

УДК 533 6.011

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-90-97

ЭФФЕКТ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПЕРЕХЛЁСТА В УДАРНОЙ ВОЛНЕ С ПРЕДЕЛЬНЫМ СЖАТИЕМ

Кузнецов М. М.^{1,2}, Кулешова Ю. Д.¹, Перов А. А.¹, Смотрова Л. В.¹

¹ *Московский государственный областной университет*

141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

Аннотация. Представлены некоторые результаты аналитического исследования поступательной неравновесности в ударной волне. Они были сформулированы ранее в систематических исследованиях авторов. Проанализированы аналитические модели высокоскоростной поступательной неравновесности в бинарных газовых смесях. Рассмотрен эффект высокоскоростного перехлёста в ударной волне с предельным сжатием. Показано, что максимум этого эффекта удовлетворяет принципу независимости от числа Маха.

Ключевые слова: кинетический, уравнение, неравновесный, смесь газов, ударная волна

EFFECT OF HIGH-SPEED OVERSHOOT IN A SHOCK WAVE WITH MAXIMUM COMPRESSION

M. Kuznetsov^{1,2}, Ju. Kuleshova¹, A. Perov¹, L. Smotrova¹

¹ *Moscow Region State University*

ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow region, Russian Federation

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*

Institutskii per. 9, 141701 Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation

Abstract. We report some results of the analytical study of translational nonequilibrium in the shock wave that have been previously formulated in our systematic studies. Analytical models of high-speed translational nonequilibrium in binary gas mixtures are analyzed. The effect of high-speed overshoot in the shock wave with maximum compression is considered. It is shown that the maximum of this effect satisfies the principle of independence of the Mach number.

Keywords: kinetic, equation, nonequilibrium, gas mixture, shock wave

Введение

В настоящее время не существует однозначных конкретных рекомендаций по проектированию эксперимента с ударными волнами, которые давали бы возможность провести оптимально этот эксперимент с учётом сильного влияния высокоскоростной поступательной неравновесности во фронте ударной волны. Такие рекомендации могут быть даны с использованием аналитического подхода к исследованию структуры ударных волн. Этот подход может полезно дополнить численные и полуаналитические методы, применение которых так или иначе ограничено их точностью. Трудности в применении численных методов [1–3], как правило, обусловлены очень малым количеством частиц тяжёлого компонента и высоким порогом активации химических молекулярных и кластерных реакций. Ориентация молекул при соприкосновении была рассмотрена в работах [4–6]. Применение же аналитических методов свободно от этих трудностей.

В работах авторов данной статьи [7–10] ранее был получен ряд существенных результатов:

- 1) необходимое и достаточное условие эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности внутри фронта ударной волны;
- 2) универсальное аналитическое представление коэффициентов скоростей высокопороговых поступательно неравновесных химических реакций, учитывающее анизотропию кинетических температур в ударных волнах.

В данной статье эффект действия первых двух факторов исследуется более детально.

Кроме того, в представленной работе показано, что при числе Маха перед фронтом ударной волны, стремящемся к бесконечности, действие одного из основных законов подобия гиперзвуковых течений – принципа независимости значений макропараметров потока за ударными волнами от числа Маха [11] может быть распространено на максимальную величину эффекта высокоскоростного перехлёста.

Следует подчеркнуть два существенных отличия этого результата от известной теории:

- принцип независимости от числа Маха выполняется внутри фронта ударной волны, а не за ним;
- действие принципа оказывается справедливым и для молекулярной характеристики потока, которой является максимальная величина отношения функции распределения пар молекул внутри волны к такой же величине за волной, а не только для макрохарактеристик потока, как в известной теории.

Справедливости ради, следует отметить, что в известной классической монографии, посвящённой теории гиперзвуковых течений [11], допускалась возможность выполнения принципа независимости от числа Маха внутри структуры ударной волны (см. [11, с. 45]). Однако конкретных примеров не было приведено.

