

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖСТУПЕНЧАТОГО КАНАЛА КОМБИНИРОВАННОГО ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО НАСОСА

Ю. А. Шостак, Н. К. Никулин, П. А. Шостак, Г. Т. Цакадзе, Е. В. Свичкарь

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Расчет реализовывается с помощью статистического подхода и основан на применении метода пробной частицы (Монте-Карло). Определяется вероятность прямого и обратного перехода молекул газа через канал между турбомолекулярной и молекулярной ступенями насоса. Учитывается воздействие подвижных стенок, ограничивающих канал. В результате исследования определено влияние геометрических и динамических параметров межступенчатого канала на вакуумные характеристики межступенчатого канала. Приведены зависимости вероятности перехода молекул газа через межступенчатый канал от относительных показателей, определяющих геометрию и динамику стенок канала.

Ключевые слова: турбомолекулярный насос, молекулярный режим течения газа, метод Монте-Карло, проводимость канала, объемный поток газа, канал с движущимися стенками, откачная характеристика, диффузный закон отражения, сопротивление, турбомолекулярный насос.

Введение

На сегодняшний день ввиду все большего количества технологических процессов, реализуемых в условиях вакуума, возрастает потребность в средствах откачки газов, вакуумных системах и оборудовании [1–5]. Турбомолекулярные вакуумные насосы (далее ТМН), относящиеся к высоковакуумной группе, занимают лидирующие позиции благодаря ряду значительных преимуществ, которыми обладают эти насосы. В числе которых: относительно высокая быстрота откачки в широком диапазоне давлений по различным газам, быстрый пуск и останов, высокая степень сжатия, длительная работа без остановки на ремонт, отсутствие потребности в регенерации, широкий диапазон рабочих давлений, низкие затраты на эксплуатацию и обслуживание, возможность установки в любом положении в пространстве, относительно малые габаритные размеры и ряд преимуществ по иным критериям, подробно изложенных в работах [6, 7]. Широкая популярность ТМН на отечественном и зарубежном рынке также обусловлена безмасляной откачкой, ввиду того что последнее является техническим требованием все большего числа технологических процессов, в свою очередь ТМН обладают этим свойством, еще и имеют большие скорости действия в широком диапазоне давлений.

Цель исследования

В настоящее время не существует теории, описывающей процесс откачки газа комбинированным ТМН с учетом такого фактора, как влияние канала между турбо и молекулярной ступенями насоса. На сегодняшний день при описании процесса откачки в проточной части комбинированного ТМН никак не учитывается эффект, оказываемый на процесс откачки межступенчатым каналом. Не

смотря на то, что исследования процесса течения газа в комбинированных проточных частях ТМН проводятся уже долгое время, исследователями не представлено какой-либо информации о данном эффекте, соответственно, провести даже предварительную количественную оценку этого влияния не представляется возможным без непосредственно моделирования процесса течения газа в данной области проточной части. Однако приобретение информации об эффекте, оказываемом обозначенным каналом, может позволить совершенствовать актуальные методы расчета комбинированных проточных частей турбонасосов и при проектировании получать более высокую сходимость расчетных откачных характеристик и реальных экспериментальных.

Моделирование процесса течения газа в проточной части с учетом максимально возможного количества факторов имеет определяющее значение при проектировании проточной части и создании машины с конкурентоспособными характеристиками. Целью данной работы является исследование эффекта, оказываемого межступенчатым каналом на откачную характеристику комбинированного ТМН, и выявление влияния геометрических и динамических параметров рассматриваемого канала на откачную характеристику насоса.

При расчете проточная часть комбинированного ТМН может быть условно разбита на три блока: турбоступень, молекулярная ступень и соединительный межступенчатый канал.

Известны и успешно применяются методики расчета турбоступени [8–10], есть ряд исследований [10, 11], посвященных моделированию процесса откачки газа молекулярными ступенями различных типов, однако математические модели, разработанные с учетом влияния межступенчатого соединительного канала, не обнаружены. Последнему посвящена данная работа.

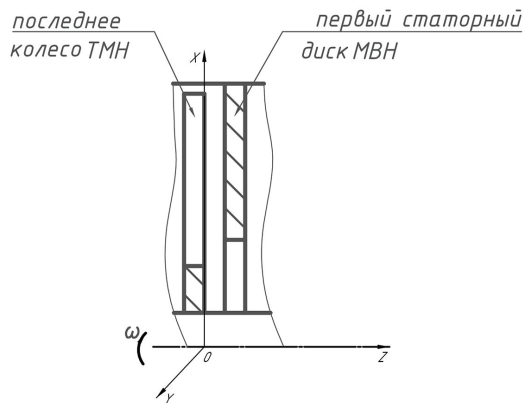


Рис. 1. Расчетная схема межступенчатого канала
Fig. 1. Design diagram of the interstage channel

Математическая модель течения газа в межступенчатом канале

Для моделирования течения газа в канале между турбомолекулярной и молекулярной ступенями гибридного ТМН применяется метод пробной частицы Монте-Карло [12–14] при следующих традиционных допущениях [14–16]: молекулярный режим течения газа, взаимодействие молекул газа с поверхностями канала описывается диффузным законом отражения; равновероятное попадание молекул газа на вход в межступенчатый канал; изотермический процесс течения газа; коэффициент аккомодации энергии на поверхностях, ограничивающих канал, равен единице; распределение молекул газа по скоростям соответствует закону Максвелла. Расчетная схема представлена на рис. 1.

