

УДК 004.3+621.52

Определение перетеканий газа через торцовый зазор в дисковом вакуумном насосе

Никулин Н. К.¹, Мишустин В. А.¹,
Шостак Ю. А.^{1,*}

[*shostak.uliya@yandex.ru](mailto:shostak.uliya@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

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 расчетов установлено влияние геометрических параметров зазора и скорости вращения дисков на проводимость зазор.

Ключевые слова: уплотнение, вероятность, перетекания, проводимость, математическая модель, метод Монте-Карло, торцовый зазор, скорость

Введение

Перетекания газа в высоковакуумных механических насосах снижает эффективность работы отдельных ступеней и всего насоса [1, 2]. Например, на одной ступени молекулярного дискового насоса, с быстротой действия 10 л/с и теоретическим максимальным отношением давлений $\tau_{\max} = 10^8$, перетекания в 0,001 л/с приводят к снижению $\tau_{\max}$ до 10^4 .

Соответственно, точный расчёт величины перетеканий и учёт влияния рабочих параметров уплотнения при его проектировании позволяет повысить откачные характеристики высоковакуумного насоса.

Исследованию характеристик насосов, вакуумных параметров радиальных и торцовых щелевых каналов посвящается большое число работ. В работах [3 - 6] рассмотрен

расчёт течения газа в переходном режиме течения (число Кнудсена от 0.01) с учётом экспериментальных данных, описывающих взаимодействие газа с поверхностью. В работах [7 - 9] представлены методы расчёта проводимости различной формой сечения каналов в молекулярном режиме течения газа (круглое, прямоугольное, трапецевидное). В данной работе рассматривается течение газа в полости, образованной двумя поверхностями вращающихся дисков с учетом влияния их вращения.

1. Математическая модель процесса течения газа в торцовом зазоре

В данной работе расчет основан на использовании метода Монте-Карло (метода пробной частицы) [10], который заключается в статистическом моделировании процессов.

При моделировании приняты допущения:

- режим течения газа – молекулярный;
- отражение частиц от стенки подчиняется диффузному закону отражения;
- попадание частицы на вход считаем равновероятным;
- коэффициент аккомодации равен единице;
- процесс изотермический;
- распределение молекул газа по скоростям теплового движения описывается законом Максвелла;

Поток газа через торцовый зазор между двумя дисками, элемент уплотнения, рассчитывается как разность прямого и обратного потоков газа, Q_{12} и Q_{21} .

Поток газа в направление откачки равен

$$Q_{12} = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot k_{12} F_{\text{вх}} p_1,$$

поток газа в обратном направлении –

$$Q_{21} = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot k_{21} F_{\text{вых}} p_2.$$

Результирующий поток газа равен

$$Q = Q_{12} - Q_{21} = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot (k_{12} F_{\text{вх}} - k_{21} F_{\text{вых}} \frac{p}{p_1}) \cdot p_1$$

или

$$Q = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot p_1 \cdot (k_{12} F_{\text{вх}} - k_{21} F_{\text{вых}} \tau),$$

где

$$\tau = \frac{p_2}{p_1}.$$

Проводимость торцового зазора в прямом направлении (от центра к периферии) определяется из уравнения

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

Проводимость торцового зазора в обратном направлении определяется из уравнения

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

где k_{12} – вероятность прохождения частиц в прямом направлении (от центра к периферии);

k_{21} – вероятность прохождения частиц в обратном направлении;

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

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

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

R – универсальная газовая постоянная;

M – молярная масса воздуха;

T – температура газа (20°C).

Для моделирования течения газа через торцовый зазор дискового вакуумного насоса была принята расчетная схема, представленная на рис. 1, которая представляет собой совокупность двух дисков статорного и роторного (слева на право), радиуса R_d , расположенных на расстоянии δ друг от друга.

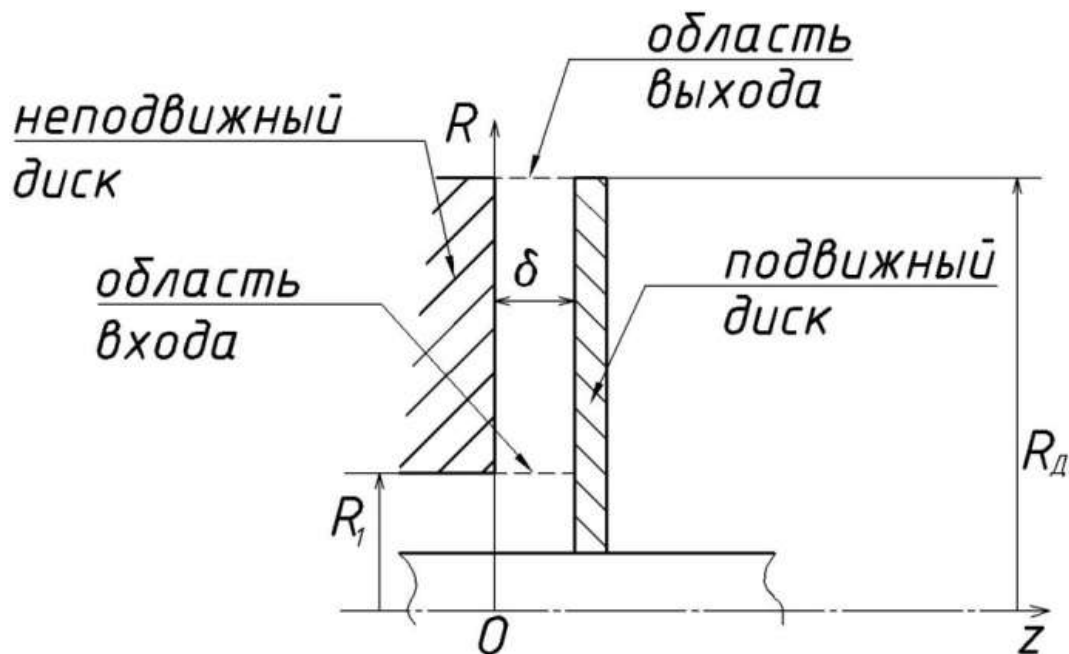


Рис. 1. Расчетная схема процесса движения молекул газа в торцовом зазоре дискового вакуумного насоса.

Для определения вероятностей рассматривается N молекул, прослеживается их движение с момента старта с поверхности входа в систему до момента выхода из нее. Площади поверхностей входа и выхода равны $2\pi R_1 \cdot \delta$ и $2\pi R_d \cdot \delta$ соответственно. Число молекул N выбирается, исходя из желаемой точности расчета. Случайные координаты точки старта определяются величиной $z = \delta \cdot \xi$, где ξ – случайная величина в диапазоне $[0,1]$. Выбираем цилиндрическую систему координат (рис. 2). В плоскости диска цилиндрическими координатами являются радиус точки старта r_n и угол α_n между положительным направле-

нием оси абсцисс и r_n . Угол α_n может принимать любые значения от 0 до 2π , причем равновероятно.

Координаты точки старта выбираются случайным образом с помощью генератора случайных чисел:

$$z = \delta \cdot \xi,$$

$$r_n = R_1,$$

$$\alpha_n = 2\pi\xi.$$

Здесь ξ - случайная величина в диапазоне $[0;1]$, получаемая генератором случайных чисел на ЭВМ.

В силу симметрии можно считать α_n равным нулю.

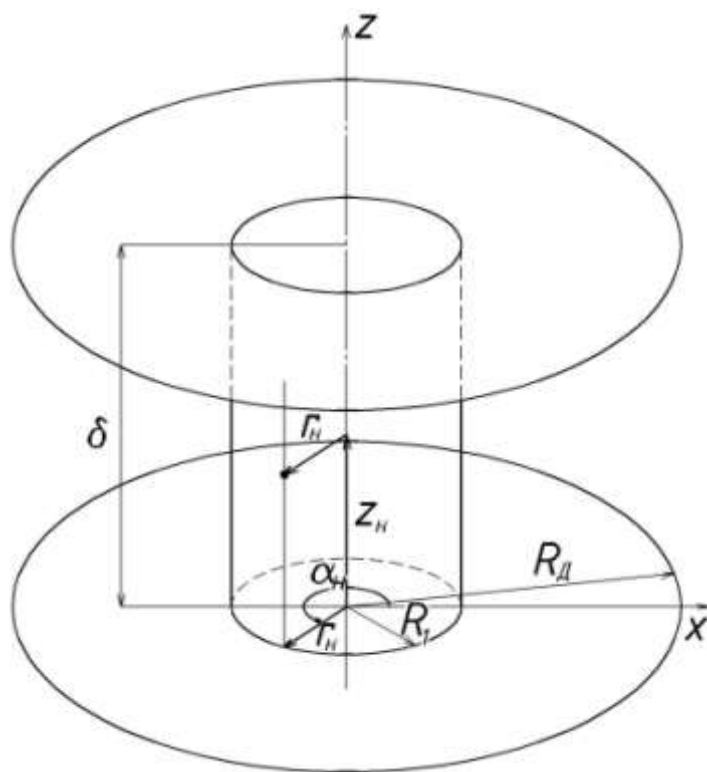


Рис. 2. Поверхность входа и положение старта частицы.