Независимость от числа Маха свободного потока максимальной относительной величины функции распределения пар молекул в однокомпонентном ударно сжатом газе

В ударных волнах с бинарными смесями газов различают три различные функции: $G^{(ll)}$, $G^{(lh)}$, $G^{(hh)}$. Ими являются функции распределения пар молекул по модулю относительной скорости. Функция $G^{(ll)}$ – относится к распределению пар молекул внутри лёгкого компонента. Функция $G^{(lh)}$ – относится к паре молекул из лёгкого и тяжёлого компонента, а функция $G^{(hh)}$ – к парам молекул тяжёлого компонента [12].

Эволюция распределения пар молекул $G^{(ll)}$ практически не отличается от соответствующей функции пар молекул в однокомпонентном газе. Она имеет максимум $G_{\max}^{(ll)}$ внутри фронта ударной волны. Этот максимум $G_{\max}^{(ll)}$ равен:

$$G_{\max}^{(ll)} \cong \varepsilon \exp\left(\frac{1}{2\varepsilon}\right). \quad (1)$$

Здесь ε^{-1} – степень сжатия в ударной волне, причём $\varepsilon = \rho_{\infty}/\rho_s$, где ρ_{∞} – величина плотности газа перед скачком, а ρ_s – величина плотности газа за ним, $\tilde{G}_{\max}^{(ll)} = G_{\max}^{(ll)} / G_s^{(ll)}$.

Формула (1) получена асимптотически при $\varepsilon = \rho_{\infty}/\rho_s \rightarrow 0$.

Важно отметить, что эффект перехлёста, то есть отношение $\tilde{G}_{\max}^{(ll)} = G_{\max}^{(ll)} / G_s^{(ll)}$, (где $G_s^{(ll)}$ – равновесная функция распределения пар молекул за скачком), зависит только от степени сжатия в скачке ε^{-1} .

Этот факт не был отмечен в численных исследованиях и демонстрирует полезность аналитических методов исследования при определении величины $G_{\max}^{(ll)}$. Таким образом, мы видим, что закону гиперзвуковой стабилизации, то есть зависимости макропараметров течения за скачком уплотнения лишь от степени сжатия ε^{-1} , подчиняются не только газодинамические макропараметры (температура, скорость, плотность потока газа), но и параметры молекулярной кинетики, в частности отношение $G_{\max}^{(ll)}/G_s^{(ll)}$ (микропараметр течения). Значения функции $G_{\max}^{(ll)}$, задаваемые формулой (1), приведены в табл. 1 для различных значений параметров γ или ε , причём $\varepsilon = \frac{\gamma-1}{\gamma+1}$.

Таблица 1.

Максимум «перехлёста» $\tilde{G}_{\max}^{(ll)}$ в сверхзвуковом потоке

Газ	(A)	(A ₂), без учёта колебательных степеней свободы молекулы	(A ₂), с учётом колебательных степеней свободы молекулы	(A ₃), с учётом вращательных и колебательных степеней свободы молекул	C ₈ H ₁₆
γ	5/3	7/5	9/7	7/6	22/21
ε	1/4	1/6	1/8	1/13	1/43
$G_{\max}^{(ll)}$	1,31	2.37	4,84	36/28	$3,6 \times 10^8$

Здесь символом A обозначен сорт молекул газов с различным количеством атомов. Так, символами (A) , (A_2) , (A_3) обозначены молекулы, соответственно, одноатомных, двухатомных и трёхатомных газов. В последнем столбце таблицы приведены величины параметров γ и ϵ многоатомной молекулы C_8H_{16} .

Численные значения функции $\tilde{G}_{\max}^{(ll)}$, приведённые в табл. 1, свидетельствуют о том, что она очень быстро (экспоненциально) возрастает с относительно небольшим изменением параметра ϵ . Для практического использования эффекта перехлёста данной функции, а также его наблюдения, необходимо, как показывает эксперимент, чтобы его величина была порядка 10^4 и больше. Мы видим, что такому требованию соответствуют только данные последнего столбца табл. 1. В связи с этим возникает вопрос о возможности возбуждения необходимого числа степеней свободы многоатомной молекулы на толщине скачка уплотнения. Отметим те возможные случаи, когда такое возбуждение успеваеет произойти. К первому случаю относится предварительное возбуждение необходимого числа колебательных степеней свободы перед фронтом ударной волны. Ко второму случаю относится реализация эффекта высокоскоростного перехлёста в рэлеевской смеси газа, соответствующим образом подобранными компонентами этой смеси. Необходимо, чтобы на длинах выравнивания (длинах релаксации) температуры и скоростей тяжёлого и лёгкого компонентов в лёгком многоатомном компоненте (типа NH_3) успевало возбудиться необходимое число колебаний. К такой смеси можно отнести, например, 99% NH_3 – 1% C_{70} или рэлеевскую смесь в кластерном термояде.