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

Основные геометрические параметры рассматриваемой системы приведены на рис. 2. Роторный и статорный диски, радиуса R_A , расположены на расстоянии δ друг от друга. Роторный диск зафиксирован на валу, радиуса R_0 , а статорный — на корпусной цилиндрической поверхности. Для определения вероятностей рассматривается число молекул $N_{\text{общ}}$, прослеживается их движение с момента старта с поверхности входа в систему до момента выхода из нее.

Область старта представляет собой кольцевую плоскую поверхность. В начальный момент времени для однозначного определения положения молекулы задаются координаты точки старта. Координатами точки входа частицы в кольцевое входное отверстие (рис. 2) являются угол α_{cm} и радиус r_{cm} . Для обеспечения равновероятного входа молекул по всей площади необходимо, чтобы угол α_{cm} был равномерно распределен в интервале от 0 до 2π . Значения угол α_{cm} получаем датчиком случайных чисел ξ [0,1], равномерно распределенных в интервале от 0 до 1. Аналогично разыгрывается величина случайного радиуса r_{cm} . Для осесимметричных систем достаточно разыграть только случайный радиус, а полярный угол α_{cm} принять равным нулю.

$$\alpha_{cm} = 2\pi\xi,$$

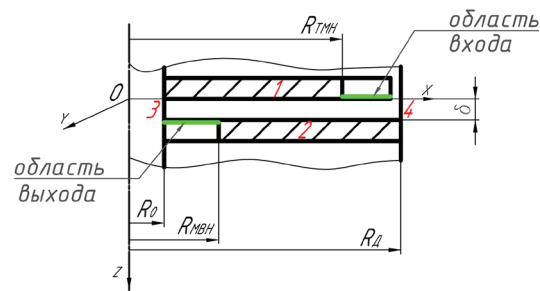


Рис. 2. Геометрические параметры канала:
1 — последнее колесо ТМН; 2 — первый статорный диск МВН; 3 — ротор; 4 — корпус
Fig. 2. Geometric parameters of the channel:
1 — last TMN wheel; 2 — first stator disk MVN;
3 — rotor; 4 — case

$$r_{cm} = \sqrt{\xi(R_g^2 - R_{TMН}^2) + R_{TMН}^2}.$$

Направление полета молекулы однозначно задается двумя углами φ и θ . Случайный угол φ , равномерно распределенный в интервале от 0 до 2π , определяется следующим соотношением:

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

В соответствии с диффузным законом отражения, значение угла θ распределено в интервале от 0 до $\frac{\pi}{2}$ и разыгрывается следующим образом:

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

Согласно распределению Максвелла, случайную величину безразмерной тепловой скорости определяют из уравнения [9 с. 8, 16]:

$$\xi = \int_0^c \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-c^2} c^2 dc$$

или по аппроксимирующей зависимости [9, с. 8]:

$$c(\xi) = \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{7} \operatorname{tg}\left(\frac{10}{13} \pi \xi - \frac{9}{25} \pi\right),$$

где c — модуль безразмерной скорости теплового движения молекулы газа.

Модуль тепловой скорости молекулы газа:

$$v\xi = c(\xi) \cdot v_n,$$

где v_n — наиболее вероятная скорость теплового движения молекул газа, $v_n = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$; T — температура газа, К; M — молярная масса, кг/кмоль; R — универсальная газовая постоянная.

Траектория молекулы представляется в параметрическом виде в декартовой системе координат OXYZ (рис. 2):

$$\begin{cases} x = l_c \Delta t + x_s; \\ y = m_c \Delta t + y_s; \\ z = n_c \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где l_c, m_c, n_c — направляющие косинусы; $l_c = \sin\theta \cos\varphi$, $m_c = \sin\theta \sin\varphi$, $n_c = \cos\theta$; x_s, y_s, z_s — координаты точки старта молекулы; Δt — параметр.

Траектория молекулы приводится к виду:

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ — проекции скорости молекулы на соответствующие оси координат, Δt — время полета до столкновения, x_s, y_s, z_s — координаты точки старта молекулы.

При столкновении молекулы с вращающейся поверхностью последняя получает дополнительное количество движения, что изменяет ее скорость по модулю и направлению. В результате такого влияния уравнения траекторий молекул, стартующих с подвижных поверхностей канала при угловой скорости вращения ротора ω , имеют вид:

$$\begin{cases} x = (\vartheta_x - \omega \cdot y_s) \Delta t + x_s; \\ y = (\vartheta_y + \omega \cdot x_s) \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s. \end{cases}$$

Обозначим проекции на оси скорости вращения поверхности как $\vartheta_x \omega = \omega \cdot y_s$, и $\vartheta_y \omega = \omega \cdot x_s$.

Моделирование полета частицы зависит от ряда параметров и условий. Необходимо принимать во внимание положение точки вылета молекулы в пространстве, тип поверхности вылета, величины углов направления полета φ и θ , скоростные граничные условия.

Уравнения траекторий молекул, стартующих с фиктивной поверхности 1 (рис. 2), — диска ТМН:

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где $\vartheta_x = l_c \vartheta + \vartheta_{x\omega}$, $\vartheta_y = m_c \vartheta + \vartheta_{y\omega}$, $\vartheta_z = n_c \vartheta$.

Уравнения траекторий молекул, стартующих с фиктивной поверхности 2 (рис. 2) — диска МВН:

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где $\vartheta_x = l_c \vartheta$, $\vartheta_y = m_c \vartheta \cos \pi - n_c \vartheta \sin \pi$, $\vartheta_z = n_c \vartheta$, $\vartheta_x = m_c \vartheta \sin \pi + n_c \vartheta \cos \pi$.

