Бучина О.Н., студентка
Породнов Б. Т., проф., д-р физ.-мат. наук

# СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В последнее время увеличился интерес к поиску эффективных методов расчета газодинамических характеристик в усложненных конструкциях различных элементов вакуумных систем. Разработка формирователей газовых потоков в перспективных изотопных и примесных масс-спектрометрах, например с точки зрения увеличения эффективности их работы, является важной прикладной задачей. Решение подобного рода задач для сложных конструкций вакуумных систем ограниченных линейных размеров основано обычно на применении метода прямых статистических испытаний (метод Монте-Карло). В случае протяженных систем применение данного метода затруднено, прежде всего из-за резкого увеличения машинного времени, а следовательно, и увеличения погрешности получаемых расчетных данных. Поэтому применение для решения подобного типа задач традиционных методов, основанных на использовании интегрального уравнения Клаузинга, оказывается более предпочтительным.

Известно, что в свободномолекулярном режиме течения из стационарного кинетического уравнения Больцмана следует, что функция распределения частиц по скоростям сохраняется вдоль траектории её полета с безразмерной скоростью $\mathbf{c} = c \cdot \mathbf{\Omega}$. Значение этой функции $f(\mathbf{r})$ в точке $\mathbf{r}$ физического пространства определяется её значением $f(\mathbf{r}_0)$ на площадке старта с радиус-вектором $\mathbf{r}_0$. При полностью диффузном рассеянии частиц на граничных поверхностях функцию распределения в нормализованном виде, а также связь между элементами объемов скоростного и физического пространств можно записать в виде:

$$f(\mathbf{r}) = [\,\nu(\mathbf{r})/\pi^{3/2}\,] \cdot \exp(-c^2), \quad \mathbf{dc} = c^2 dc\,\mathbf{d\Omega}, \quad \mathbf{dr}_0 = s_0^2\,\mathbf{d\Omega} : \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{\Omega} .$$

Здесь $\mathbf{r}_0$ определяет положение площадки с нормальным единичным вектором $\mathbf{n}_0$ в точке $M_0$ ; $\mathbf{d\Omega} = \sin\theta d\theta d\varphi$ – элемент телесного угла, под которым видна площадка из точки наблюдения в $M(\mathbf{r})$; $\nu(\mathbf{r})$ - плотность столкновений в точке $\mathbf{r}$, определяемая из уравнения баланса падающих и отраженных частиц на поверхности (уравнение Клаузинга) вида:

$$\nu(\mathbf{r}) = \nu(\mathbf{r}_0) + \quad \nu(\mathbf{r}_0) \cdot K(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)\, \mathbf{dr}_0\,, \qquad K(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = [\cos\theta \cdot \cos\theta_0\,] : (\pi\, s_0^2) .$$

Данное уравнение является интегральным уравнением Фредгольма второго рода с симметричным ядром $K(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$, определяемым геометрией задачи, и решается вариационным методом Ритца в двух последовательных приближениях, которых, как показывает практика, оказывается досточно для расчета.

Если воспользоваться решением уравнения Клаузинга, перейти от интегрирования в пространстве безразмерных скоростей к интегрированию в физическом пространстве при кинетическом определении газодинамических параметров, возможно вычислить распределение плотности, макроскопической скорости, температуры и давления в любой точке поля течения как внутри, так и вне канала с произвольными геометрическими характеристиками. Первые результаты показывают возможность получения аналитических результатов практически для произвольных элементов вакуумных систем.