

## Моделирование течения газа в проточной части комбинированного турбомолекулярного насоса с дисковой ступенью

Ю.А. Шостак, Н.К. Никулин  
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5  
E-mail: [shostak.uliya@yandex.ru](mailto:shostak.uliya@yandex.ru)

Представлена математическая модель течения газа в торцовом зазоре дискового вакуумного насоса в молекулярном режиме течения газа. Расчет основан на использовании метода Монте Карло (методе пробной частицы). Математические зависимости позволяют проследить траекторию молекулы от момента старта с поверхности входа до выхода из зазора и вычислить вероятности прямого и обратного перехода молекул газа через торцовый зазор между вращающимся и неподвижным диском. Взаимодействие молекул газа с поверхностью дисков описывается диффузным законом отражения при коэффициенте аккомодации равном единице, распределение молекул по скоростям теплового движения описывается законом Максвелла. Представленная модель позволяет определить проводимость зазора, величину потока перетеканий через зазор и максимальный перепад давлений на уплотнении при нулевом потоке перетеканий. В результате расчётов установлено влияние геометрических параметров зазора и скорости вращения дисков на проводимость зазора.

**Simulating of the gasflow in the flowing part of a hybrid turbomolecular pump with a disk stage. J. A. Shostak, N. K. Nikulin.** In all high-vacuum mechanical pumps, namely molecular and turbo-molecular there is a need in sealing of inputs of the movement. A dynamic seals type is widely applied in modern industry. Protective properties and optimization of the dynamic seals at the stage of design become a relevant topic to be researched. The aim of the work is to develop a mathematical model of gas flow in the face gap between two rotating disks. In building this model, the following assumptions are introduced: molecular gas flow, full exchange of momentum in collisions of molecules with disk surface, reflection of particles from the wall submits to the law of diffuse reflection, distribution of gas molecules according to the thermal motion speeds described by Maxwell's law. The calculation is based on the use of the Monte Carlo method (method of test particle), which consists in the statistical modeling of processes. The article describes an algorithm to construct a mathematical model step by step. The trajectory of each molecule movement is traced from the moment of its moving in till its moving out of the system. The article defines both a probability for gas molecules to pass through the face gap of disk vacuum pump in forward and backward direction and a conductivity of the gap. A numerical experiment based on the developed program has been conducted with considering the movement of the required number of molecules to provide a sufficient accuracy of calculation. Gas flow in the face gap of disk vacuum pump is studied. As a result of the experiment it was found that geometrical parameters of the gap and speed of disk rotation have an impact on the conductivity. With raising speed of disk rotation the probability for particles to pass in forward direction increases, accordingly increasing the conductivity, and for particles to pass in backward direction it decreases thereby improving the vacuum properties of the pump. The work carries out a process adequacy test based on the equality of the conductivity of the forward and reverse passages with disks being stationary. The accuracy does not exceed a tolerance. Results and, accordingly, recommendations, given in the article, can be used in designing a flow passage.

В работе расчет основан на использовании метода Монте-Карло (метода пробной частицы), заключающийся в статистическом моделировании физических процессов.

При моделировании процесса течения газа в канале между турбомолекулярной и молекулярной ступенью комбинированного ТМН приняты следующие допущения:

- молекулярный режим течения газа;
- отражение частиц от стенок системы подчиняется диффузному закону;
- положение старта молекул на входе системы равновероятное;
- коэффициент аккомодации энергии равен единице;

- изотермический процесс;
- распределение молекул газа по скоростям теплового движения подчиняется закону Максвелла.

Проводимость канала в прямом направлении (от последнего колеса ТМН к входу в молекулярную ступень) определяется соотношением:

$$U_{12} = k_{12} \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{\text{вых}} \cdot \vartheta_{\text{ср}}$$

Проводимость канала в обратном направлении определяется уравнением:

$$U_{21} = k_{21} \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{\text{вых}} \cdot \vartheta_{\text{ср}}$$

где  $F_{\text{вх}}$  – площадь поверхности входа;

$F_{\text{вых}}$  – площадь поверхности выхода;

$k_{12}$  – вероятность прямого прохода молекул газа сквозь канал;

$k_{21}$  – вероятность перехода в обратном направлении;

$\vartheta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$  – средняя скорость теплового движения молекул.