Уравнения траекторий молекул, стартующих с фиктивной поверхности 3 (рис. 2), — вала:

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где $\vartheta_x = l_c \vartheta \cos \alpha_2 - m_c \vartheta \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + n_c \vartheta \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + \vartheta_{x\omega}$, $\vartheta_y = l_c \vartheta \sin \alpha_2 + m_c \vartheta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - n_c \vartheta \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \vartheta_{y\omega}$, $\vartheta_z = m_c \vartheta \sin \alpha_1 + n_c \vartheta \cos \alpha_1$, где α_1 и α_2 — углы поворота осей локальной системы координат, начало которой совпадает с точкой текущего старта, относительно глобальной системы координат $OXYZ$.

Углы поворота осей локальной системы координат определяются из соотношений:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2},$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{x_s}{R_0}, \text{ при } y_s \geq 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{5\pi}{2} - \arccos \frac{x_s}{R_0}, \text{ при } y_s < 0 \text{ и } x_s < 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{x_s}{R_0}, \text{ при } y_s < 0 \text{ и } x_s \geq 0.$$

Уравнения траекторий молекул, стартующих с фиктивной поверхности 4 (рис. 2), — корпуса:

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s, \end{cases}$$

где $\vartheta_x = l_c \vartheta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + n_c \vartheta \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 - m_c \vartheta \sin \alpha_2$, $\vartheta_y = l_c \vartheta \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 + n_c \vartheta \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + m_c \vartheta \cos \alpha_2$, $\vartheta_z = -l_c \vartheta \sin \alpha_1 + n_c \vartheta \cos \alpha_1$, где α_1 и α_2 — углы поворота осей локальной системы координат, начало которой совпадает с точкой текущего старта, относительно глобальной системы координат $OXYZ$.

Углы поворота осей локальной системы координат определяются из соотношений:

$$\alpha_1 = \frac{3\pi}{2};$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{x_s}{R_0}, \text{ при } y_s \geq 0;$$

$$\alpha_2 = 2\pi - \arccos \frac{x_s}{R_0}, \text{ при } y_s < 0.$$

В исследуемом канале столкновения молекул происходят с поверхностями двух типов: плоскость (поверхности дисков), цилиндрическая (поверхность вала и корпуса ТМН).

Решение систем уравнений, состоящих из уравнений, описывающих траекторию полета и уравнения, задающего поверхность канала, позволяет определить координаты точки приземления, последующим выбором реальной точки приземления из массива полученных значений Δt_i из условия минимального положительного Δt . Системы уравнений приведены ниже.

Пересечение прямой и плоскости $z=0$ (поверхность 1 — диск ТМН):

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s; \\ z = 0. \end{cases}$$

Пересечение прямой и плоскости $z=\delta$ (поверхность 2 — диск МВН):

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s; \\ z = \delta. \end{cases}$$

Пересечение прямой и цилиндра $x^2 + y^2 = R_0^2$ (поверхность 3 — ротор):

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s; \\ x^2 + y^2 = R_0^2. \end{cases}$$

Пересечение прямой и цилиндра $x^2 + y^2 = R_0^2$ (поверхность 4 — корпус):

$$\begin{cases} x = \vartheta_x \Delta t + x_s; \\ y = \vartheta_y \Delta t + y_s; \\ z = \vartheta_z \Delta t + z_s; \\ x^2 + y^2 = R_A^2. \end{cases}$$

В результате каждого столкновения определяется принадлежность точки приземления поверхности входа или выхода. Условие принадлежности координат точки условного столкновения с фиктивной поверхностью входа: точка приземления должна находиться на поверхности колеса ТМН и принадлежать кольцевой области входа, т. е. $R_{ТМН} \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_A$. Условие принадлежности координат точки условного столкновения с фиктивной поверхностью выхода: точка приземления должна находиться на поверхности диска МВН и принадлежать области выхода, т. е. $R_0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_{МВН}$.

Если не выполнилось ни одно из этих условий или точка приземления принадлежит другой поверхности, значит, частица не достигла ни поверхности выхода, ни поверхности входа и осталась в системе. В таком случае продолжается проследование дальнейшего движения частицы.

Вычисление вероятности перехода через межступенчатый канал. Проведение численного эксперимента

Вероятность перехода молекул газа сквозь канал определяется как отношение числа прошедших молекул к общему числу молекул, участвовавших в эксперименте. Для численного определения вероятности перехода на основе приведенных математических зависимостей разработано программное обеспечение, в котором реализовывается моделирование движения молекул газа в межступенчатом канале гибридного ТМН, процесс вычислений продолжается в цикле до тех пор, пока не будет проследжено заданное число экспериментальных молекул $N_{общ}$. Организованными счетчиками фиксируется количество молекул, прошедших сквозь канал $N_{пр}$ и число молекул, вернувшихся на вход в систему $N_{вер}$. Число молекул $N_{общ}$ выбирается, исходя из требуемой точности расчета.

Вероятность прямого прохода молекул газа через межступенчатый канал:

$$k_{12} = \frac{N_{пр}}{N_{общ}}$$

где $N_{пр}$ — число молекул прошедших сквозь канал в прямом направлении; $N_{общ}$ — общее число рассматриваемых молекул.

Аналогично вычисляется вероятность перехода в обратном направлении k_{21} . Для решения обратной задачи — вычисления вероятности обратного перехода на расчетной схеме, поверхность входа и выхода меняются местами относительно прямой задачи.