1.1. Направление полета

Траектория движения частицы определяется двумя углами μ и χ (рис.3), χ – угол между вектором траектории молекулы и нормалью к поверхности старта. Угол χ определяется законом диффузного отражения и моделируется случайным числом:

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

Значение угла μ равновероятно распределено в интервале от 0 до 2π и моделируется случайным числом:

$$\mu = 2\pi\xi.$$

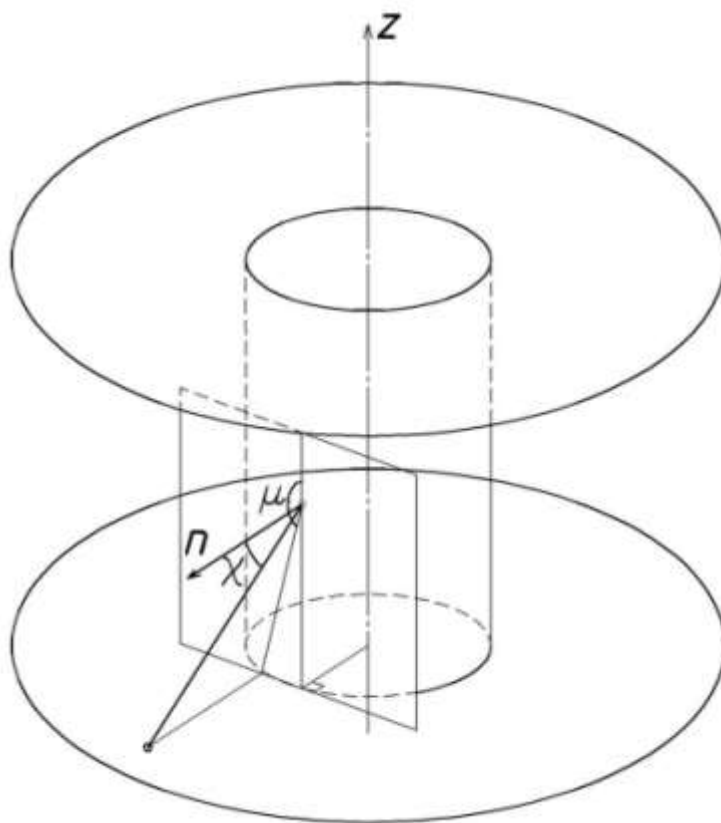


Рис. 3. Направление полета молекулы

1.2. Определение координаты столкновения

На рис. 4 представлена система в изометрии, и обозначен вектор траектории частицы между двумя последовательными столкновениями с поверхностью канала в проекции на плоскость диска, называемый координата столкновения и обозначенный r_k .

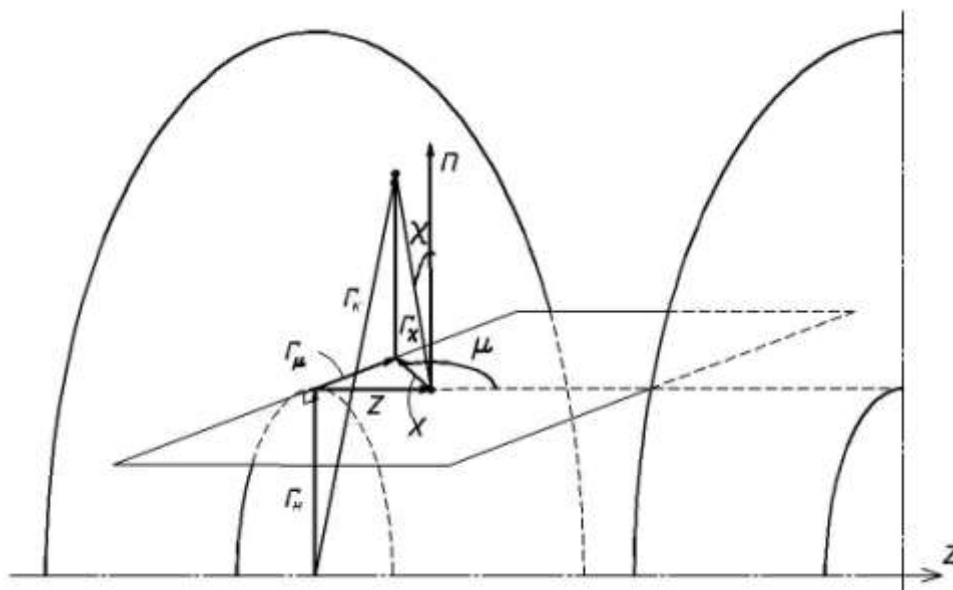


Рис. 4. Определение координаты столкновения.

На рис. 5 представлена проекция системы на плоскость диска.

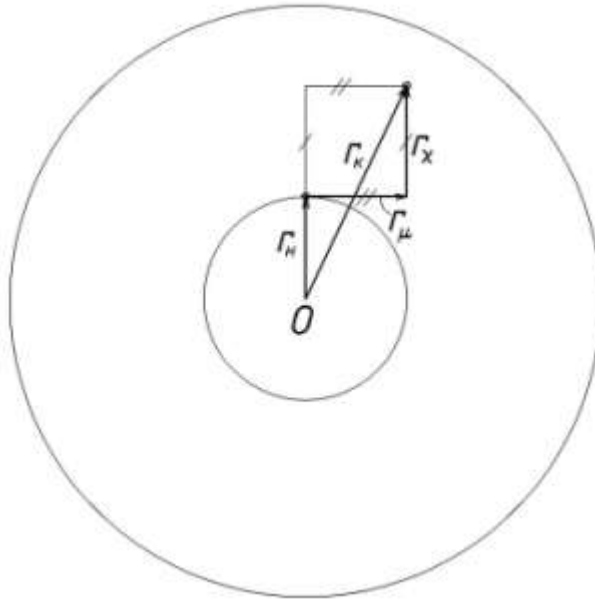


Рис. 5. Определение координаты столкновения в проекции на плоскость диска.

Определим координату столкновения в проекции на плоскость диска

$$r_k = \sqrt{(r_n + r_\chi)^2 + r_\mu^2},$$

где $r_\chi = \frac{x}{tg\mu}$ – проекция длины траектории движения частицы на плоскость старта.

r_μ – проекция длины траектории движения частицы на плоскость старта r_χ на плоскость диска.

$r_\mu = z \cdot tg\mu$, если $90 < \mu \leq 270$ или $r_\mu = (\delta - z) \cdot tg\mu$, в остальных случаях;

$x = \sqrt{z^2 + r_\mu^2}$, если $90 < \mu \leq 270$, в противном случае $x = \sqrt{(\delta - z)^2 + r_\mu^2}$.

Далее выполняя последовательные проверки, определяем, вылетела молекула из системы или осталась в ней, столкнувшись с поверхностью одного из дисков.

В первом случае рассмотрение движения частицы прекращаем, прибавляя ее к числу прошедших сквозь зазор.

Во втором случае происходит столкновение молекулы газа с диском, прослеживая далее ее траекторию, аналогично изложенному выше вновь определяем направление полета частицы.

1.3. Новое направление полета

Поскольку частица, теперь находится в системе и после столкновения стартует уже с поверхности диска, плоскость которого перпендикулярна плоскости первоначального старта частицы (рис. 4), разыгрывается дальнейшее направление полета, задаваемое также двумя углами, но находящимися в других плоскостях. (рис. 6).

Для каждой молекулы определяются следующие параметры: положение старта, заданное положением по оси z ; радиусом r_n , его значение становится равным координате столкновения, угол θ между направлением движения молекулы и осью z (рис.6); угол φ между проекцией вектора направления движения молекулы на плоскость диска (рис.6).

Траектория частицы после вторичного старта определяется аналогично:

$$\varphi = 2\pi\xi,$$

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

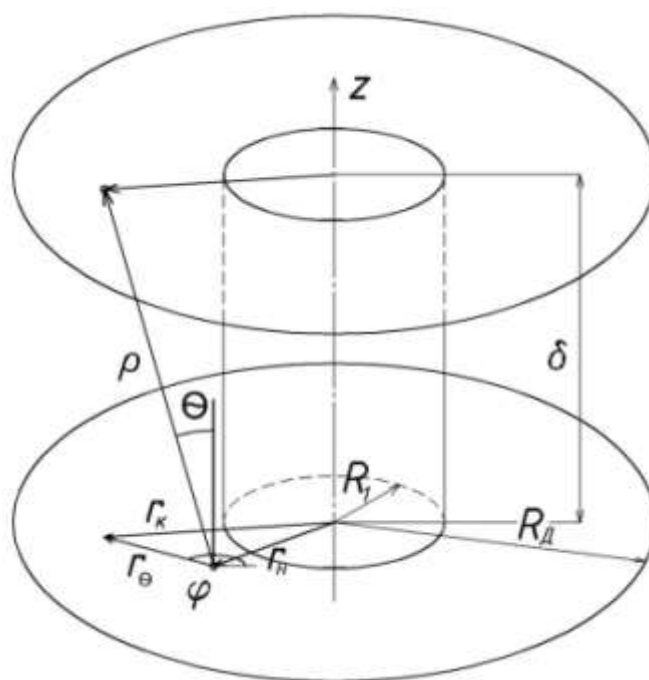


Рис. 6. Определение нового направления движения частицы.

