

Проекционный метод численного решения кинетического уравнения Больцмана позволил провести моделирование течений диффузии и теплового скольжения, занявшее порядка $2 \cdot 10^5$ временных итераций. Это подтверждает эффективность его применения и для расчета медленных течений.

1. Черемисин Ф. Г. Решение кинетического уравнения Больцмана для высокоскоростных течений // ЖВМ и МФ. — 2006. — Т. 46, № 2. — С. 329–343.
2. Клосс Ю. Ю., Мартынов Д. В., Черемисин Ф. Г. Численный метод анализа свойств микронасоса Кнудсена // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 12.
3. Takata S., Umetsu H. Numerical study on effective configurations of the knudsen pump for separation and compression // AIP Conference Proceedings. — 2011. — V. 1333, No. 1. — P. 998–1003.
4. Sugimoto H., Shinotou A. Gas separator with the thermal transpiration in a rarefied gas // AIP Conference Proceedings. — 2011. — V. 1333, No. 1. — P. 784–789.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

О. И. Додулад¹, Ф. Г. Черемисин², Г. С. Колядко³, Е. П. Дербачева¹

¹МФТИ, Долгопрудный, Московская обл., Россия; ²ВЦ РАН, Москва, Россия;
³НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе исследована структура ударной волны на основе решения кинетического уравнения Больцмана относительно функции распределения по скоростям. Интеграл столкновений Больцмана рассчитывается консервативным проекционным методом [1].

Основное внимание в работе уделено функции распределения молекул по скорости в ударной волне. Расчеты были проведены в диапазоне чисел Маха от $M = 1,1$ до $M = 20$, рассмотрены молекулярная модель твердых сфер и Леннард-Джонса.

На рис. 1 представлено сравнение рассчитанной функции распределения в центре слабой ударной волны с функцией в приближении Энского-Чепмена. Сплошной линией показаны разница рассчитанной функции и локальной максвелловской, пунктирной линией — функция первого приближения Энского-Чепмена. Для чисел Маха близких к единице наблюдается хорошее совпадение приближения с расчетом, для $M = 1,6$ отличие становится существенным. Результаты расчетов на основе другого прямого численного метода решения уравнения Больцмана [2] согласуются с результатами настоящей работы.

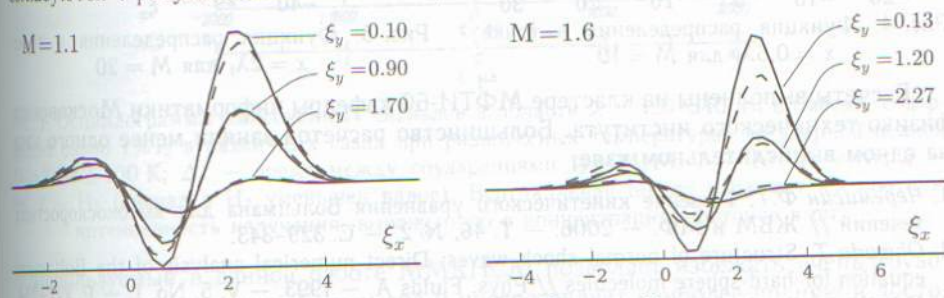


Рис. 1. Сравнение с разложением Энского-Чепмена

На рис. 2 отображены продольные сечения функции распределения при числе Маха $M = 3$ для потенциалов твердых сфер и Леннард-Джонса. На рис. 3 показана

ны приведенные макропараметры газа при $M = 7$, а также величина

$$Q_R(x, g_R) = \int \int \int g H(g - g_R) b db d\epsilon d^3\xi d^3\xi_1,$$

характеризующая число столкновений с энергией больше пороговой, величина порога определяется g_R , $g_R = 3,5\sqrt{kT_2/m}$, $H(x)$ — функция Хевисайда.

