

**Моделирование нестационарных течений с ударными волнами в узком канале**Д.В. Замиуская<sup>1,2</sup>, Ю.Ю. Клосс<sup>1,2</sup>, Ф.Г. Черемисин<sup>1,3</sup>, А.В. Сакмаров<sup>2</sup>, О.К. Шайхатаров<sup>2</sup><sup>1</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН

В работе изучается нестационарное течение разреженного газа в узких каналах, сопровождающееся формированием и распространением ударных волн. Рассматриваются процессы формирования ударной волны из начального разрыва параметров газа, ее распространения, затухания и отражения от торца канала. Расчет процесса распространения ударной волны ведется на основе решения кинетического уравнения Больцмана[1]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\xi} \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} = I(\vec{\xi}, \vec{x}, t)$$

Рассматривается одноатомный газ, не обладающий внутренними степенями свободы молекул, интеграл столкновений имеет классический вид:

$$I(\vec{\xi}, \vec{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{b_{max}} (f'f'_1 - ff_1) gbdbd\epsilon d\vec{\xi}$$

Геометрически моделируемая ударная труба однородна и в начальный момент времени разделена непроницаемой перегородкой на два отсека, условно названных толкающей и измерительной секциями. Давление в толкающей секции в начальный момент времени в 10 раз больше, чем в измерительной, температуры в двух секциях одинаковы.

На стенках сосудов задано условие полной аккомодации с диффузным отражением молекул, имеющих максвелловскую функцию распределения по скоростям. Распад начального разрыва давления при резком удалении перегородки создает ударную волну, которая движется внутри измерительной секции. В работе рассматривается двумерное плоское течение, что соответствует течению в щели.

Для описания пространственной геометрии задачи используется прямоугольная равномерная сетка. Параметры газа  $n(\vec{x}, t)$ ,  $T(\vec{x}, t)$  вычисляются при помощи численного интегрирования по скоростной векторной переменной  $\vec{\xi} = \frac{\vec{p}}{m}$  молекулярной функции распределения  $f(\vec{\xi}, \vec{x}, t)$ , которая находится из конечно-разностного решения кинетического уравнения Больцмана[2].

Пространственный перенос (левая часть уравнения Больцмана) рассчитывается с помощью TVD - схемы с диффузными граничными условиями на стенках секций, интеграл столкновений рассчитывается консервативным проекционным методом для молекулярной модели жестких сфер[3].

Вычисления проводятся в безразмерных величинах. Плотность газа и температура нормируются на их значения в измерительной секции в начальный момент времени, скорость газа нормируется на характерную скорость, рассчитываемую индивидуально для каждого конкретного газа.

На данном этапе работы полностью реализована левая часть уравнения Больцмана и подключен модуль интеграла столкновений, получены распределение температуры и плотности вдоль оси симметрии канала. Проверено выполнение закона сохранения массы, что является необходимым условием для получения корректных выходных данных. В дальнейшем планируется

оптимизировать программу для ускорения ее работы и перейти от одного газа в ударной трубе к смеси газов и изучению протекающих там эффектов.

### Литература

- 1) *Коган, М.Н.* Динамика разреженного газа. – М.: Наука, 1967. 440 с.
- 2) *Аникин, Ю.А.* Введение в основы разностных методов на примере уравнения газовой адвекции. – М., 2007. 47 с.
- 3) *Черемисин, Ф.Г.* Консервативный метод вычисления интеграла столкновений Больцмана // Доклады РАН. 1997. Т. 357, 1, с. 53-56.