Независимость от числа Маха свободного потока максимальной относительной величины функции распределения пар молекул в сильно диспергированных по концентрации ударно сжатых газовых смесях

Функции распределения пар компонент $\tilde{G}^{(ll)}$ (лёгкого компонента) и $\tilde{G}^{(lh)}$ (лёгко-тяжёлого компонента) обнаруживают при своей эволюции внутри фронта ударной волны эффект высокоскоростного «перехлёста», количественно близкий к соответствующему эффекту в однокомпонентном газе. Наиболее сильный эффект наблюдается для функции $\tilde{G}^{(hh)}$ (тяжёлого компонента).

Можно показать, что усиление эффекта «перехлёста» у тяжёлого компонента связано с тем, что мода $\tilde{G}_{01}^{(hh)}$ содержит в показателе экспоненты отношение массы тяжёлого компонента к равновесной температуре газа за ударной волной, определяемой преобладанием лёгкого компонента в смеси газов [12].

Для рэлеевской смеси при значительном преобладании концентрации n_l лёгкого компонента над концентрацией n_h тяжёлого компонента, например, в случае неравенства $10 < n_l/n_h < 10^4$, нетрудно рассчитать максимум эффекта высокоскоростного перехлёста по аналогии с расчётом, сделанным ранее для простого газа [7; 13]. Для максимального значения функции распределения пар тяжёлого компонента смеси $\tilde{G}^{(hh)}$, когда отношение массы молекулы тяжёлого

компонента m_h к массе молекулы лёгкого компонента m_l равно двум и четырём, можно составить следующую таблицу (см. табл. 2).

Таблица 2.
Максимум «перехлёста» G_{\max} в сверхзвуковом потоке

Gas	$m_h/m_l = 2$			$m_h/m_l = 4$		
	A	(A2) линейная молекула без учёта колеб. степ. свободы	(A2) Линейная молекула с учётом колеб. степ. свободы	A	(A2) линейная молекула без учёта колеб. степ. свободы	(A2) Линейная молекула с учётом колеб. степ. свободы
γ	5/3	7/5	9/7	5/3	7/5	9/7
ε	1/4	1/6	1/8	1/4	1/6	1/8
$\tilde{G}_{\max} = \varepsilon(h, h)$	1.86	2.8	11.7	3,1	3,9	119

Из табл. 2 наглядно следует, что как увеличение числа возбужденных внутренних степеней свободы преобладающего лёгкого носителя (приводящего к уменьшению параметра ε), так и уменьшение его молекулярной массы (приводящее к возрастанию величины отношения m_h/m_l), ведут к возрастанию величины высокоскоростного перехлёста \tilde{G}_{\max} .

Заметим, что возможность данного аналитического рассмотрения эффекта перехлёста в тяжёлом компоненте рэлеевского газа, сильно разбавленного лёгким многоатомным компонентом с внутренними степенями свободы, была ранее обоснована результатами численных расчётов в работе [14].

Заключение

Представленные в данной работе результаты аналитического исследования высокоскоростной поступательной неравновесности в ударной волне могут оказаться полезными для проведения газодинамического эксперимента. Такие эксперименты могут включать начальную стадию процессов поступательно-неравновесного пиролиза, в которых число Маха свободного потока часто достигает значения $M = 3$ и более. Как раз со значения $M = 3$ течение газа принято считать гиперзвуковым [11], что позволяет воспользоваться аналитическими преимуществами гиперзвуковой теории для оптимального планирования эксперимента в ударных трубах.

