

ВЛИЯНИЕ МЕЖСТУПЕНЧАТОГО КАНАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СТУПЕНИ КОМБИНИРОВАННОГО ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО НАСОСА

Ю. А. Шостак¹, Н. К. Никулин¹, Г. Т. Цакадзе¹,
П. А. Шостак¹, А. М. Шостак²

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

²Абхазский государственный университет,
Республика Абхазия, 384904, г. Сухум, ул. Университетская, д. 1

Одним из факторов, оказывающих влияние на эффективность молекулярной ступени в составе комбинированного ТМН является межступенчатый канал. Исследуется влияние параметров канала на откачную характеристику молекулярной ступени. Предложенный подход позволяет проводить расчет откачной характеристики молекулярной ступени с учетом воздействия на процесс откачки межступенчатого соединительного канала. Приведено сравнение откачных характеристик молекулярной ступени, полученных при расчетах с учетом канала и без учета. Приводится оценка эффективности молекулярной ступени в составе комбинированного ТМН в зависимости от геометрических и динамических параметров канала. Изложенные результаты и рекомендации позволяют расширить диапазон рабочих давлений всасывания турбомолекулярного насоса посредством исключительно параметров соединительного канала.

Ключевые слова: турбомолекулярный насос, молекулярный насос, проводимость канала, объемный поток газа, канал с движущимися стенками, откачная характеристика, сопротивление, течение газа.

Введение

Высоковакуумные системы с турбомолекулярными насосами (ТМН) широко применяются в различных областях науки и промышленности [1–5]. Откачная характеристика вакуумной системы на базе ТМН в большей степени определяется откачной характеристикой высоковакуумного насоса.

До настоящего времени интерес вызывает расширение диапазона рабочих давлений ТМН. Расширение диапазона рабочих давлений ТМН в область высоких давлений всасывания позволяет снизить требования по давлению всасывания, предъявляемые к форвакуумным насосам (ФН), и использовать в составе высоковакуумной системы более простые, экономически доступные ФН, например, мембранные, спиральные, а также ФН меньшей быстроты действия. В связи с этим начали применяться и обрели широкое распространение комбинированные проточные части ТМН.

Типичная откачная характеристика комбинированной проточной части (ПЧ) с молекулярными ступенями различной производительности представлена на рис. 1, $S_1 > S_2 > S_3$.

Становится очевидным, что с увеличением быстроты действия молекулярной ступени расширяется диапазон давлений всасывания насоса в сторону больших давлений, т.е. чем больше быстрота действия молекулярной ступени, тем шире диапазон давлений на стороне всасывания ТМН. Таким образом, можно прийти к выводу, что расширить диапазон рабочих давлений на стороне всасывания можно за счет параметров молекулярной ступени.

На сегодняшний день расширение диапазона рабочих давлений за счет молекулярной ступени реализуется следующими способами:

— совершенствуются собственно ПЧ молекулярных ступеней. В составе комбинированного насоса применяются молекулярные ПЧ с улучшенными параметрами;

— в составе комбинированного насоса применяются молекулярные ступени быстроты действия большей, чем достаточная для обеспечения молекулярного режима за последним колесом турбоступени.

Однако данными способами не ограничиваются все возможные.

К вопросу о том, что совершенствуются сами по себе ПЧ молекулярных ступеней, можно отметить следующее. Создан ряд математических моделей для расчета МВН [3, 5–8] разрабатываются методики решения оптимизационных задач [9, 10]; даже предложена схема гибридного МВН, который состоит из ступеней различных типов [11]. В 2010 году компанией Agilent Technologies [12] была представлена технология TwisTorr (рис. 2), которая является модернизацией МВН Зигбана [13] и отличается тем, что переносное движение рабочего газа протекает не только по направлению от внешней части насоса к оси вращения ротора, но и в противоположном. Направления переноса газа чередуются в молекулярных ступенях TwisTorr. Быстрота действия и отношение давлений, обеспечиваемые ступенью, зависят от конструкции статорных дисков, в частности от числа спиральных каналов и угла закрутки спирали. Применением конструкции TwisTorr была