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$M$  – молярная масса рабочего газа ( в работе - азот);

$T$  – температура газа (293 К).

### 1.1. Выбор расчетной схемы и ввод начальных параметров системы

Для моделирования течения газа в канале между турбомолекулярной и молекулярной ступенями гибридного ТМН применяется расчетная схема, представленная на рис. 2.

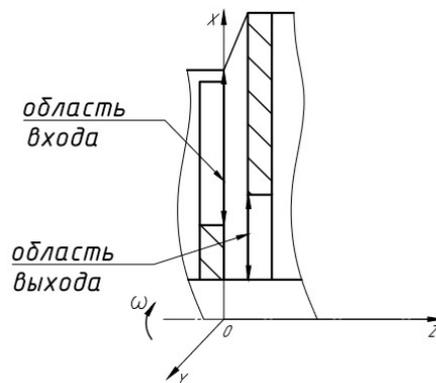


Рис. 1. Расчетная схема процесса движения молекул газа в канале.

Течение газа моделируется в канале между двумя дисками. Роторный диск закреплен на валу. Вал вращается с угловой скоростью  $\omega$ . Второй диск является статорным и фиксируется на корпусной поверхности. В продольном направлении исследуемый канал ограничен конической поверхностью корпуса насоса, как показано на рис. 1.

На рис. 1 приведены основные геометрические параметры рассматриваемой системы. Роторный и статорный диски, радиуса  $R_1$  и  $R_2$  соответственно, расположены на расстоянии  $\delta$  друг от друга. Роторный диск зафиксирован на валу, радиуса  $R_0$ , а статорный на корпусной цилиндрической поверхности, как показано на рис. 1.

## 1.2. Координаты точки старта молекулы

Для определения вероятностей рассматривается  $N$  молекул, прослеживается их движение с момента старта с поверхности входа в систему до момента выхода из нее. Число молекул  $N$  выбирается, исходя из желаемой точности расчета.

Область старта представляет собой кольцевую плоскую поверхность, как показано на рис. 4. В начальный момент времени для однозначного определения положения молекулы задаются координаты точки старта. Координатами точки входа частицы в кольцевое входное отверстие (рис. 4) являются угол  $\alpha_{ст}$  и радиус  $r_{ст}$ . Для обеспечения равновероятного входа молекул по всей площади необходимо, чтобы угол  $\alpha_{ст}$  был равномерно распределен в интервале от 0 до  $2\pi$ . Генерация датчиком случайных чисел, равномерно распределенных в интервале от 0 до 1, случайного числа  $\xi$  [0,1], получаем случайный угол  $\alpha_{ст}$ . Аналогично разыгрывается величина случайного радиуса  $r_{ст}$ .