На данном этапе прослежено и описано поведение частицы в следующий период: молекула попала в систему, стартовала с поверхности входа, столкнулась с поверхностью диска и отразилась от нее. Далее снова стоит вопрос, куда же прилетела частица после отражения от поверхности диска? Для этого снова выполняется ряд проверок:

- проверка на попадание частицы в область старта по граничному углу и минимальному расстоянию.
- проверка по координате столкновения.

Рассмотрим, что представляет собой первая проверка.

1.4. Проверка на попадание частицы в область старта

Введем понятие угла ψ - угла между начальным радиусом и касательной к поверхности вала в проекции на плоскость диска, (рис.7,8):

$$\psi = \arcsin \frac{R_1}{r_n}.$$

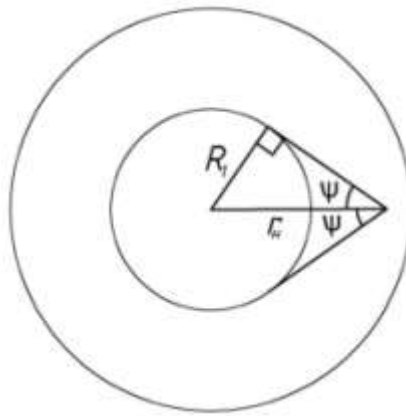


Рис. 7. Определение граничного угла.

Условие попадания в область входа:

$$\begin{cases} \varphi > 180 - \psi, \\ \varphi < 180 + \psi. \end{cases}$$

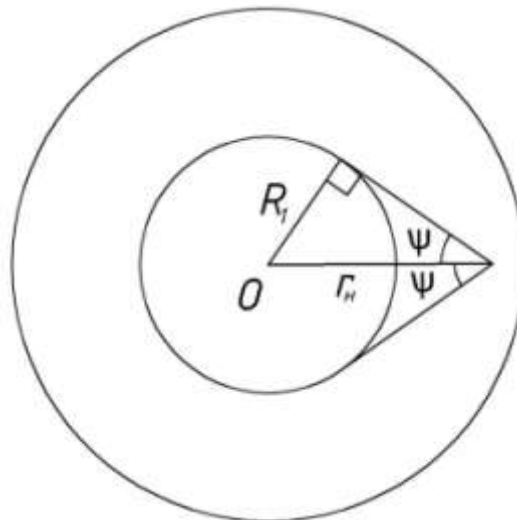


Рис. 8. Условие попадания в область старта по граничному углу.

Если это условие не выполняется, значит, траектория частицы оказалась таковой, что частица столкнется с поверхностью диска. В этом случае следующей будет проверка по координате столкновения r_k . Для этого определим координаты точки столкновения молекулы с диском (r_k, α_k, z) . Т. к. система осесимметрична, было принято, что $\alpha_n = 0$ и $\alpha_k = 0$. В зависимости от столкновения со статорным диском или роторным, координата z принимает значение 0 или δ соответственно.

Определяется координата столкновения r_k . Для этого находим r_θ - проекцию траектории движения частицы ρ на плоскость диска (рис.6):

$$r_\theta = \delta \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Из треугольника образованного траекторией движения частицы (рис. 9.) определяем r_k - расстояние от точки старта до точки столкновения с диском в проекции на плоскость диска:

$$r_k^2 = r_H^2 + r_\theta^2 - 2r_H r_\theta \cos \gamma,$$

$$r_k = \sqrt{r_H^2 + r_\theta^2 - 2r_H r_\theta \cos \gamma}.$$

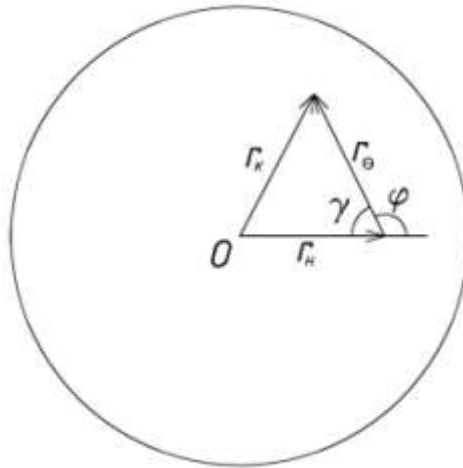
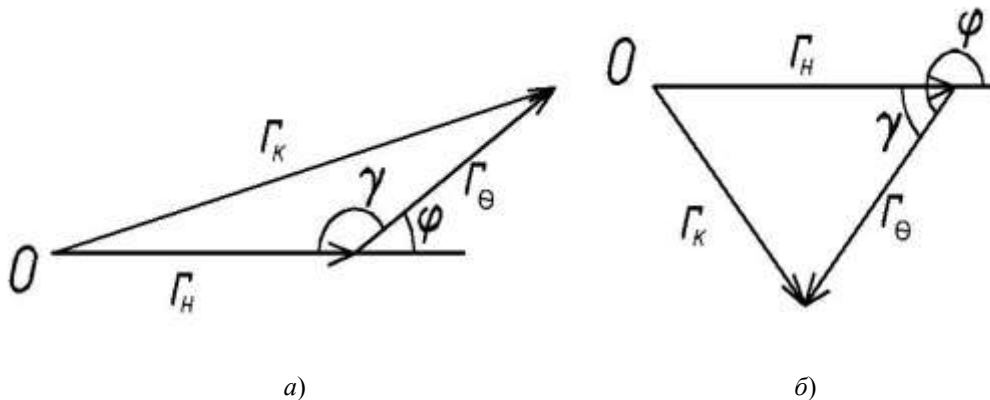


Рис. 9. Проекция траектории движения частицы на плоскость диска.

Угол γ определяется в зависимости от значений углов α_H и φ (рис. 10).



а) $0 < \varphi \leq 180$, $\gamma = 180 - \varphi$; б) $180 < \varphi \leq 360$, $\gamma = \varphi - 180$

Рис. 10. Определение угла γ .

Определив координату столкновения r_k , выполняется проверка по минимальному расстоянию.

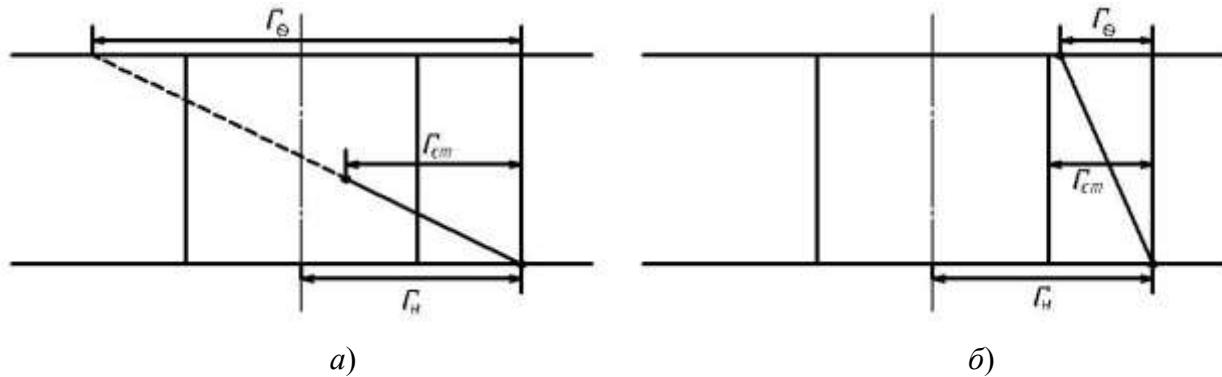
1.5. Проверка по минимальному расстоянию

Движение каждой частицы рассматривается с момента старта с поверхности входа до достижения поверхности выхода или возвращения на поверхность входа. После попа-

дания молекулы газа на поверхность входа или выхода рассматривается движение новой молекулы. Момент достижения выхода определяется по условию $r_k > R_d$, момент возвращения на вход определяется условием $r_k < R_1$.

Теперь рассмотрим случай когда φ попадает в зону входа (равную 2ψ) (рис. 7.)

Возможно два исхода: частица не долетит до области входа и достигнет ее (рис.11)



а) будет попадание в область входа; б) не будет попадания в область входа

Рис. 11. Сравнение $r_{ст}$ и r_{θ} .