Объемный поток газа, проходящий в единицу времени в направлении от центра к периферии U_1 и U_2 в обратном направлении в молекулярном режиме течения газа, согласно известной формуле для произвольного канала [3], вычисляется следующим образом:

$$U_1 = \frac{1}{4} k_{12} \vartheta_{cp} F_{12};$$

$$U_2 = \frac{1}{4} k_{21} \vartheta_{cp} F_{21},$$

где k_{12} — вероятность перехода через межступенчатый канал в прямом направлении; k_{21} — вероятность перехода через межступенчатый канал в обратном направлении; F_{12} — площадь поперечного сечения входа в канал; F_{21} — площадь поперечного сечения выхода из канала; ϑ_{cp} — средняя арифметическая скорость теплового движения молекул.

Поток молекул газа Q_{12} и Q_{21} в прямом и обратном направлении соответственно:

$$Q_{12} = \frac{1}{4} k_{12} \vartheta_{cp} F_{12} p_1,$$

$$Q_{21} = \frac{1}{4} k_{21} \vartheta_{cp} F_{21} p_2,$$

где p_1 и p_2 — давление во входном и выходном сечениях канала.

Поток молекул газа Q , перетекающий через канал с входа на выход в единицу времени:

$$Q = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{12} F_{12} p_1 - k_{21} F_{21} p_2).$$

Результаты численного эксперимента

В результате численных испытаний были получены зависимости вероятностей прямого и обратного перехода от ряда определяющих параметров. На рис. 3 представлена зависимость вероятности перехода молекул газа через канал от безразмерной скорости подвижных поверхностей u/v_{H^*} , где u — окружная скорость поверхности на периферии диска. С увеличением скорости вращения подвижной поверхности вероятность перехода молекул газа сквозь канал убывает в прямом направлении и возрастает в обратном. Следует обеспечить минимальное влияние скорости вращения подвижных поверхностей. Конструктивно это может быть решено, например, использованием последнего колеса ТМН статорным.

В качестве следующего параметра для оценки влияния воздействия межступенчатого канала предложена относительная ширина канала $\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН})$. Зависимость вероятностей перехода k_{12} и k_{21} от относительной ширины канала $\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН})$ представлена на рис. 4.

Вероятность прямого перехода монотонно возрастает с увеличением ширины канала во всем диапазоне относительных широт, вероятность обратного перехода возрастает на участке $\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН}) = 0,1 \dots 1,5$, а далее асимптотически стремится к некоторому значению, при этом вероятность обратного перехода преобладает над вероятностью прямого перехода.

Для дальнейшего анализа приведем относительные величины G_{12} , G_{21} , и G , характеризующие относительный прямой, обратный и результирующий

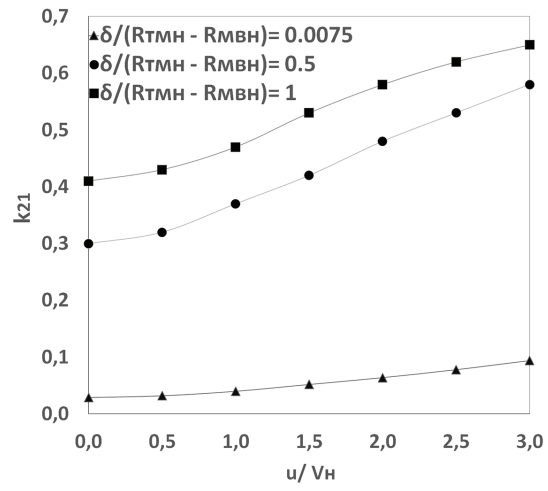
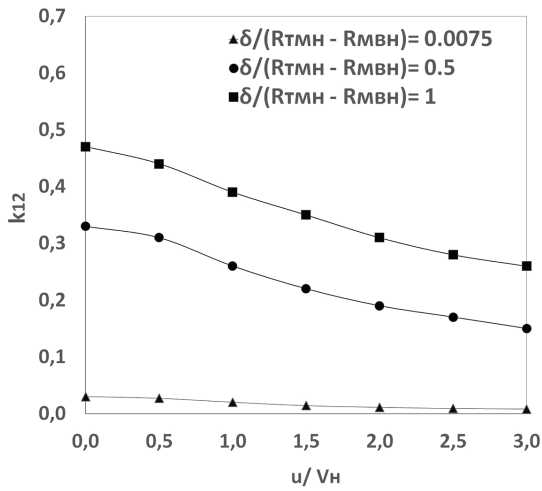


Рис. 3. Зависимость вероятности перехода молекул газа через межступенчатый канал k_{12} в прямом направлении и k_{21} в обратном от безразмерной скорости подвижных поверхностей u/v_H при различных значениях относительной ширины $\delta/(R_{TMH} - R_{MBH})$
 Fig. 3. Dependence of the probability of transition of gas molecules through the interstage channel k_{12} in the forward direction and k_{21} in the opposite direction on the dimensionless velocity of the moving surfaces u/v_H at different values of the relative width $\delta/(R_{TMH} - R_{MBH})$