$$\alpha_{ст} = 2\pi\xi;$$

$$r_{ст} = \sqrt{\xi(R_{вх}^2 - R_{вн}^2) + R_{вн}^2}, \text{ где}$$

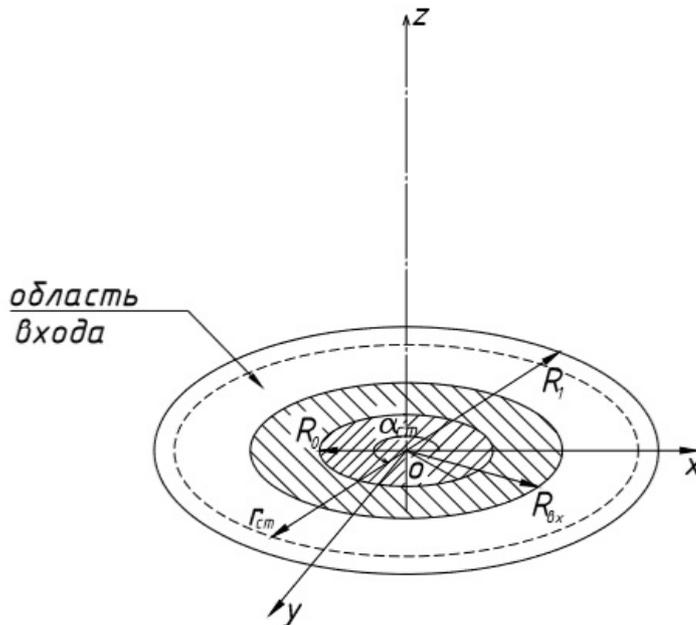


Рис. 2. Поверхность входа и координаты старта молекул.

## 1.3. Направление полета молекулы

Направление вектора скорости частицы  $\vec{v}$  однозначно задается двумя углами  $\varphi$  и  $\theta$  (рис. 5). Угол  $\varphi$  образовывается между горизонталью и проекцией вектора скорости на плоскость  $ХОУ$ . Угол  $\theta$  образуется между вектором нормали  $\vec{n}$  и вектором скорости  $\vec{v}$ . В соответствии с диффузным законом распределения случайный угол  $\varphi$ , равномерно распределенный в интервале от 0 до  $2\pi$ , определяется следующим соотношением:

$$\varphi = 2\pi\xi.$$

Значение угла  $\theta$  равновероятно распределено в интервале от 0 до  $\pi/2$  и разыгрывается следующим образом:

$$\theta = \arcsin\sqrt{\xi}.$$

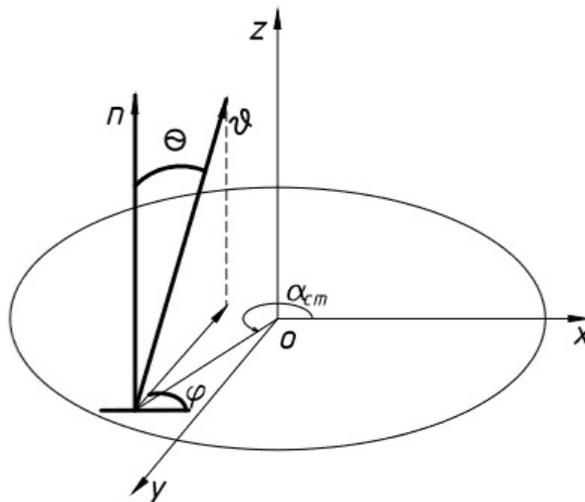


Рис. 3. Направление полета молекулы.

Траектория полета молекулы, ввиду условий молекулярного режима течения, представляет собой прямую линию, которая может быть задана системой параметрических уравнений:

$$\begin{aligned}x_{\text{пр}} &= x_{\text{ст}} + l_c t; \\y_{\text{пр}} &= y_{\text{ст}} + m_c t; \\z_{\text{пр}} &= z_{\text{ст}} + n_c t,\end{aligned}$$

где  $x_{\text{ст}}, y_{\text{ст}}, z_{\text{ст}}$  - координаты точки старта молекулы;

$l_c, m_c, n_c$  - направляющие косинусы;

$t$  - параметр (длина траектории молекулы между двумя столкновениями);

$x_{\text{пр}}, y_{\text{пр}}, z_{\text{пр}}$  - координаты точки «посадки» молекулы.

Выбор направления полета частицы зависит от ряда параметров и условий. Необходимо принимать во внимание положение точки вылета молекулы в пространстве, тип поверхности вылета, величины углов направления  $\varphi$  и  $\theta$ , влияние вращения подвижных поверхностей.

