

УДК 533.6

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С ОБЛАСТЬЮ НЕРАВНОВЕСНОСТИ В КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОМ ГАЗЕ

*Д. И. Завершинский В. Г. Макарян, Д. П. Порфирьев*

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), 443086, Россия, Самара, Московское ш., 34.

E-mail: vmak@rambler.ru

*На основе численного решения уравнений газодинамики неравновесной среды исследовано проникновение ударной волны в область неравновесного газа. Наблюдалось расщепление фронта ударной волны на ударную и тепловую волны, что качественно совпадает с экспериментальными результатами А. И. Климova.*

**Ключевые слова:** ударная волна, неравновесность, колебательно-возбужденный газ, ударная адиабата, тепловая волна.

Набор эффектов и явлений неравновесной газодинамики, требующих теоретической интерпретации, появился в ходе развития авиа- и космической техники последнего поколения, требующей новых подходов к аэродинамике полёта, в том числе в сильно неравновесных условиях взаимодействия с атмосферами планет. Задачи, стоящие перед гиперзвуковой авиацией пятого поколения, привели к идее управления не с помощью механических элементов, перемещаемых за счёт использования рычагов и гидравлики (что весьма затруднительно из-за большого сопротивления воздуха при гиперскоростях), а путём искусственного создания потока плазмы на крыле. Для этого, например, на передней кромке крыла можно искусственно создать плазменный разряд. При этом набегающий воздух, попадая в область электрического разряда, превращается в ионизированный газ, которым можно управлять под воздействием магнитного поля. В результате родилось новое междисциплинарное направление, получившее название плазменной аэродинамики. В этой области за последнее время проведено большое число экспериментов, показавших, что при движении тел в плазменной оболочке наблюдается снижение аэродинамического сопротивления и рост подъёмной силы при сверхзвуковом обтекании тел до 40% при наличии плазменных образований перед ними; ослабление и деструкция ударной волны перед летящими телами в плазмодинамических экспериментах, или наоборот, усиление их в зависимости от типов разряда; расщепление фронта волны и образование предвестников [1–4]. Существенно, что в области плазменной оболочки и в области низкотемпературной плазмы двигателя газ становится колебательно неравновесным за счёт неупругих столкновений электронов плазмы с молекулами газа. Поэтому исследование особенностей взаимодействия ударных волн в колебательно-неравновесном газе с источником энергии, поддерживающим колебательную неравновесность, позволит эффективно управлять потоками неравновесной плазмы на крыле и в камере сгорания, что является актуальной задачей, в том числе для развития плазменной аэродинамики и ее приложений.

Как показано в [5–7], в средах со стационарно поддерживаемой неравновесностью изменение структуры слабой ударной волны может быть вызвано существенно новыми акустическими свойствами подобных сред, обусловленными знакопеременностью коэффициентов второй вязкости, дисперсии и газодинамической нелинейно-

---

*Дмитрий Игоревич Завершинский, аспирант, каф. физики. Владимир Георгиевич Макарян (к.ф.-м.н.), доцент, каф. физики. Денис Петрович Порфирьев, ассистент, каф. физики.*

сти.

В настоящей работе численно исследовано взаимодействие ударной волны с областью стационарно неравновесного газа. Показано, что при проникновении в область неравновесности фронт ударной волны расщепляется с образованием тепловой и ударной волн, распространяющихся в область неравновесности.

Исходная система уравнений газодинамики включает уравнения непрерывности, Навье—Стокса, состояния газа и переноса тепла [9, 10]:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4}{3}\eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$P = \rho T/m, \quad (3)$$

$$C_{V\infty} \frac{dT}{dt} + \frac{dE_K}{dt} - \frac{T}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = Q - I + \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{3\eta m}{4\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2, \quad (4)$$