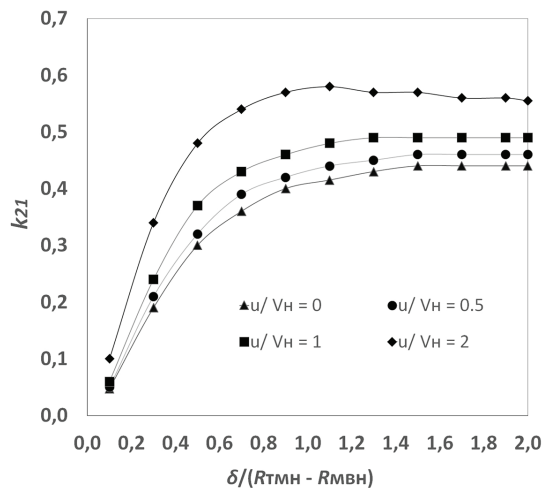
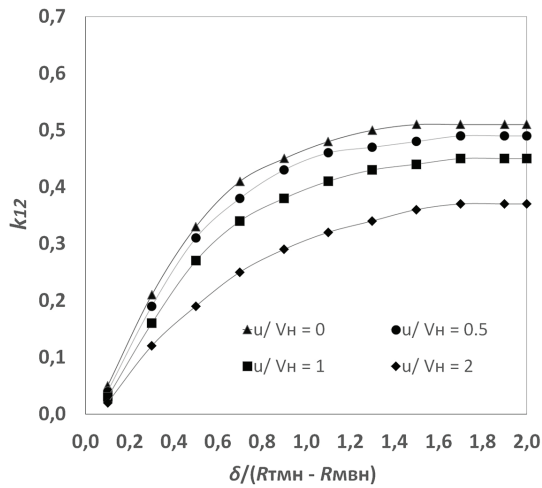


Рис. 4. Зависимость вероятности перехода молекул газа через межступенчатый канал в прямом и обратном направлении k_{12} и k_{21} от относительной ширины канала $\delta/(R_{TMH} - R_{MBH})$ при $u/v_H=0; 0.5; 1; 2$
 Fig. 4. Dependence of the probability of transition of gas molecules through the interstage channel in the forward and reverse directions k_{12} and k_{21} on the relative channel width $\delta/(R_{TMH} - R_{MBH})$ at $u/v_H=0; 0.5; 1; 2$

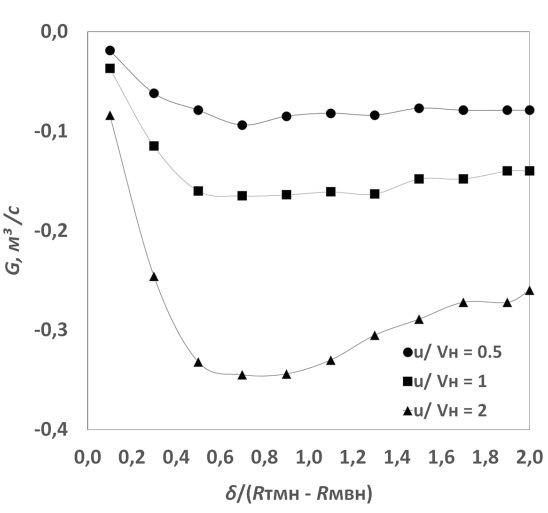
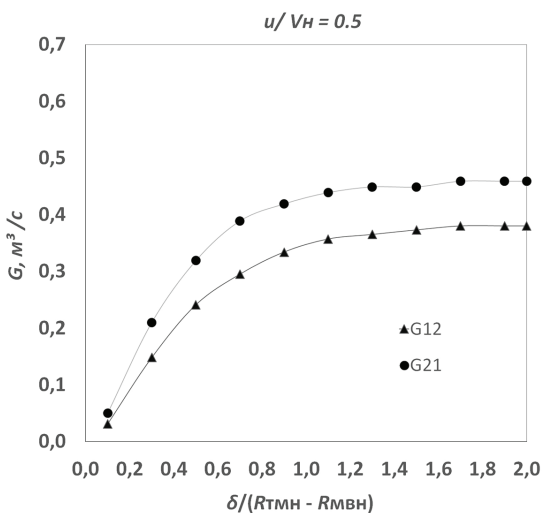


Рис. 5. Зависимость относительного прямого, обратного и результирующего секундного объема газа от относительной ширины канала при $u/v_H=0.5; 1; 2$
 Fig. 5. Dependence of the relative forward, reverse and resulting second gas volume on the relative channel width at $u/v_H=0.5; 1; 2$

секундный объем газа соответственно, не зависящие от давления, а только от геометрии канала и скорости вращения подвижных поверхностей:

$$G_{12} = \frac{1}{4} k_{12} \vartheta_{cp} F_{12},$$

$$G_{21} = \frac{1}{4} k_{21} \vartheta_{cp} F_{21},$$

$$G = G_{12} - G_{21} = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{12} F_{12} - k_{21} F_{21}).$$

Зависимости $G_{12} = f(\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН}))$, $G_{21} = f(\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН}))$ и $G = f(\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН}))$ представлены на рис. 5.

Поскольку значения G отрицательны во всем диапазоне относительной ширины канала, канал будет являться сопротивлением. Сопротивление меньше при меньших скоростях вращения ротора.

Получаемое отношение давлений в канале определяется выражением:

$$\tau = \frac{k_{12} F_{12}}{k_{21} F_{21}}.$$

Зависимость получаемого отношения давлений от относительной ширины канала приведена на рис. 6. На основе полученных выше данных можно получить численные результаты перетекающего потока через межступенчатый канал комбинированного ТМН. В качестве примера для расчета принято $\delta/(R_{ТМН} - R_{МВН}) = 0,3$. Последующий расчет выполнялся для следующих исходных данных: $R_A = 110$ мм; $R_{ТМН} = 0,909 R_A = 100$ мм; $R_{МВН} = 0,545 R_A = 60$ мм; $R_0 = 0,273 R_A = 30$ мм; $u/v_H = 2$; $\delta = 12$ мм; $k_{12} = 0,12$; $k_{21} = 0,34$; $k_{12} = 0,12$ при $u/v_H = 0$; $F_{12} = \pi(R_A^2 - R_{ТМН}^2) = 0,0065$ м²; $F_{21} = \pi(R_{МВН}^2 - R_0^2) = 0,0085$ м².