Чтобы узнать, будет попадание молекулы в область входа или нет, необходимо сравнить r_{θ} и $r_{ст}$, где r_{θ} - проекция длины траектории между двумя столкновениями, $r_{ст}$ - граничное значение проекции траектории молекулы на поверхность диска, на котором возможно ее столкновение с диском, ограниченное поверхностью входа (при $r_{\theta} > r_{ст}$ молекула вернулась на вход):

$$r_{\theta} = \delta \cdot tg \ .$$

Из треугольника образованного траекторией движения частицы (рис.12) выразим R_1 :

$$R_1^2 = r_n^2 + r_{ст}^2 - r_n r_{ст} \cos \alpha'' \ .$$

Решив квадратное уравнение относительно $r_{ст}$, получим:

$$r_{ст} = r_n \cos \alpha'' \pm \sqrt{r_n^2 \cdot ((\cos \alpha'')^2 - 1) \text{пр} + R_1^2} \ .$$

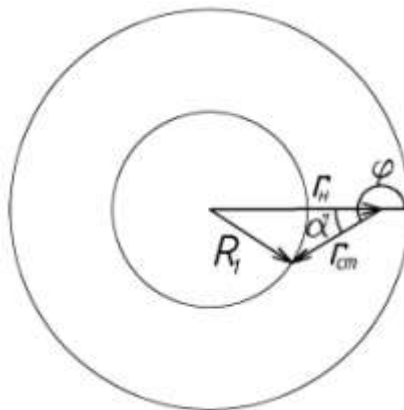
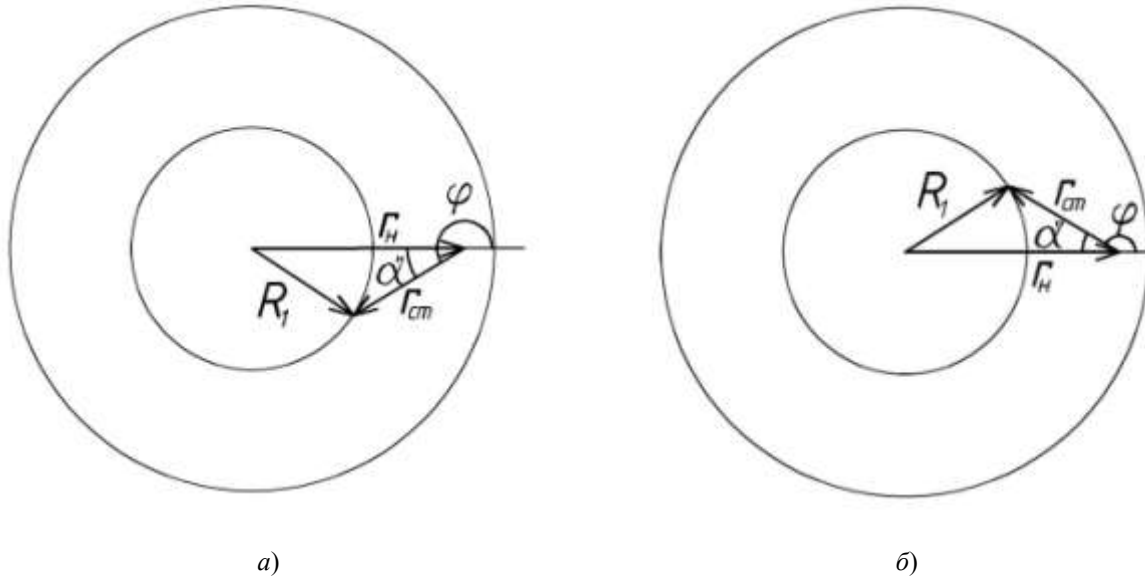


Рис. 12. Определение расстояния от точки старта до поверхности входа в направлении φ .

Реальная область существования одного из корней $r_{ст} = r_n \cos \alpha'' - \sqrt{r_n^2 \cdot ((\cos \alpha'')^2 - 1) + R_0^2}$ определяется областью существования столкновения молекул с поверхностями диска. Величина угла α'' зависит от положения в пространстве треугольника радиусов, как это видно из рис.13. Положение в пространстве треугольника радиусов определяется углом φ .



а) $180 < \varphi < 360, \alpha'' = \varphi - 180$; б) $0 < \varphi < 180, \alpha'' = 180 - \varphi$

Рис. 13. Определение угла α'' .

Если $r_\theta \geq r_{ст}$, то происходит попадание в область входа, рассмотрение траектории молекулы на этом заканчивается и к количеству молекул, вернувшихся на старт, организованным счетчиком прибавляем одну молекулу.

Если $r_\theta \leq r_{ст}$, то частица ударила о диск и рассмотрение происходит по выше изложенной схеме.

1.6 Влияние вращения дисков на траекторию движения частицы.

Скорость $\vartheta_{ст}$ частицы после столкновения с неподвижной поверхностью (в данном случае с поверхностью диска) равна

$$\vartheta_{ст} = z_i \cdot \vartheta_{наив}.$$

Распределение случайного числа величины скорости теплового движения молекул задается с помощью приближенного соотношения, которое определяет выражение

$$z_i = \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{7} \cdot tg \left(\frac{10}{13} \cdot \pi \cdot \xi - \frac{9}{25} \cdot \pi \right).$$

Наивероятная скорость теплового движения определяется

$$\vartheta_{наив} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

Проекция на плоскость диска скорости частицы v_θ (рис. 14) после столкновения с неподвижным диском вычисляется из выражения

$$v_\theta = v_{ct} \cdot \sin \theta.$$

Скорость вращения диска в точке столкновения равна

$$v_\omega = r_n \cdot \omega,$$

где ω —угловая скорость вращения диск;

$v_1 = v_\theta \cdot \sin \varphi$ —проекция скорости v_θ в перпендикулярном направлении к радиусу;

$v_2 = v_\theta \cdot \cos \varphi$ —проекция скорости v_θ в параллельном направлении к радиусу;

$v_3 = v_1 - v_\omega$ —результатирующая скорость в перпендикулярном направлении к радиусу;

$v_\tau = \sqrt{v_3^2 + v_2^2}$ —результатирующая скорость в плоскости диска.

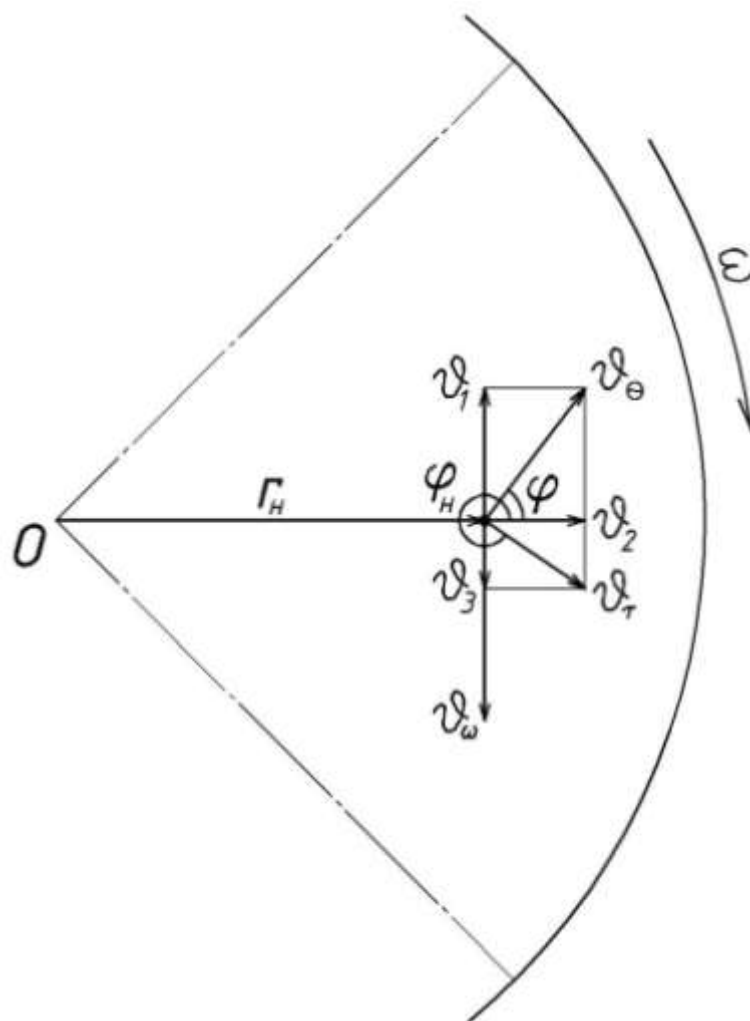


Рис. 14. Положение в пространстве треугольника скоростей при столкновении частицы с поверхностью диска.

Направление полета с учетом влияния скорости вращения диска:

$$\varphi_n = \arctg\left(\vartheta_3/\vartheta_2\right), \text{ если } \vartheta_2 \geq 0; \vartheta_3 \geq 0.$$

$$\varphi_n = 2\pi - \arctg\left(\vartheta_3/\vartheta_2\right) - \text{ если } \vartheta_2 \geq 0; \vartheta_3 < 0.$$

$$\varphi_n = \pi - \arctg\left(\vartheta_3/\vartheta_2\right) - \text{ если } \vartheta_2 < 0; \vartheta_3 \geq 0.$$

$$\varphi_n = \pi + \arctg\left(\vartheta_3/\vartheta_2\right) - \text{ если } \vartheta_2 < 0; \vartheta_3 < 0.$$

$\vartheta_n = \vartheta_{\text{ст}} \cdot \cos\theta$ – результирующая скорость перпендикулярно плоскости диска.