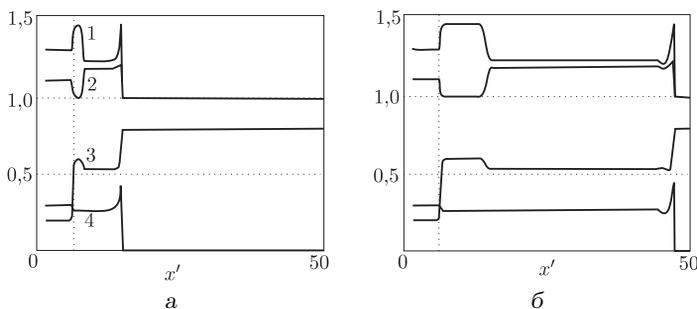
где  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x$ ;  $m$  — средняя молекулярная масса;  $u$  — скорость газа;  $T$ ,  $\rho$ ,  $P$  — температура (в энергетических единицах), плотность и давление среды;  $C_{V\infty}$  — замороженная теплоемкость при постоянном объеме;  $\eta$ ,  $\chi$  — коэффициенты сдвиговой вязкости и теплопроводности газа. Систему (1)–(4) дополним уравнением релаксации внутренних степеней свободы. Для неравновесного возбуждения колебательных состояний молекул можно применить следующую модель релаксации:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E_e - E}{\tau(T, \rho)} + Q, \quad (5)$$

где  $T_k$  — энергия колебательного кванта;  $E$  — колебательная энергия в расчёте на одну молекулу,  $E_e = T_k/(\exp(T_k/T) - 1)$  — её равновесное значение (значение при равенстве стационарных колебательной и поступательной температур  $T_V = T_0$ );  $\tau(T, \rho) = B \exp(b/\sqrt[3]{T})/\rho\sqrt{T}$  — время колебательной релаксации согласно модели Ландау—Теллера [10];  $B$  и  $b$  — постоянные коэффициенты;  $Q$  — мощность внешнего источника накачки (на одну молекулу), необходимая для поддержания неравновесности  $E > E_e$ ;  $I$  — мощность теплоотвода в расчёте на одну молекулу.

Введём безразмерные переменные  $\rho' = \rho/\rho_0$ ,  $u' = u/c_\infty$ ,  $P' = P/P_0$ ,  $T' = T/T_0$ ,  $S = Q\tau_0/T_0$ ,  $E' = E/T_0$ ,  $E'_e = E_e/T_0$ ,  $\tau' = \tau/\tau_0$ ,  $t' = t/\tau_0$ ,  $x' = x/(c_\infty\tau_0)$ , где  $\rho_0$ ,  $P_0$ ,  $T_0$  — невозмущенные значения плотности, давления и температуры (температура в энергетических единицах);  $\tau_0 = \tau(T_0, \rho_0)$ ,  $c_\infty = \sqrt{\gamma_\infty P_0/\rho_0}$  — высокочастотная скорость звука,  $\gamma_\infty$  — высокочастотный показатель адиабаты;  $S$  — степень неравновесности среды. После исключения давления из уравнения (2) с помощью уравнения состояния (3) и производных  $dE/dt$  и  $d\rho/dt$  из уравнения (4) с помощью уравнений (1) и (5) система уравнений (1)–(5) запишется так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho'}{\partial t'} &= -u' \frac{\partial \rho'}{\partial x'} - \rho' \frac{\partial u'}{\partial x'}, \\ \frac{\partial u'}{\partial t'} &= -u' \frac{\partial u'}{\partial x'} - \frac{1}{\gamma_\infty} \left( \frac{\partial T'}{\partial x'} + \frac{T'}{\rho'} \frac{\partial \rho'}{\partial x'} \right) + \frac{4\eta}{3\rho'\rho_0\tau_0 c_\infty^2} \frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2}, \\ \frac{\partial T'}{\partial t'} &= -u' \frac{\partial T'}{\partial x'} - \frac{1}{C_{V\infty}} \left( \frac{E'_e - E'}{\tau'(\rho', T')} + S + T' \frac{\partial u'}{\partial x'} - \frac{\chi}{\tau_0 c_\infty^2} \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{4}{3} \frac{\eta \gamma_\infty}{\rho' \rho_0 \tau_0 c_\infty^2} \left( \frac{\partial u'}{\partial x'} \right)^2 \right), \\ \frac{\partial E'}{\partial t'} &= -u' \frac{\partial E'}{\partial x'} + \frac{E'_e - E'}{\tau'(\rho', T')} + S. \end{aligned} \quad (6)$$



