вероятность возбуждения метастабильного уровня при столкновении двух атомов близка к единице, при кинетической энергии столкновения превосходящей энергию этого уровня.

В таком формальном определении не очень ясен физический смысл средней температуры во фронте, так как здесь еще нет равновесного распределения частиц по скоростям. В то же время известно, что "поперечная" температура  $T_\perp$  во фронте плавно нарастает от  $T_1$  к  $T_2$  [4], а "продольная" температура  $T_x$  имеет всплеск в окрестности точки  $x = 0$  в соответствии с формулой (1). Вычислим среднюю "продольную" температуру  $\tilde{T}_x$ . В феноменологической модели Мотт-Смитта температура  $T_x$  стремится на краях к  $T_1$  и  $T_2$ . Предположим, что ширина фронта конечна и будем считать переход от  $T_x = T_1$  к  $T_{x=0}$  и от  $T_{x=0}$  к  $T_x = T_2$  линейным. В таком случае можно ввести понятие средней "продольной" температуры, справедливое для частиц, скорости которых направлены вдоль оси  $X$  навстречу друг другу:

$$\tilde{T}_x = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a T_x dx, \quad (11)$$

где  $2a$  — условная ширина фронта,  $T_{x=-a} = T_1$ ,  $T_{x=a} = T_2$ , а величина  $T_{x=0}$  определена формулой (1). Таким образом, температура  $T_x$  будет определена для одной шестой всех частиц. Для приведенного в работе [1]



**Рис. 2.** Расчетные кривые зависимости  $n^0(\tilde{\text{Ar}})$  от температуры  $T_2$ : 1 — смесь He:Ar:H<sub>2</sub> = 50 : 49.5 : 0.5 при  $P_1 = 20$  Торр, 2 — смесь Ar:H<sub>2</sub> = 99 : 1 при  $P_1 = 10$  Торр.

эксперимента получаем следующее значение концентрации возбужденных метастабильных атомов аргона, образовавшихся во фронте:

$$n^0(\tilde{\text{Ar}}) = \frac{1}{6} \cdot \frac{n_1 + n_2}{2} \cdot \exp(-E(\tilde{\text{Ar}})/k\tilde{T}_x) = 2.1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}. \quad (12)$$

Величина  $n(x)$  внутри фронта здесь также взята в линейном приближении,  $E(\tilde{\text{Ar}})$  — энергия возбуждения метастабильного уровня аргона. Отмечается хорошее совпадение с измеренной в эксперименте величиной  $n^0(\tilde{\text{Ar}}) = 2 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . В данном конкретном случае  $\tilde{T}_x = 6670 \text{ K}$ ,  $T_2 = 3520 \text{ K}$ .

На рис. 2 приведены расчетные значения концентрации метастабильных атомов аргона  $n^0(\tilde{\text{Ar}})$ , полученные в соответствии с выражением (12). Видно, что расчетная кривая для смеси гелия с аргоном

лежит примерно на два порядка выше расчетной кривой для смеси водорода с аргоном. В эксперименте между соответствующими кривыми получена разница на порядок меньше. Различие между расчетом и экспериментом можно связать с тем обстоятельством, что в расчете не учитывался уход метастабильных атомов аргона по каналам (5) и (6), что уменьшает наблюдаемую величину  $N_{h\nu}(H_\alpha)$  для смеси аргона с гелием. В экспериментах подобного рода можно измерить суммарную константу скоростей процессов (5) и (6). Различие между расчетом и экспериментом может быть связано с тем, что в многокомпонентной смеси искажается парциальная форма фронта тяжелой компоненты [5], в результате взаимодействия с легкой компонентой для которой парциальное число Маха очень невелико, так что фронт волны становится более растянутым и теряет свойства скачка. Другими словами, можно сказать, что в скачке компонента, находящаяся в состоянии поступательной равновесности, эффективно максвеллизует тяжелую компоненту.

Работа поддержана грантом INTAS Call 99 OPEN-0464.

## Список литературы

- [1] Козлов П.В., Лосев С.А., Романенко Ю.В. // Вестн. Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1998. № 5. С. 46–51.
- [2] Mott-Smith H.M. // Phys. Rev. 1951. V. 82. P. 885.
- [3] Великодный В.Ю., Емельянов А.В., Еремин А.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 10. С. 23–33.
- [4] Черчињяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана. М.: Мир, 1978.
- [5] Куликов С.В. // Изв. АН. Механика жидкости и газа. 1997. № 4. С. 171–178.