Угол между траекторией движения молекулы и нормалью к поверхности диска с учетом влияния скорости вращения диска (рис. 15):

$$\theta_n = \arctg\left(\frac{\vartheta_\tau}{\vartheta_n}\right).$$

ϑ' – абсолютная скорость частицы (с учетом влияния скорости вращения диска).

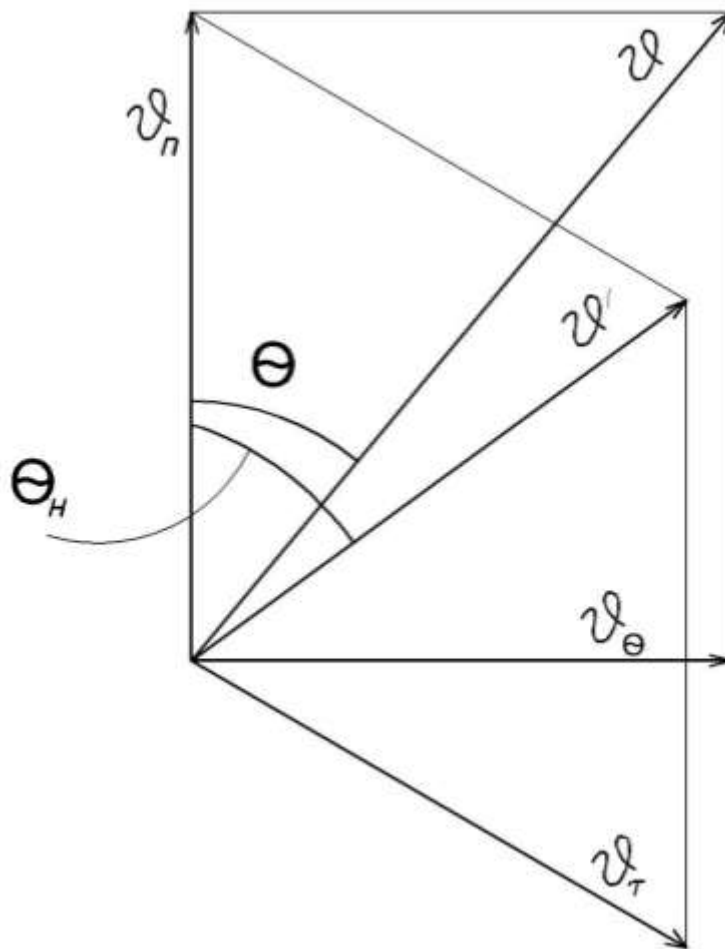


Рис. 15 Влияние скорости вращения диска на угол θ .

1.7 Вычисление вероятности обратного прохода.

Расчетная схема остается прежней, а поверхность входа и выхода меняются местами относительно прямой задачи (рис. 16).

Для каждой молекулы аналогично определяются следующие параметры:

- положение старта, заданное радиусом r_n , углом α_n и z .
- траектория движения частицы определяется двумя углами μ и χ .

Угол χ определяется законом диффузного отражения и моделируется случайным числом:

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

Значение угла μ равномерно распределено в интервале от 0 до 2π и моделируется случайным числом:

$$\mu = 2\pi\xi.$$

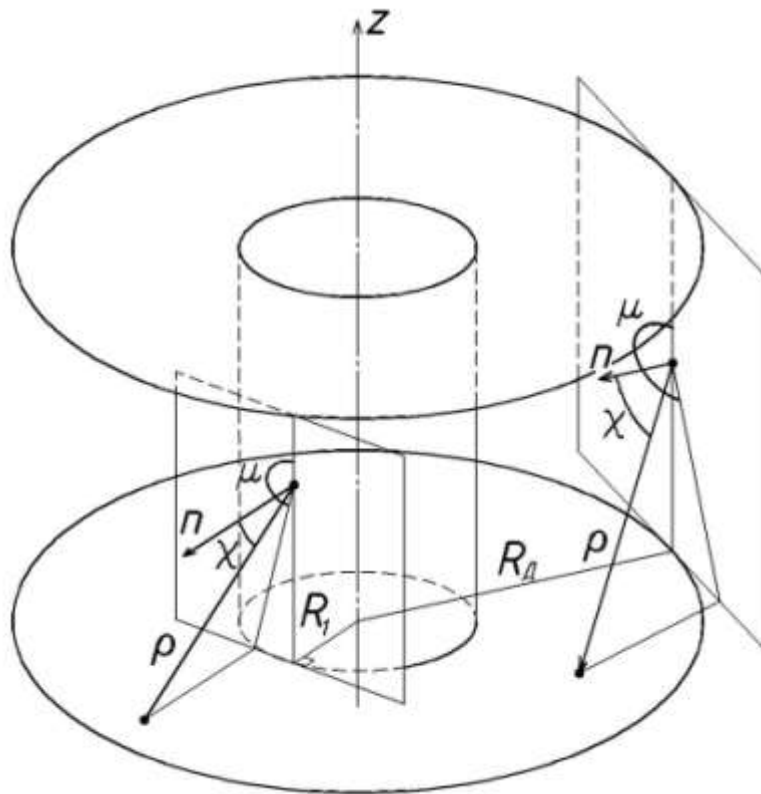


Рис. 16. Определение направления движения молекулы.

Для дальнейшего использования всех зависимостей, полученных для расчета вероятности прямого прохода, вводим функциональные зависимости φ_c и θ_c , определяющие углы аналогичные φ и θ , но до столкновения частицы с поверхностью диска, а не при испускании молекулы с поверхности диска:

$$\varphi_c = f(\mu, \chi)$$

$$\theta_c = f(\mu, \chi)$$

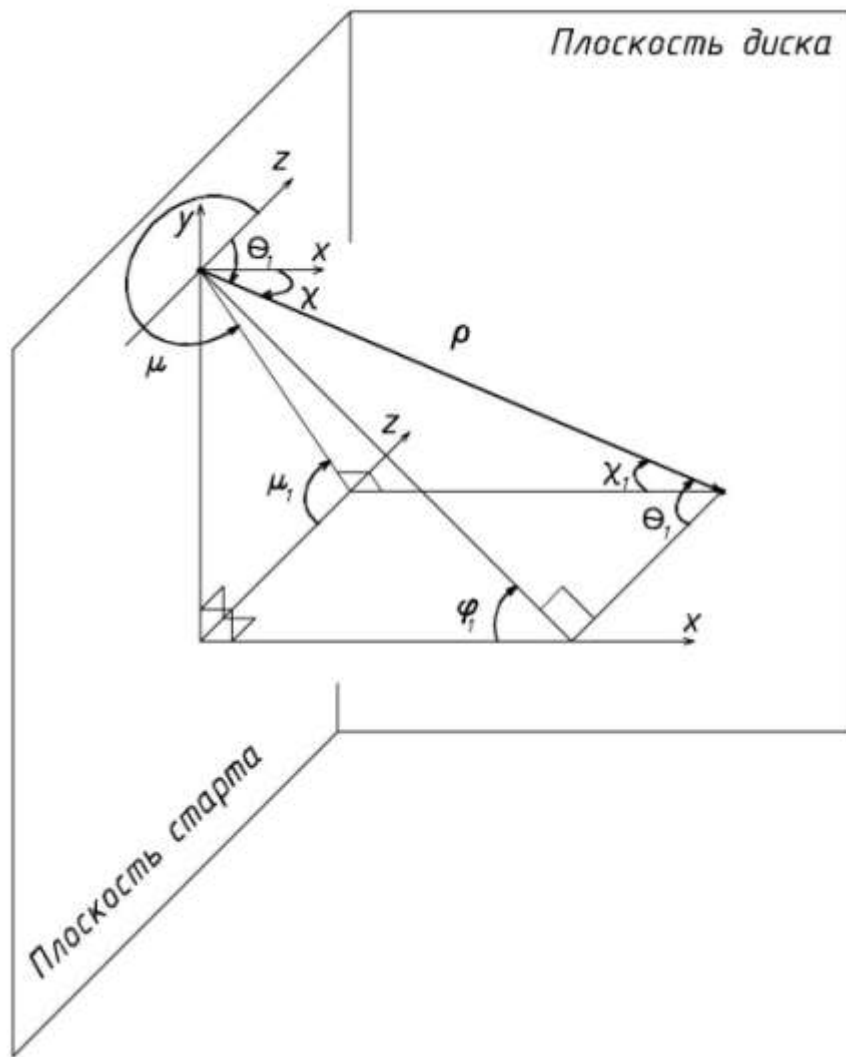


Рис. 17. Получение зависимостей $\varphi_c = f(\mu, \chi)$ и $\theta_1 = f(\mu, \chi)$.