Объемный поток газа, перетекающий через канал с входа на выход (от периферии к центру) в единицу времени:

$$U_{12} = U_{12} - U_{21} \tau = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{12} F_{12} - \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{21} F_{21} \tau = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{12} F_{12} - k_{21} F_{21} \tau).$$

Объемный поток газа, перетекающий через канал с выхода на вход (от центра к периферии) в единицу времени:

$$U_{21} = U_{21} - U_{12} \tau = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{21} F_{21} - \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{12} F_{12} \tau = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{21} F_{21} - k_{12} F_{12} \tau).$$

При неподвижном роторе:

$$U_0 = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{12} F_{12} (1 - \tau).$$

Зависимость результирующего объемного потока газа U_{12} через межступенчатый канал в прямом направлении при $u/v_H = 2$ и U_0 при неподвижном роторе представлена на рис. 7.

Заключение

С увеличением скорости вращения поверхностей, вероятность прямого перехода молекул газа

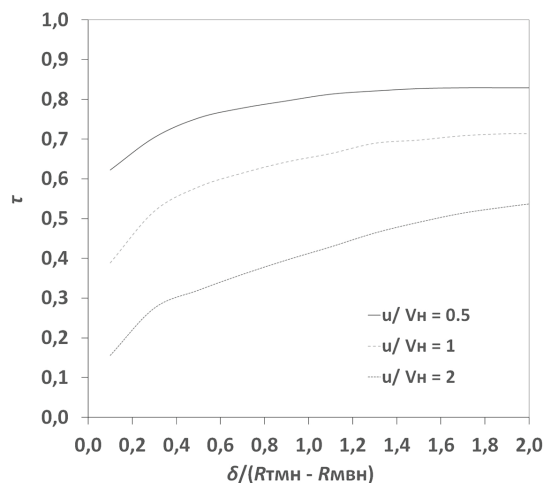


Рис. 6. Отношение давлений τ в межступенчатом канале при $u/v_H = 0,5; 1; 2$
Fig. 6. The ratio of pressures τ in the interstage channel at $u/v_H = 0,5; 1; 2$

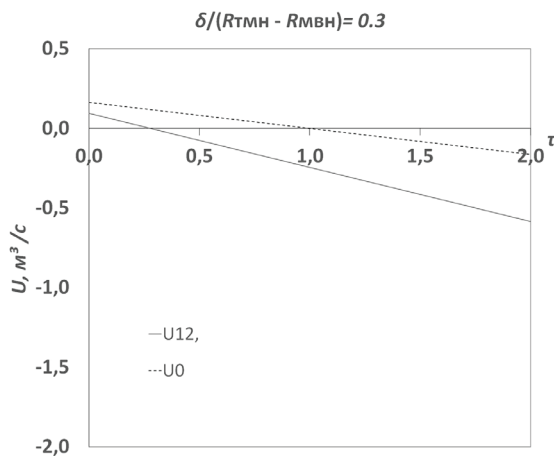


Рис. 7. Результирующий объемный поток газа U_{12} через межступенчатый канал в прямом направлении при $u/v_H = 2$ и U_0 при неподвижном роторе
Fig. 7. The resulting volumetric gas flow U_{12} through the interstage channel in the forward direction at $u/v_H = 2$ and U_0 with a stationary rotor

через межступенчатый канал снижается, а обратного — увеличивается. Эффект сопротивления межступенчатого канала можно уменьшить постановкой последнего статорного колеса турбомолекулярной ступени. Следует минимизировать площадь подвижных поверхностей, ограничивающих канал. Приведенные результаты о влиянии параметров межступенчатого канала позволяют выбрать конструкцию межступенчатого канала, которая обеспечит минимальное сопротивление потоку газа.

При малых значениях относительной ширины канала при движении газа от периферии к центру возникает минимальное отношение давлений, т. е. максимальное сопротивление потоку газа. При $u/v_H = 1$ отношение давлений достигает значения 0,4, что означает необходимость обеспечения форвакуумного давления (т. е. давления на входе в молекулярную ступень) в 2,5 раза меньше. При движении газа от центра к периферии возникает дополнительный откачной эффект, отношение давлений принимает значение 2,5 при $u/v_H = 1$.

Чем больше ширина канала, тем меньше влияние скорости. При проектировании комбинированной проточной части следует принимать максимальную ширину канала, которую позволяет массогабаритный критерий.

При расчете необходимо учитывать, что средство форвакуумной откачки, помимо основного потока, поступающего из турбомолекулярной ступени, должно компенсировать величину объемного потока U_{12} , возникающего в результате влияния вращающихся поверхностей межступенчатого канала.

Для обеспечения нулевого потока через сечение площадью F_{21} величина отношения давлений составляет $\tau=0,6$ при $u/v_n=0,5$; $\tau=0,4$ при $u/v_n=1$; $\tau=0,16$ при $u/v_n=2$.

Максимальный обратный объемный поток (при $\tau=1$) составил $U_{12max}=0,25$ м³/с при $u/v_n=2$; $U_{12max}=0,1$ м³/с при $u/v_n=0,5$ для рассмотренной геометрии межступенчатого канала.