Статья поступила в редакцию 09.08.2019 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ №17-07-00-945А.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ для молодых учёных – кандидатов наук МК-3120.2018.9.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 17-07-00-945A) and the RF President's Grant Council (State Support of Young Russian Scientists (Candidates of Sciences) Program, Grant No. МК-3120.2018.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Chausov D. N. Interaction of dyes CD-1 and SD-1 with the surface of oligodimethylsiloxane // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 996. Iss. 1. P. 012019.
2. Dependence of Mesogen Molecules Interaction Energy on their Mutual Orientation / Chausov D. N., Dadivanyan A. K., Noah O. V., Belyaev V. V. // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. 2015. Vol. 611. Iss. 1. P. 21–26.
3. Structure and physicochemical properties of thin film photoconductor cells based on porphine derivatives / Kazak A. V., Usoltseva N. V., Smirnova A. I., Bodnarchuk V. V., Sul'yanov S. N., Yablonskii S. V. // *Crystallography Reports*. 2016. Vol. 61. Iss 3. P. 493–498.
4. Спектральная фотосенсибилизация оптической анизотропии в твердотельных пленках поли (винилциннамата) / Козенков В. М., Спахов А. А., Беляев В. В., Чаусов Д. Н., Чигринов В. Г. // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 4. С. 592–596.
5. Spectral photosensitization of optical anisotropy in poly(vinyl cinnamate) solid films / Kozenkov V.M., Spakhov A.A., Belyaev V.V., Chausov D.N., Chausova O.V., Chigrinov V.G. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 867. P. 012039.
6. Самоорганизация азокрасителя КД-2 в плавающих слоях и пленках Ленгмюра-Шеффера / Казак А. В., Жукова Л. Н., Ковалева М. И., Чаусов Д. Н., Кузнецов М. М., Габдулсадыкова Г. Ф. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2018. Т. 18. № 3. С. 74–81.
7. Кузнецов М. М., Кулешова Ю. Д., Смотрова Л. В. Эффект высокоскоростной поступательной неравновесности в бимодальной ударной волне // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*. 2012. № 2. С. 108–115.
8. Kuznetsov M. M., Kuleshova Yu. D. Increase in rates of Kinetic Processes inside the Bimodal Hypersonic Shock Wave // *Heat Transfer Research*. 2012. Vol. 43. Iss. 3. P. 228–236.
9. Кузнецов М. М., Смотрова Л. В. Аналитические свойства эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика*. 2013. № 3. С. 66–73.
10. Analytical properties of nonequilibrium threshold in shock waves / Kuznetsov M. M., Kuleshova Ju. D., Reshetnikova Yu. G., Smotrova L. V. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 996. P. 012006 [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/996/1/012006/pdf> (дата обращения: 27.07.2019).
11. Хейз У. Д., Пробстин Р. Ф. Теория гиперзвуковых течений. М.: Издательство Иностранной литературы, 1962. 607 с.
12. Высокоскоростная поступательная неравновесность смеси газов в аналитической модели ударной волны / Кузнецов М. М., Матвеев С. В., Молоствовин Е. В., Решетникова Ю. Г., Смотрова Л. В. // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2016. Т. 17. Вып. 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2016-17-1/articles/613/> (дата обращения: 27.07.2019).
13. О максимуме эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности в ударной волне / Кузнецов М. М., Кулешова Ю. Д., Решетникова Ю. Г., Смотрова Л. В. // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика* 2016. № 3. С. 84–95.

14. Shock waves in Gas Mixtures with Internal Energy Relaxation / Ching Shen, Zhenhua Hu, Wanquan Wu, Xiaoyan Xu // *Rarefied gas dynamics: Proceedings of the 17th International Symposium (Aachen, Germany, July 8–14, 1990)* / ed. by A. E. Beylich. Weinheim, Germany and New York: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1991. P. 247–254.