В исследуемом канале возможен старт молекулы с поверхностями трех типов: плоскость (поверхности дисков), цилиндрическая (поверхность вала) и коническая (поверхность корпуса). При старте молекулы с каждой из поверхностей необходимо учитывать положение той или иной поверхности в глобальной системе координат и учесть углы наклона касательной плоскости к глобальным осям.

Движение каждой молекулы рассматривается и моделируется от момента входа молекулы газа в систему до выхода из нее.

На рис. 4 приведен алгоритм программы расчета вероятности прохождения молекул газа сквозь канал в прямом направлении  $k_{12}$ , представленный в виде блок-схемы.

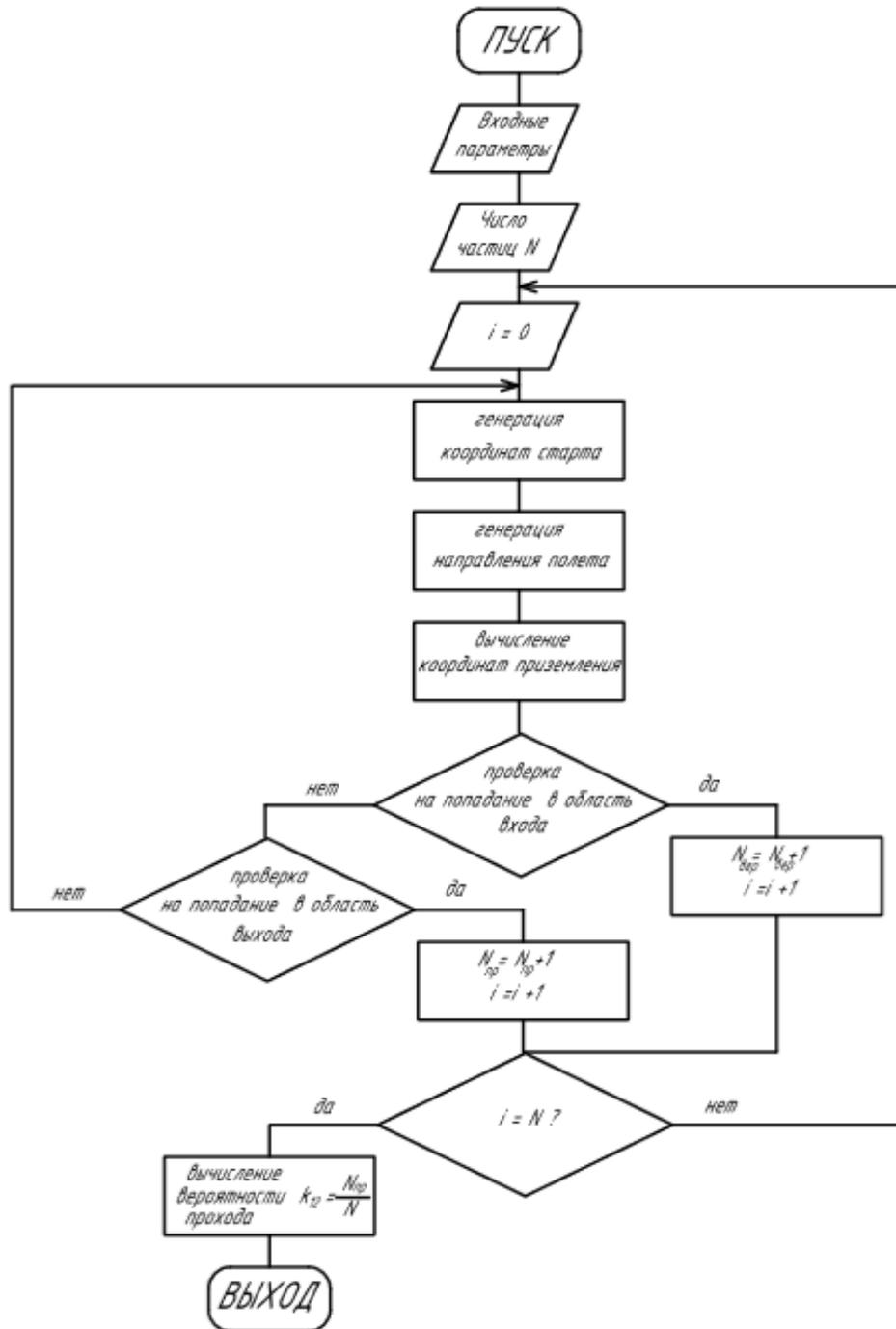


Рис. 4. Блок-схема программы расчета вероятности прохода  $k_{12}$  в прямом направлении.