Результат численного моделирования проникновения ударной волны в колебательно-неравновесном газе в область со стационарной неравновесностью для двух моментов времени: а)  $t' = 10$  и б)  $t' = 35$ ; 1 — безразмерная плотность  $\rho'$ ; 2 — безразмерная температура  $T'$ ; 3 — безразмерная колебательная энергия  $E'$ ; 4 — безразмерная скорость газа  $u'$

Для численного решения системы уравнений (6) пространственные производные аппроксимировались пятиточечными разностными функциями четвертого порядка точности:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial x'} = \frac{-\rho'_{i+2} + 8\rho'_{i+1} - 8\rho'_{i-1} + \rho'_{i-2}}{12h} + O(h^4)$$

(аналогично для  $\partial u' / \partial x'$ ,  $\partial T' / \partial x'$  и  $\partial E' / \partial x'$ ) и

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} = \frac{-u'_{i+2} + 16u'_{i+1} - 30u'_i + 16u'_{i-1} - u'_{i-2}}{12h^2} + O(h^4)$$

(аналогично для  $\partial^2 T' / \partial x'^2$ ). Здесь  $h$  — величина шага сетки по пространственной координате. В результате система дифференциальных уравнений в частных производных (6) сводилась к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для сеточных функций с производными первого порядка по времени. Интегрирование по времени полученной таким образом системы уравнений велось методом Рунге—Кутты 4-го порядка [10].

Результаты численного моделирования проникновения ударной волны в область стационарной неравновесности газа показаны на рисунке. Здесь начальная ударная волна распространяется в положительном направлении оси  $x'$ . Прошедшая в неравновесную область ударная волна трансформируется в структуру двух возможных типов: с плавным убыванием плотности за ударным скачком (см. рис.) и структуру с плавным нарастанием плотности за ударным скачком. Подробно эти типы ударных волн исследованы в работах [5–7, 10–12]. Хорошо видно расщепление фронта ударной волны на входе в область неравновесности (при  $x' > 0$ ) с образованием тепловой волны охлаждения на границе области. Тепловая волна, возникающая на границе области неравновесности, распространяется внутрь этой области со скоростью потока газа. Она представляет собой область, в которой происходит плавное изменение плотности газа при неизменном давлении. Такое явление качественно совпадает с экспериментально наблюдавшимся расщеплением фронта ударной волны [13] при её проникновении в область плазмы тлеющего разряда.