REFERENCES

1. Chausov D. N. Interaction of dyes CD–1 and SD–1 with the surface of oligodimethylsiloxane. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 996, iss. 1, pp. 012019.
2. Chausov D. N., Dadivanyan A. K., Noah O. V., Belyaev V. V. Dependence of mesogen molecules interaction energy on their mutual orientation. In: *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, 2015, vol. 611, iss. 1, pp. 21–26.
3. Kazak A. V., Usoltseva N. V., Smirnova A. I., Bodnarchuk V. V., Sul'yanov S. N., Yablonskii S. V. Structure and physicochemical properties of thin film photoconductor cells based on porphine derivatives. In: *Crystallography Reports*, 2016, vol. 61, iss 3, pp. 493–498.
4. Kozenkov V. M., Spakhov A. A., Belyaev V. V., Chausov D. N., Chigrinov V. G. [Spectral photosensitization of optical anisotropy in solid poly(vinyl cinnamate) films]. In: *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Technical Physics], 2018, vol. 88, no. 4, pp. 592–596.
5. Kozenkov V.M., Spakhov A.A., Belyaev V.V., Chausov D.N., Chausova O.V., Chigrinov V.G. Spectral photosensitization of optical anisotropy in poly(vinyl cinnamate) solid films. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 867, pp. 012039.
6. Kazak A. V., Zhukova L. N., Kovaleva M. I., Chausov D. N., Kuznetsov M. M., Gabdulsadykova G. F. [Self-organization of azo dye kd-2 in floating layers and Langmuir-Schaefer films]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application. Russian Journal], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 74–81.
7. Kuznetsov M. M., Kuleshova Yu. D., Smotrova L. V. [On the increase in the kinetic processes rates in the Tamm–Mott–Smith shock wave model]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2012, no. 2, pp. 108–115.
8. Kuznetsov M. M., Kuleshova Yu. D. Increase in rates of kinetic processes inside the bimodal hypersonic shock wave. In: *Heat Transfer Research*, 2012, vol. 43, iss. 3, pp. 228–236.
9. Kuznetsov M. M., Smotrova L. V. [Analytical qualities of high velocity translational non-equilibrium in the shock wave]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2013, no. 3, pp. 66–73.
10. Kuznetsov M. M., Kuleshova Ju. D., Reshetnikova Yu. G., Smotrova L. V. Analytical properties of nonequilibrium threshold in shock waves. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 996, pp. 012006. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/996/1/012006/pdf> (accessed: 27.07.2019).
11. Hayes W. D., *Probstein R. F. Hypersonic Flow Theory*. New York, London, Avad. Press, 1959.
12. Kuznetsov M. M., Kuleshova Yu. D., Reshetnikova Yu. G., Smotrova L. V. [On the maximum effect of high translational nonequilibrium in the shock wave]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2016, no. 3, pp. 84–95.
13. Ching Shen, Zhenhua Hu, Wanquan Wu, Xiaoyan Xu. Shock waves in gas mixtures with internal energy relaxation. In: Beylich A. E., ed. *Rarefied gas dynamics: Proceedings of the 17th International Symposium (Aachen, Germany, July 8–14, 1990)*. Weinheim, Germany and New York, VCH Verlagsgesellschaft mbH Publ., 1991. pp. 247–254.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Михаил Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета; доцент кафедры общей физики Московского физико-технического института (национального исследовательского университета); e-mail: kuznets-omn@yandex.ru;

Кулешова Юлия Дмитриевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей алгебры, элементарной математики и методики преподавания математики Московского государственного областного университета; e-mail: juliaybogdanova@mail.ru;

Перов Александр Алексеевич – аспирант кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета; e-mail: xok91.91@mail.ru;

Смотрова Лилия Владимировна – аспирант кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета; e-mail: lilysmotrova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mihail M. Kuznetsov – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University; Associate Professor at the Department of General Physics, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University); e-mail: kuznets-omn@yandex.ru;

Julia D. Kuleshova – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Higher Algebra, Elementary Mathematics and Methods of Teaching Mathematics, Moscow Region State University; e-mail: juliaybogdanova@mail.ru;

Aleksandr A. Perov – postgraduate student at the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University; e-mail: xok91.91@mail.ru;

Liliya V. Smotrova – postgraduate student at the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University; e-mail: lilysmotrova@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Кузнецов М. М., Кулешова Ю. Д., Перов А. А., Смотрова Л. В. Эффект высокоскоростного перехлёста в ударной волне с предельным сжатием // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика–математика. 2019. № 3. С. 90–97.
DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-90-97

FOR CITATION

Kuznetsov M. M., Kuleshova Ju. D., Perov A. A., Smotrova L. V. Effect of high-speed overshoot in a shock wave with maximum compression. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics.* 2019, no. 3, pp. 90–97.
DOI: 10.18384-2310-7251-2019-3-90-97