Численный эксперимент проводится для выбранного общего числа молекул  $N_{\text{общ}}$ . Организованными счетчиками фиксируется количество молекул, прошедших сквозь канал  $N_{\text{пр}}$  и число молекул, вернувшихся на вход в систему  $N_{\text{вер}}$ .

Вероятность прямого прохода молекул газа сквозь канал вычисляется следующим образом:

$$k_{12} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{общ}}}$$

$N_{\text{пр}}$  — число молекул прошедших сквозь канал в прямом направлении;

$N_{\text{общ}}$  — общее число молекул.

Далее вычисляется проводимость канала в прямом направлении (от последнего колеса ТМН к входу в молекулярную ступень) из приведенного выше соотношения:

$$U_{12} = k_{12} \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{\text{вх}} \cdot \vartheta_{\text{ср}}$$

Вероятность обратного прохода молекул газа сквозь канал вычисляется следующим образом:

$$k_{21} = \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{общ}}}$$

$N_{\text{пр}}$  – число молекул прошедших сквозь канал в обратном направлении;

$N_{\text{общ}}$  – общее число молекул.

Проводимость канала в обратном направлении определяется приведенным выше уравнением:

$$U_{21} = k_{21} \cdot \frac{1}{4} \cdot F_{\text{вх}} \cdot \vartheta_{\text{ср}}$$

## Моделирование течения многокомпонентного газа через систему нитей различной температуры

*А.Н. Якунчиков, В.В. Косьянчук*

*Москва, Механико-математический ф-т МГУ им. М.В.Ломоносова;*

*Москва, Институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова;*

*Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*

*E-mail: [art-ya@mail.ru](mailto:art-ya@mail.ru)*

*В работе исследована плоская задача о переходном течении ( $Kn=0.1-10$ ) смеси инертных газов в системе, состоящей из нескольких рядов натянутых нитей, имеющих различную температуру. Рассмотрено две постановки задачи: (1) о равновесии, которое вырабатывается в закрытой системе, и (2) об истечении многокомпонентной смеси в вакуум через систему нитей. Расчеты проводились методом событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD). Показано, что под действием перепада температур возникает эффект разделения смеси, который можно усиливать, увеличивая количество ступеней (рядов нитей). Кроме этого, в закрытой системе возникает перепад давления (реализуется эффект насоса Кнудсена).*

***Simulation of multicomponent gas flow through a system of filaments having different temperatures.*** *A.N. Yakunchikov, V.V. Kosyanchuk.* *The paper deals with the plane problem of the transition flow ( $Kn = 0.1-10$ ) of an inert gases mixture in a system consisting of several rows of stretched filaments having different temperatures. Two statements of the problem are considered: (1) the equilibrium that is produced in a closed system and (2) the flow of a multicomponent mixture into vacuum through a system of filaments. The calculations were performed by the method of Event-driven Molecular Dynamics (EDMD). It is shown that the effect of separation of the mixture takes place under the influence of the temperature difference. This effect can be increased by escalating the number of stages (rows of filaments). In addition, a pressure drop occurs in a closed system (the Knudsen pump effect is realized).*

Исследования течений разреженного газа, вызванные перепадом температуры, начались более ста лет назад [1,2]. Этот эффект (в литературе его принято называть эффектом температурной транспирации) был использован Кнудсенем для создания насоса без движущихся час-