Определить зависимость можно при помощи следующих формул:

$$\sin \mu = \frac{OB}{AO}, \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{OB}{BD}; \operatorname{tg} \chi = \frac{AO}{AC}; \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{OB}{BD}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{OB}{BD}, \operatorname{tg} \chi = \frac{AO}{AC};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{OB}{BD} = \frac{AO \cdot \sin \mu}{AC} = \frac{\operatorname{tg} \chi \cdot \sin \mu \cdot AC}{AC} = \operatorname{tg} \chi \cdot \sin \mu;$$

$$\varphi_1 = \arctg(\operatorname{tg} \chi \cdot \sin \mu)$$

$$\varphi_c = \pi - \varphi_1$$

$$\varphi_c = \pi - \arctg(\operatorname{tg} \chi \cdot \sin \mu)$$

Получим зависимость $\theta = f(\mu, \chi)$.

$$\cos \theta = \frac{CD}{OC}, \sin \chi = \frac{AO}{OC}, \cos \mu = \frac{AB}{AO}$$

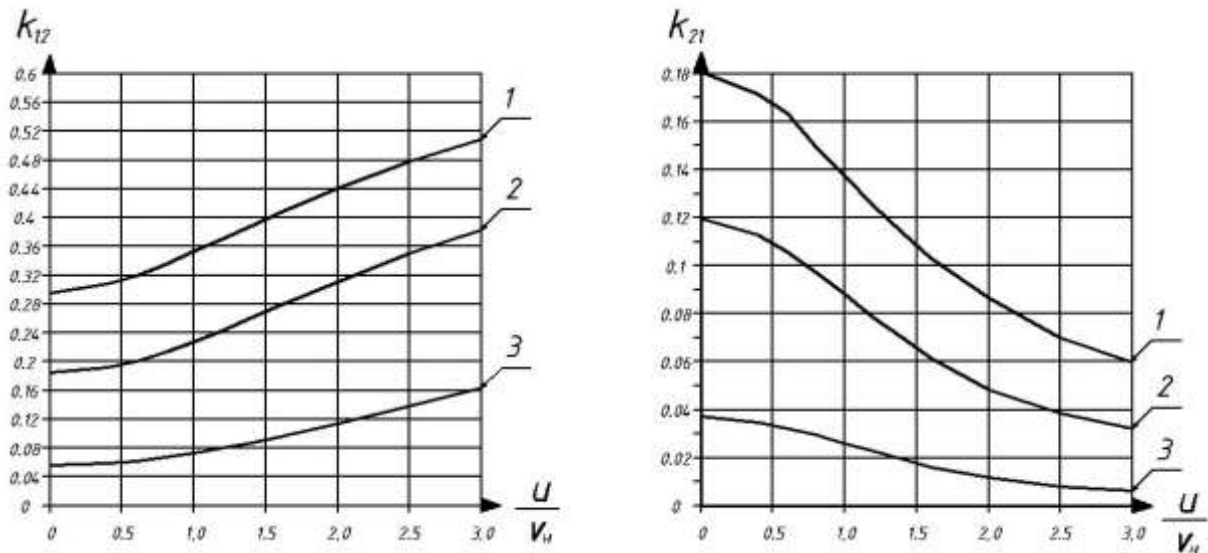
$$\cos\theta = \frac{CD \cdot \sin\chi}{AO} = \frac{CD \cdot \sin\chi \cdot \cos\mu}{AB} = \sin\chi \cdot \cos\mu$$

$$\theta = \arccos(\sin\chi \cdot \cos\mu)$$

2. Результаты испытаний

В результате испытаний были получены следующие зависимости вероятностей прямого и обратного прохода от ряда представленных параметров. Испытания проводились для соотношения радиусов входа и выхода $\frac{R_1}{R_d} = \frac{7}{11}$.

Влияние скоростей вращения подвижных поверхностей в долях от наивероятной скорости теплового движения $k = f(\frac{U}{V_n})$ при трех фиксированных значениях параметра канала (ширины зазора к длине канала) $\frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.1; 0.05; 0.01$ и окружной скорости вращения на периферии диска равной $U = V_n$ представлено на рис. 18.



$$1 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.1; 2 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.05; 3 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.01.$$

Рис. 18. Влияние скорости вращения дисков на вероятность прохода молекул газа сквозь торцовый зазор в прямом и обратном направлении.

С увеличением скорости вращения подвижной поверхности вероятность прохода молекул газа сквозь зазор возрастает в прямом направлении и убывает в обратном. Откачные свойства насоса улучшаются.

Влияние параметра канала $\frac{\delta}{R_d - R_1}$ при трех фиксированных значениях $\frac{U}{V_n} = 0; 1; 3$ представлено на рис. 19.

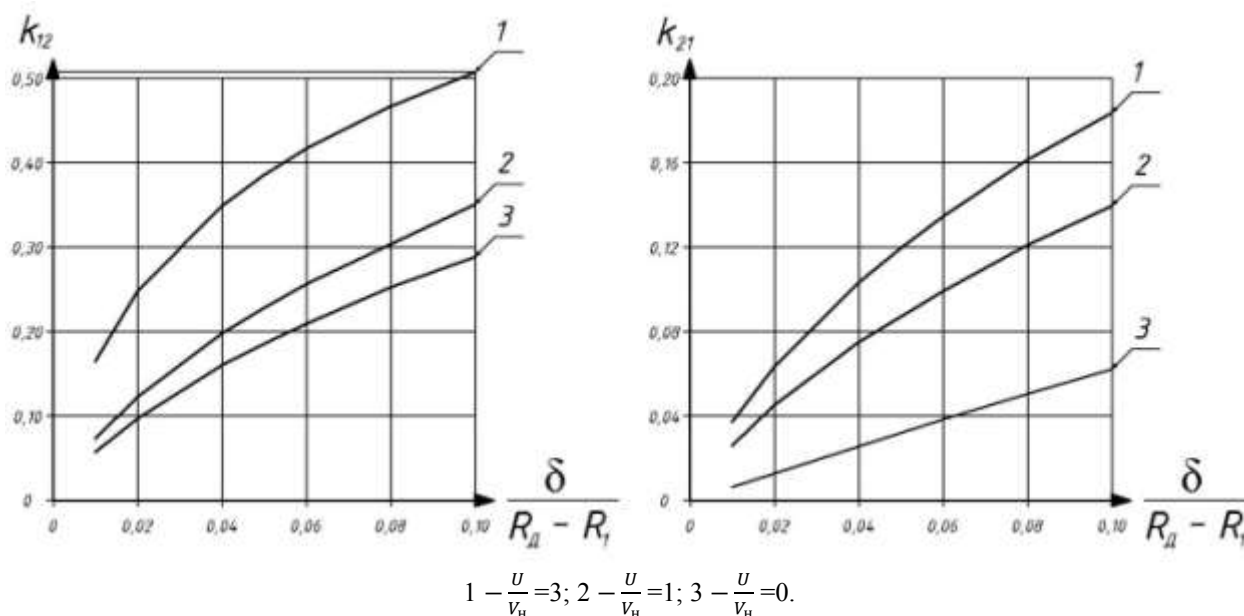
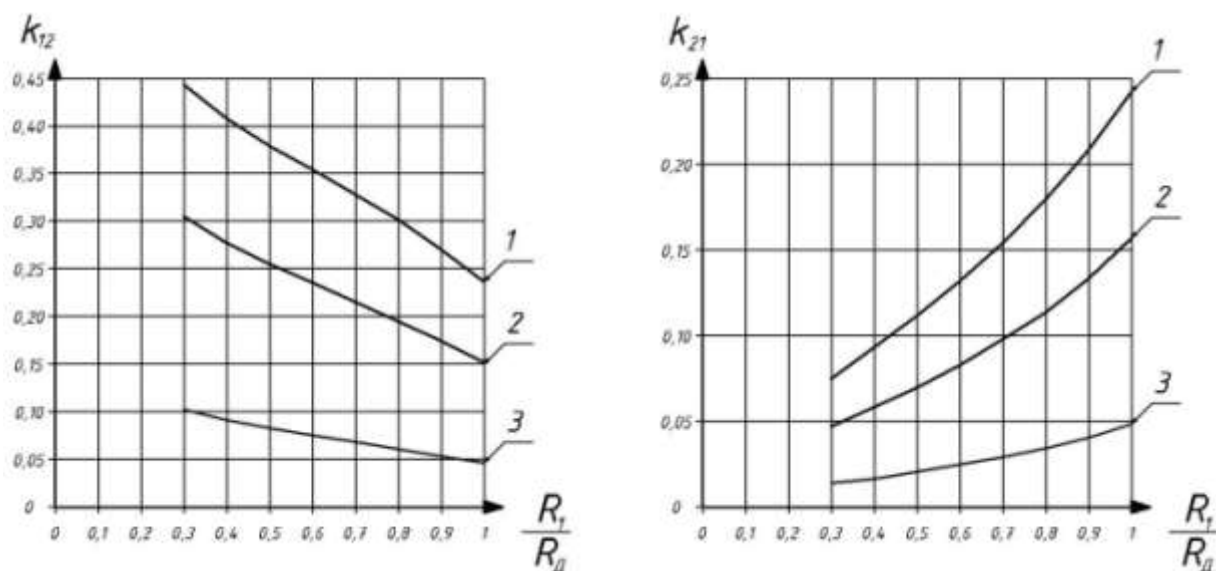


Рис. 19. Влияние параметра канала на вероятность прохода молекул газа сквозь торцовый зазор в прямом и обратном направлении.