Приведенные расчеты позволяют рассчитать конструкцию, обеспечивающую минимальные потери — минимальное сопротивление потоку газа.

Список источников

1. Kalinkin D. A., Belova O. V., Andreev R. O. Investigation of gas permeability of fibrous composite material in a vacuum // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2007, Issue 1. 030034. DOI: 10.1063/1.5051895.
2. Demikhov K. E., Ochkov A. A., Kemenov V. N. [et al.]. Development of the calculation algorithm of the flow part main parameters of the ring straight-flow ejector // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2285, Issue 1. 030030. DOI: 10.1063/5.0030046.
3. Dukhopel'nikov D. V., Riazanov V. A., Vorob'ev E. V. [et al.]. Effective sputtering yields of titanium, titanium nitride, and molybdenum induced by nitrogen ions and ions of nitrogen-oxygen mixtures // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10. P. 1202–1207. DOI: 10.1134/S1027451016050712.
4. Dukhopel'nikov D. V., Kirillov D. V., Bulychev V. S. Characteristics of silicon microdroplets in coatings deposited by vacuum arc evaporation // Polymer Science Series D. 2016. Vol. 9. P. 238–242. DOI: 10.1134/S1995421216020040.
5. Dukhopel'nikov D. V., Riazanov V. A., Plotnikova O. P. Effective sputtering yields of alloys chromel and kopel with argon ions in magnetron sputtering system // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1313 (1). 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1313/1/012015.
6. Демихов К. Е., Никулин Н. К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 312 с. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746.
7. Ochkov A., Hamadi M. Development prospects of high-vacuum mechanical pumps using magnetic bearing support // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 963. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/963/1/012035.
8. Вакуумная техника: справочник / Под ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2009. 589 с. ISBN 978-5-94275-436-5.
9. Демихов К. Е., Макаров А. М., Никулин Н. К. [и др.]. Методика расчета откачной характеристики кинетического высоковакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). С. 47. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-765.
10. Becker W. The turbomolecular pump, its design, operation and theory; calculation of the pumping speed for various gases

and their dependence on the forepump // Vacuum. 1966. Vol. 16, Issue 11. P. 625–632. DOI: 10.1016/0042-207X(66)91425-4.

11. Kwon M.-K., Hwang Y.-K. An experimental study of the pumping performance of molecular drag pumps // Journal of Mechanical Science and Technology. 2006. Vol. 20, Issue 9. P. 1483–1491. DOI: 10.1007/BF02915971.
12. Бусленко Н. П., Голенко Д. И., Соболев И. М. [и др.]. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Москва: Физматлит, 1962. 331 с.
13. Нестеров С. Б., Бурмистров А. В., Андросов А. В. [и др.]. Методы расчета сложных вакуумных систем / под общ. ред. С. Б. Нестерова, А. В. Бурмистрова. Москва: Техносфера, 2012. 373 с. ISBN 978-5-94836-337-0.
14. Никулин Н. К., Мишустин В. А., Шостак Ю. А. Определение перетеканий газа через торцовый зазор в дисковом вакуумном насосе // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. № 6. С. 15–39.
15. Бурмистров А. В., Бронштейн М. Д., Саликеев С. И. [и др.]. Расчет проводимости профильного канала спирального вакуумного насоса при молекулярном режиме течения газа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 9-10. С. 3–10.
16. Sawada T. Axial flow molecular pump // The Japan Society of Mechanical Engineers. 1973. Vol. 16, Issue 96. P. 993–1001.

ШОСТАК Юлия Алексеевна, аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 3899-2625

AuthorID (РИНЦ): 963095

Адрес для переписки: shostak.uliyay@yandex.ru

НИКУЛИН Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 6857-8773

AuthorID (РИНЦ): 244267

ШОСТАК Петр Алексеевич, студент гр. БМТ2-21М факультета «Биомедицинская техника».

SPIN-код: 1669-9827

AuthorID (РИНЦ): 1036289

Адрес для переписки: shostak.petyay@yandex.com

ЦАКАДЗЕ Георгий Тамазиевич, магистр по направлению «Технологические машины и оборудование».

SPIN-код: 8841-7363

AuthorID (РИНЦ): 1100257

Адрес для переписки: tsksv2@gmail.com

СВИЧКАРЬ Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 4532-7592

AuthorID (РИНЦ): 579811

Для цитирования

Шостак Ю. А., Никулин Н. К., Шостак П. А., Цакадзе Г. Т., Свичкарь Е. В. Исследование межступенчатого канала комбинированного турбомолекулярного насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 9–17. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-9-17.

Статья поступила в редакцию 25.01.2021 г.

© Ю. А. Шостак, Н. К. Никулин, П. А. Шостак, Г. Т. Цакадзе, Е. В. Свичкарь

STUDY OF INTERSTAGE CHANNEL OF HYBRID TURBOMOLECULAR PUMP

J. A. Shostak, N. K. Nikulin, P. A. Shostak, G. T. Tsakadze, E. V. Svichkar

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5/1, 105005

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 article defines both a probability for gas molecules to pass through the interstage channel of a hybrid turbomolecular pump in forward and backward direction. The effect of the movable walls limiting the channel is taken into account. Results and, accordingly, recommendations, given in the article, can be used in designing a flow passage of the hybrid turbomolecular pumps. The dependencies of a probability for gas molecules to pass through the interstage canal on the relative parameters determining the geometry and dynamics of the channel walls are given.