Работа частично поддержана грантом Минобнауки РФ № 2.560.2011 в рамках государственных заданий высшим учебным заведениям на 2012 год и грантами ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. № 14.740.11.0999 и № 14.B37.21.0767.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климов А. И., Коблов А. Н., Мишин Г. И., Серов Ю. Л., Явор И. П. Распространение ударных волн в нестационарном тлеющем разряде // *Письма в ЖТФ*, 1989. Т. 15, № 20. С. 31–36. [*Klimov A. I., Koblov A. N., Mishin G. I., Serov Yu. L., Yavor I. P. Shock Wave Propagation in transient Glow Discharge Plasmas // Pis'ma Zhurn. Tekhn. Fiz.*, 1989. Vol. 15, no. 20. Pp. 31–36].
2. Быстров С. А., Иванов В. И., Шугаев Ф. В. Распространение плоской ударной волны в слабоионизованной плазме // *Физ. плазмы*, 1989. Т. 15, № 5. С. 558–562. [*Bystrov S. A., Ivanov V. I., Shugaev F. V. Plane shock wave propagation in weakly ionized plasma // Fiz. Plazmy*, 1989. Vol. 15, no. 5. Pp. 558–562].
3. Гридин А. Ю., Климов А. И., Молевич Н. Е. Распространение ударных волн в плазме тлеющего разряда // *ЖТФ*, 1993. Т. 63, № 3. С. 157–162; англ. пер.: *Gridin A. Yu., Klimov A. I., Molevich N. E. Propagation of shock waves in the plasma of a glow discharge // Tech. Phys.*, 1993. Vol. 38, no. 3. Pp. 238–240.
4. Гридин А. Ю., Климов А. И. Структура ударной волны в неравновесной плазме (выделение энергии, запасенной в разрядной плазме за ударной волной) // *Хим. физика*, 1993. Т. 12, № 3. С. 363–365. [*Gridin A. Yu., Klimov A. I. Shock wave structure in nonequilibrium plasma // Khim. Fiz.*, 1993. Vol. 12, no. 3. Pp. 363–365].
5. Macheret S. O., Ionikh Yu. Z., Chernysheva N. V., Yalin A. P., Martinelli L., Miles R. B. Shock wave propagation and dispersion in glow discharge plasmas // *Phys. Fluids*, 2001. Vol. 13, no. 9, 2693. 13 pp.
6. Molevich N. E., Klimov A. I., Makaryan V. G. Influence of thermodynamical nonequilibrium on acoustical properties of gases // *Int. J. aeroacoustics*, 2005. Vol. 4, no. 3-4. Pp. 373–384.
7. Макарян В. Г., Молевич Н. Е. Структура газодинамического возмущения в термодинамически неравновесной среде с экспоненциальной моделью релаксации // *Изв. РАН. Мех. жидк. и газа*, 2004. № 5. С. 181–191; англ. пер.: *Makaryan V. G., Molevich N. E. Structure of a gasdynamic disturbance in a thermodynamically nonequilibrium medium with a power-law relaxation model // Fluid Dynamics*, 2004. Vol. 39, no. 5.
8. Макарян В. Г., Молевич Н. Е. Новые стационарные структуры в акустически активной среде // *Письма в ЖТФ*, 2003. Т. 29, № 18. С. 11–15; англ. пер. *Makaryan V. G., Molevich N. E. New stationary structures in an acoustically active medium // Tech. Phys. Lett.*, 2003. Vol. 29, no. 9. Pp. 752–753.
9. Макарян В. Г., Молевич Н. Е. Слабые ударные волны в неравновесных средах с отрицательной дисперсией // *ЖТФ*, 2005. Т. 75, № 6. С. 13–18; англ. пер.: *Makaryan V. G., Molevich N. E. Weak shock waves in negative-dispersion nonequilibrium media // Tech. Phys.*, 2005. Vol. 50, no. 6. Pp. 685–691.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики. Т. 6: Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.; англ. пер.: *Landau L. D. Lifshitz E. M. Course of Theoretical Physics. Vol. 6: Fluid Mechanics. New York: Pergamon*, 1987. 552 pp.
11. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.; англ. пер.: *Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena. New York: Academic*, 1967. 994 pp.
12. Самарский А. А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1982. 272 с. [*Samarskiy A. A. An introduction to numerical methods. Moscow: Nauka*, 1982. 272 pp.]
13. Makaryan V. G., Molevich N. E. Stationary shock waves in nonequilibrium media // *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2007. Vol. 16, no. 1. Pp. 124–131.

Поступила в редакцию 26/VII/2012;  
в окончательном варианте — 21/VIII/2012.

MSC: 76L05

## INTERACTION OF SHOCK WAVES WITH AREA OF THE NON-EQUILIBRIUM IN VIBRATIONALLY EXCITED GAS

*D. I. Zavershinsky, V. G. Makaryan, D. P. Porfirev*

S. P. Korolyov Samara State Aerospace University  
(National Research University),  
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russia.

E-mail: vmak@rambler.ru

*On the basis of numerical solution of the equations of gas dynamics of non-equilibrium medium the penetration of a shock wave in the area of non-equilibrium gas was investigated. The splitting of the shock wave front in a shock and heat waves was observed, it qualitatively coincides with the experimental results, obtained by A.I. Klimov.*

**Key words:** *shock wave, non-equilibrium state, vibrationally excited gas, shock adiabat, heat wave.*

Original article submitted 26/VII/2012;  
revision submitted 21/VIII/2012.

---

*Dmitriy I. Zavershinsky*, Postgraduate Student, Dept. of Physics. *Vladimir G. Makaryan* (Ph.D. (Math. & Phys.)), Associate Professor, Dept. of Physics. *Denis P. Porfirev*, Assistant, Dept. of Physics.