С увеличением параметра канала $\frac{\delta}{R_d - R_1}$ вероятность прохода в прямом и обратном направлении возрастает.

Влияние относительной высоты канала $\frac{R_1}{R_d}$ при трех фиксированных значениях параметра канала $\frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.1; 0.05; 0.01$ представлено на рис. 20 и окружной скорости вращения на периферии диска равной $U = V_n$.



$$1 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.1; 2 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.05; 3 - \frac{\delta}{R_d - R_1} = 0.01.$$

Рис. 20. Влияние относительной высоты канала на вероятность прохода молекул газа сквозь торцовый зазор в прямом и обратном направлении.

С увеличением относительной высоты канала вероятность возрастает в прямом направлении и падает в обратном, т.е. защитные свойства улучшаются.

Достижимое отношение давлений на уплотнении определяется выражением:

$$\tau = \frac{p_2}{p_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{k_{12}F_{\text{вх}}}{k_{21}F_{\text{вых}}} = \frac{k_{12}\pi 2R_1\delta}{k_{21}\pi 2R_d\delta} = \frac{k_{12}R_1}{k_{21}R_d}$$

Влияние величины зазора на достигаемое отношение давлений представлено на рис. 21.

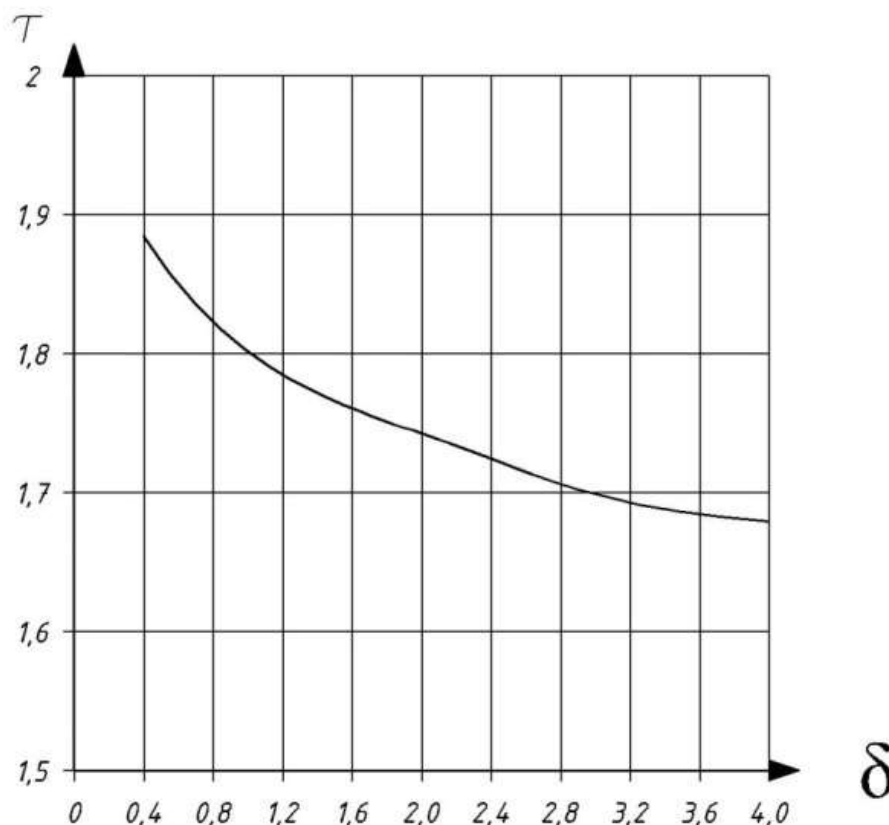


Рис. 21. Достижимое отношение давлений

Для улучшения работы уплотнения необходимо увеличивать скорость вращения диска, увеличивать относительную высоту и уменьшать относительную ширину зазора.

На основании полученных уравнений можно получить численные результаты перетекающего потока через торцовый зазор дискового вакуумного насоса.

Величина зазора определяется точностью изготовления изделия, наиболее часто величины этих зазоров от 0.1 до 1 мм. В качестве примера для расчета выбрано $\delta=0.8$ мм. Меньшее значение δ усложняет технологию изготовления. Последующие вычисления выполнены для уплотнения с размерами: $R_1 = 70$ мм $R_d = 110$ мм $\delta = 0.8$ мм $u = \vartheta_n$.

Объем газа U , перетекающий через зазор с входа на выход в единицу времени:

$$U = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot (k_{12}F_{\text{вх}} - k_{21}F_{\text{вых}}\tau),$$

где $k_{12} = 0,1223$ $k_{21} = 0,0451$.

Для неподвижного диска:

$$U_{12} = U_{21} \rightarrow k_{12}F_{\text{вх}} = k_{21}F_{\text{вых}},$$

тогда результирующий поток равен:

$$U = \frac{1}{4} \cdot \vartheta_{\text{ср}} \cdot k_{12}F_{\text{вх}}(1 - \tau),$$

где $k_{12} = 0,1049$

На рис. 22 сплошной линией обозначен поток газа при вращающемся диске, а пунктирной линией при неподвижном.

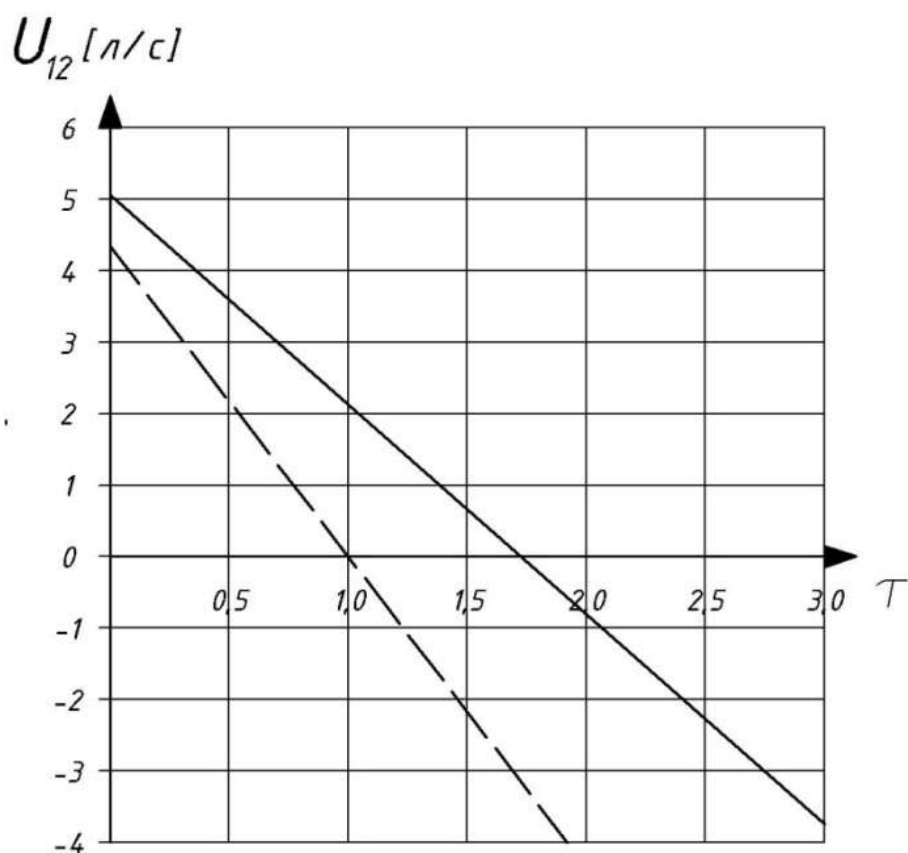


Рис. 22. Результирующий поток газа через торцовый зазор дискового вакуумного насоса

На рис. 23 приведен алгоритм программы расчета вероятности прохождения молекул газа сквозь торцовый зазор в прямом направлении k_{12} , представленный в виде блок-схемы.