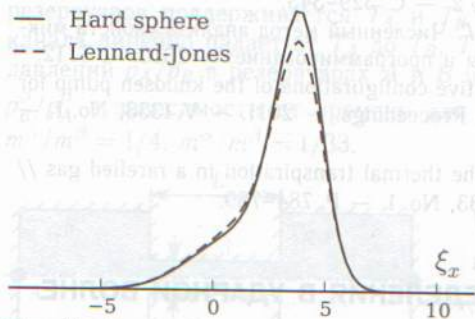


Рис. 2. Функция распределения в точке $x = 0,6\lambda_1$ для $M = 3$

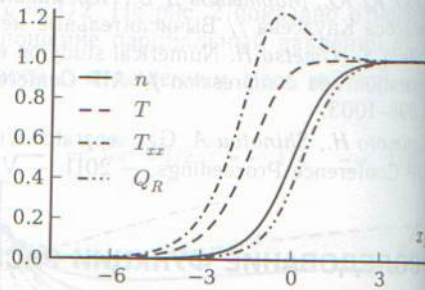


Рис. 3. Приведенные макропараметры газа и функционал Q_R в зависимости от продольной координаты для $M = 7$

Функции распределения для сильной ударной волны $M = 10$, $M = 20$ показаны на рисунках 4 и 5. Наблюдается острый максимум, относящийся к холодному газу, который проникает внутрь ударной волны. Качественно функция распределения соответствует анализу ударных волн бесконечной интенсивности в работах [3, 4].

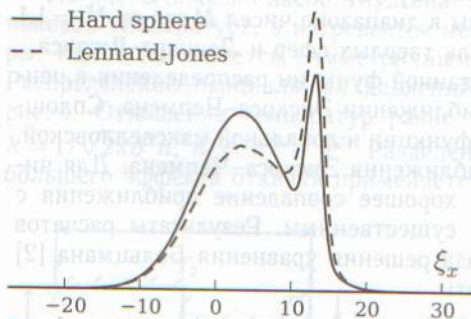


Рис. 4. Функция распределения в точке $x = 0,6\lambda_1$ для $M = 10$

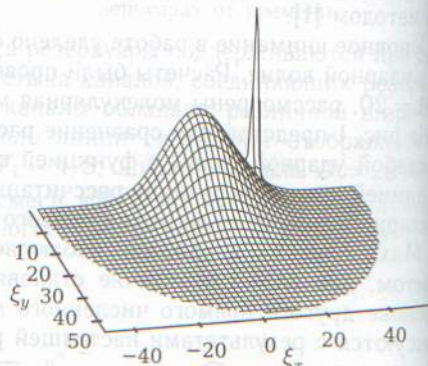


Рис. 5. Функция распределения в точке $x = 2\lambda_1$ для $M = 20$

Расчеты выполнены на кластере МФТИ-60 кафедры информатики Московского физико-технического института. Большинство расчетов заняли менее одного часа на одном вычислительном узле.

1. Черемисин Ф. Г. Решение кинетического уравнения Больцмана для высокоскоростных течений // ЖВМ и МФ. — 2006. — Т. 46, № 2. — С. 329–343.
2. Ohwada T. Structure of normal shock waves: Direct numerical analysis of the Boltzmann equation for hard-sphere molecules // Phys. Fluids A. — 1993. — V. 5, No. 1. — P. 217–227.
3. Cercignani C., Frezzotti A., Grosfils P. The structure of an infinitely strong shock wave // Physics of Fluids. — 1999. — V. 11, No. 9. — P. 2757–2764.
4. Takata S., Aoki K., Cercignani C. The velocity distribution function in an infinitely strong shock wave // Physics of Fluids. — 2000. — V. 12, No. 8. — P. 2116–2127.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

А. И.

ИИВТ РАН, Москва

Метод Монте-Карло (или direct simulation) применен при моделировании ударной волны при числе Маха УВ такой системы [2, 3] во фронте УВ и было показано, что эффект обусловленный столкновением молекул I_2 между собой и с ней исключены вторичные столкновения исходных молекул, вызывающих эффект ионизации, а также, менее, в силу чрезвычайной скорости в фронте ударной волны, являлись косвенными. В результате уравнения Больцмана для функции распределения функций распределения априорно грубым образом, резко возрастают и функции распределения, являющиеся функциями оставалась определенной.

Рис. 1. Осциллограмма сигнала с датчика, регистрирующего интенсивность излучения около 1% I_2 в фронте ударной волны. $T_2 = 2100 \pm 100$ К; $\Delta t = 10$ нс. 4 — H_2 (сигнал с датчика, регистрирующего интенсивность излучения).

Используемый метод является эффективным решением уравнения Больцмана, предоставляя верную информацию о структуре течения разреженного газа, каждая из