Keywords: turbomolecular pump, probability, conductivity, mathematical model, Monte-Carlo method, pumping performance.

References

1. Kalinkin D. A., Belova O. V., Andreev R. O. Investigation of gas permeability of fibrous composite material in a vacuum // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2007, Issue 1. 030034. DOI: 10.1063/1.5051895. (In Engl.).
2. Demikhov K. E., Ochkov A. A., Kemenov V. N. [et al.]. Development of the calculation algorithm of the flow part main parameters of the ring straight-flow ejector // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2285, Issue 1. 030030. DOI: 10.1063/5.0030046. (In Engl.).
3. Dukhopel'nikov D. V., Riazanov V. A., Vorob'ev E. V. [et al.]. Effective sputtering yields of titanium, titanium nitride, and molybdenum induced by nitrogen ions and ions of nitrogen-oxygen mixtures // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10. P. 1202–1207. DOI: 10.1134/S1027451016050712. (In Engl.).
4. Dukhopel'nikov D. V., Kirillov D. V., Bulychev V. S. Characteristics of silicon microdroplets in coatings deposited by vacuum arc evaporation // Polymer Science Series D. 2016. Vol. 9. P. 238–242. DOI: 10.1134/S1995421216020040. (In Engl.).
5. Dukhopel'nikov D. V., Riazanov V. A., Plotnikova O. P. Effective sputtering yields of alloys chromel and kopel with argon ions in magnetron sputtering system // Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1313(1). 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1313/1/012015. (In Engl.).
6. Demikhov K. E., Nikulin N. K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 312 p. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746. (In Russ.).
7. Ochkov A., Hamadi M. Development prospects of high-vacuum mechanical pumps using magnetic bearing support // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 963. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/963/1/012035. (In Engl.).
8. Vakuumnaya tekhnika: spravochnik [Vacuum technology: handbook] / Eds.: K. E. Demikhov, Yu. V. Panfilov. 3d ed. Moscow, 2009. 589 p. ISBN 978-5-94275-436-5. (In Russ.).
9. Demikhov K. E., Makarov A. M., Nikulin N. K. [et al.]. Metodika rascheta otkachnoy kharakteristiki kineticheskogo vysokovakuumnogo nasosa [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 (17). P. 47. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-765. (In Russ.).
10. Becker W. The turbomolecular pump, its design, operation and theory; calculation of the pumping speed for various gases and their dependence on the forepump // Vacuum. 1966. Vol. 16, Issue 11. P. 625–632. DOI: 10.1016/0042-207X(66)91425-4. (In Engl.).
11. Kwon M.-K., Hwang Y.-K. An experimental study of the pumping performance of molecular drag pumps // Journal of Mechanical Science and Technology. 2006. Vol. 20, Issue 9. P. 1483–1491. DOI: 10.1007/BF02915971. (In Engl.).
12. Buslenko N. P., Golenko D. I., Sobol I. M. [et al.]. Metod statisticheskikh ispytaniy (metod Monte-Karlo) [Statistical test method (Monte Carlo method)]. Moscow, 1962. 331 p. (In Russ.).
13. Nesterov S. B., Burmistrov A. V., Androssov A. V. [et al.]. Metody rascheta slozhnykh vakuumnykh sistem [Methods for calculating complex vacuum systems] / Eds.: S. B. Nesterov, A. V. Burmistrov. Moscow, 2012. 373 p. ISBN 978-5-94836-337-0. (In Russ.).
14. Nikulin N. K., Mishustin V. A., Shostak J. A. Opredeleniye peretekaniy gaza cherez tortsovyi zazor v diskovom vakuumnom nasose [Determination of gas overflows through the end gap in a disk vacuum pump] // Mashiny i ustanovki: proyektirovaniye, razrabotka i ekspluatatsiya. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2015. No. 6. P. 15–39. (In Russ.).
15. Burmistrov A. V., Bronshteyn M. D., Salikeyev S. I. [et al.]. Raschet provodimosti profil'nogo kanala spiral'nogo vakuumnogo nasosa pri molekulyarnom rezhime techeniya gaza [Calculation of the conductivity of a profile channel of a spiral vacuum pump in a molecular mode of gas flow] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2013. No. 9-10. P. 3–10. (In Russ.).
16. Sawada T. Axial flow molecular pump // The Japan Society of Mechanical Engineers. 1973. Vol. 16, Issue 96. P. 993–1001. (In Engl.).

SHOSTAK Julia Alekseevna, Graduate Student of Vacuum and Compressor Equipment Department.

SPIN-code: 3899-2625

AuthorID (RSCI): 963095

Address for correspondence: shostak.uliya@yandex.ru

NIKULIN Nikolai Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department.

SPIN-code: 6857-8773

AuthorID (RSCI): 244267

SHOSTAK Petr Alekseevich, student of BMT2-21M group, faculty of Biomedical Engineering.

SPIN-code: 1669-9827

AuthorID (RSCI): 1036289

TSAKADZE Georgy Tamazievich, Master in Technological Machines and Equipment.

SPIN-code: 8841-7363

AuthorID (RSCI): 1100257

SVICHKAR Elena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department.

SPIN-code: 4532-7592

AuthorID (RSCI): 579811

For citations

Shostak J. A., Nikulin N. K., Shostak P. A., Tsakadze G. T., Svichkar E. V. Study of interstage channel of hybrid turbomolecular pump // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 9–17. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-9-17.

Received January 25, 2021.

© J. A. Shostak, N. K. Nikulin, P. A. Shostak, G. T. Tsakadze, E. V. Svichkar