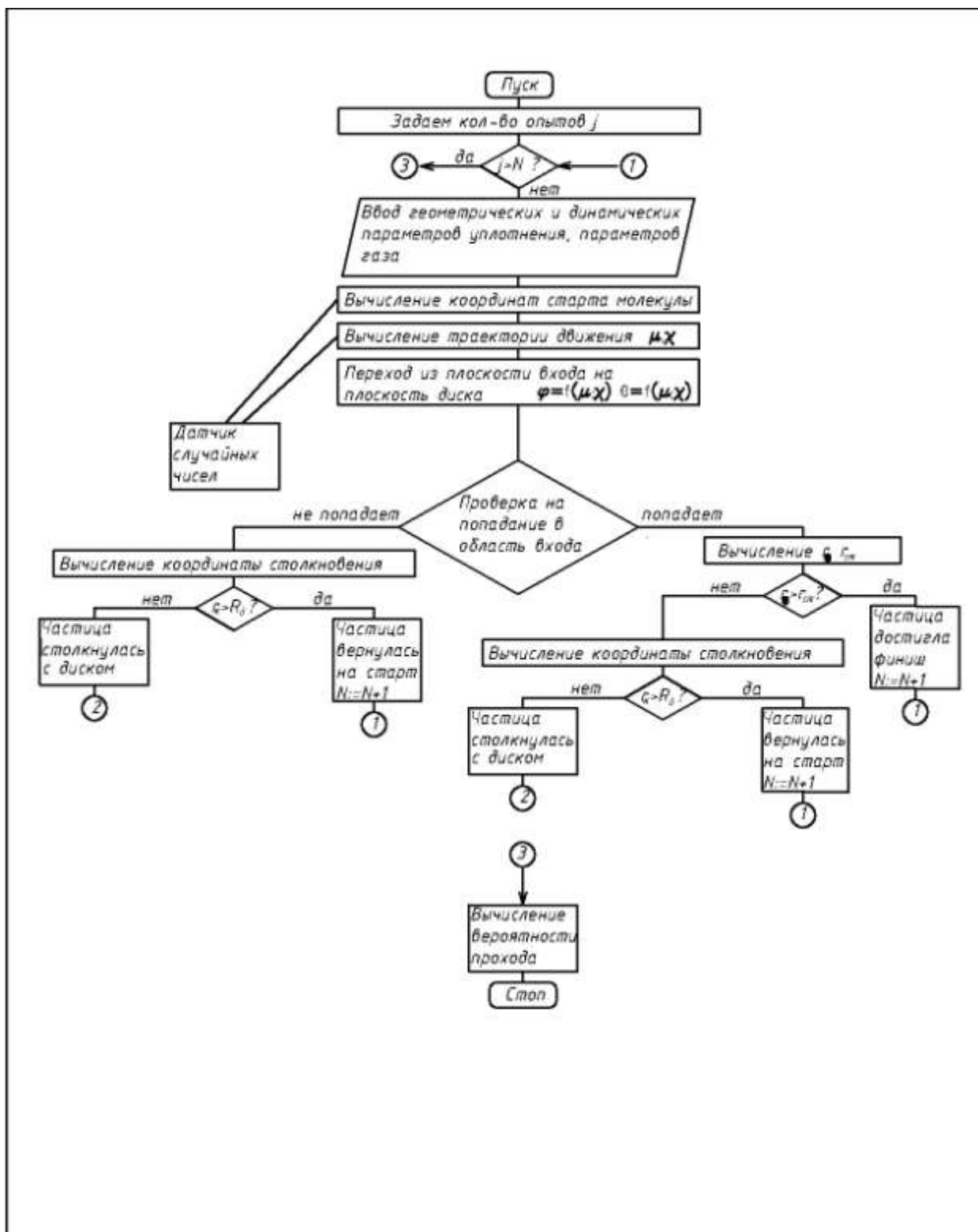


Рис. 24. Алгоритм расчета вероятности прохода k_{21} в обратном направлении.

Заключение

Разработана математическая модель течения газа в торцовом зазоре дискового вакуумного насоса;

Разработан алгоритм и программа расчета;

Проведено исследование течения газа в зазоре дискового вакуумного насоса, в результате которого было установлено влияние геометрических параметров зазора и скорости вращения дисков на проводимость зазора.

- С увеличением скорости вращения дисков, вероятность прохождения частиц увеличивается и соответственно возрастает проводимость торцового зазора;
- Влияние величины зазора оказывает существенное влияние на его проводимость. Чем меньше величина зазора, тем больше относительное повышение давления.
- С увеличением относительной длины канала, вероятность прохождения частиц увеличивается в прямом направлении и уменьшается в обратном, соответственно возрастает проводимость зазора.
- Получены численные значения потока, определены области положительного и отрицательного потока и точка нулевого потока.
- Выполнена проверка на адекватность процесса, основанная на равенстве проводимости прямого и обратного прохода. Погрешность не превышает допустимого отклонения.

Список литературы

1. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др. Вакуумная техника: Справочник / под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
2. Демихов К.Е., Макаров А.М., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Методика расчета откачной характеристики кинетического высоковакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-765](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-765)
3. Шемарова О.А., Никулин Н.К. Определение проводимости в молекулярном и переходном режимах течения газа методом частиц в ячейках // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-753](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-753)
4. Шемарова О.А., Никулин Н.К. Математическое моделирование течения разреженного газа при наличии возмущающих воздействий // Вакуумная техника, материалы и технология: матер. VIII Международной научно-технической конференции / под ред. докт. техн. наук, проф. С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА, 2013. С. 105-111.
5. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет течения газа в проточной части молекулярного вакуумного насоса // Вакуумная техника, материалы и технология: матер. VIII Международной научно-технической конференции / под ред. докт. техн. наук, проф. С.Б. Нестерова. М.: НОБЕЛЛА, 2013. С. 111-118.

6. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Течение газа в спиральном канале молекулярного вакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 7. DOI: [10.18698/2308-6033-2012-7-274](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-274)
7. Демихов К.Е., Дронов А.В., Никулин Н.К. Расчет откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 7. DOI: [10.18698/2308-6033-2012-7-273](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-273)
8. Демихов К.Е., Дронова Т.В., Никулин Н.К. Исследование возможностей оптимизации откачных характеристик молекулярновязкостного вакуумного насоса методами статистического моделирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 11. С. 13-19.
9. Никулин Н.К., Серяков А.С. Статистическое моделирование процесса перехода молекул газа через межлопаточный канал рабочего колеса турбомолекулярного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Спец. вып. Вакуумные и компрессорные машины и пневмооборудование. С. 33-40.
10. Бёрд Г.А. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. 319 с.

Calculation of Gas Overflows Through a Face Gap in the Disk Vacuum Pump

N.K. Nikulin¹, V.A. Mishustin¹,
J.A. Shostak^{1,*}

[*shostak.uliya@yandex.ru](mailto:shostak.uliya@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: consolidation, probability, overflowing, conductivity, mathematical model, Monte-Carlo method, face gap, speed

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 find a wide application 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 being described by Maxwell's law. The calculation is based on the use of 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

of the disk vacuum pumps, for providing a movement in high-vacuum mechanical pumps, and in calculating the overflows in the flowing passages of a similar pump design.

References

1. Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K. et al. *Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik* [Vacuum technique: Reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p. (in Russian).
2. Demikhov K.E., Makarov A.M., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. A calculation approach for pumping performance of a kinetic high vacuum pump. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-765](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-765) (in Russian).
3. Shemarova O.A., Nikulin N.K. Conductivity testing in molecular and transient mode of a gas flow by particle-in-cell method. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. DOI: [10.18698/2308-6033-2013-5-753](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-753) (in Russian).
4. Shemarova O.A., Nikulin N.K. Mathematical modeling of rarefied gas flow in the presence of disturbances. In: Nesterov S.B., ed. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya: mater. 8 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vacuum technique, materials and technology: proc. of the 8th international scientific and technical conference]. Moscow, NOVELLA Publ., 2013, pp. 105-111. (in Russian).
5. Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Calculation of the gas flow in the flow part of the molecular vacuum pump. In: Nesterov S.B., ed. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya: mater. 8 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vacuum technique, materials and technology: proc. of the 8th international scientific and technical conference]. Moscow, NOVELLA Publ., 2013, pp. 111-118. (in Russian).
6. Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Gas Flow in a Helical Port of a Molecular Vacuum Pump. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 7. DOI: [10.18698/2308-6033-2012-7-274](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-274) (in Russian).
7. Demikhov K.E., Dronov A.V., Nikulin N.K. Evacuation Data Calculation for a Molecular-Viscous Vacuum Pump. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 7. DOI: [10.18698/2308-6033-2012-7-273](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-7-273) (in Russian).
8. Demikhov K.E., Dronova T.V., Nikulin N.K. Investigation of opportunities to optimize pumping performance of molecular-viscous vacuum pump by statistical simulation methods. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 11, pp. 13-19. (in Russian).
9. Seryakov A.S., Nikulin N.K. Statistical Simulation of Gas-Molecule Transfer through Intervane Channel of the Turbomolecular Pump Rotor. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, spec. is., pp. 33-40. (in Russian).
10. Bird G.A. *Molecular gas dynamics*. Oxford, Clarendon Press, 1976. (Russ. ed.: Bird G.A. *Molekulyarnaya gazovaya dinamika*. Moscow, Mir Publ., 1981. 319 p.).