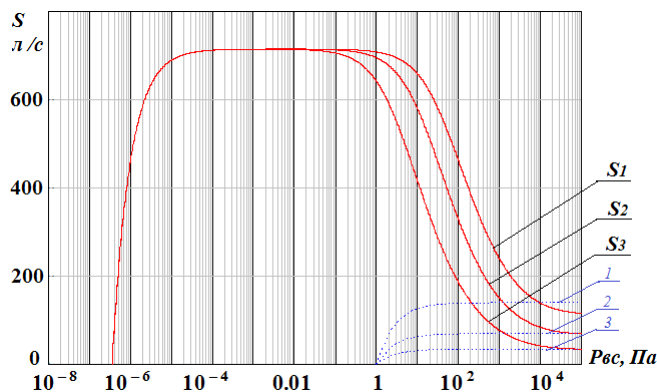


Рис. 1. Откачная характеристика комбинированного ТМН при работе с молекулярной ступенью быстроты действия S_1 , S_2 и S_3 ; $S_1 > S_2 > S_3$; 1, 2, 3 — откачные характеристики форвакуумного насоса при работе с молекулярной ступенью быстроты действия S_1 , S_2 и S_3 соответственно
 Fig. 1. Pumping characteristics of a hybrid TMP equipped with molecular drag stages with pumping speeds S_1 , S_2 and S_3 ; $S_1 > S_2 > S_3$

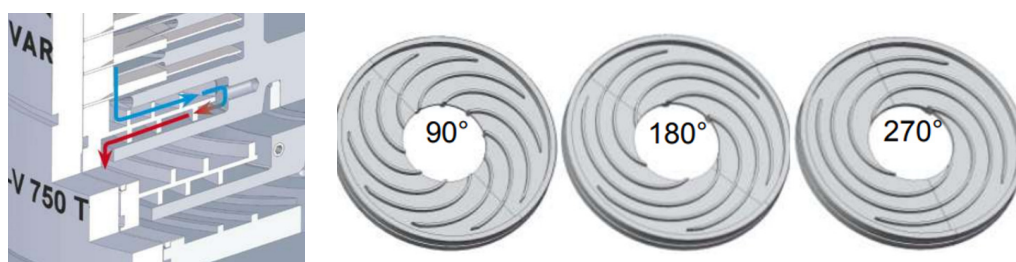


Рис. 2. Схема молекулярной ступени по технологии TwisTorr компании Agilent Technologies
 Fig. 2. Diagram of molecular stage using TwisTorr technology of Agilent Technologies Company

достигнута возможность повышения отношения давлений, создаваемого молекулярной ступенью до 500 раз.

К вопросу применения в составе комбинированного насоса второй ступени большей быстроты действия, чем достаточная для обеспечения молекулярного режима за последним колесом ТМН, отметим следующее. Имеет место существенный недостаток: с увеличением быстроты действия молекулярной ступени увеличиваются общие габариты комбинированного ТМН, за которые в настоящее время ведется конкурентная борьба между производителями.

Следовательно, целесообразно проводить дальнейший анализ ситуации на наличие факторов, которые влияют на эффективность молекулярной ступени в составе комбинированного ТМН, и выяснять, каким образом возможно повлиять на эффективность молекулярной ступени, оперируя выявленными факторами.

Постановка задачи

В процессе аналитического поиска факторов, оказывающих влияние на эффективность молекулярной ступени, был обнаружен такой фактор, как межступенчатый канал.

Межступенчатый канал является элементом, соединяющим осевую и молекулярные ступени комбинированной ПЧ, и присутствует в ПЧ каждого комбинированного ТМН. В общем случае межступенчатый канал представляет собой сопротивление, локализованное на входе в молекулярную ступень.

Направление потока газа в канале определяется расположением области входа в молекулярную ступень, то есть конструкцией молекулярной ступени, и может быть любым. Так, например, вариант конструктивной схемы с применением ступени TwisTorr, приведенный на рис. 2, и конструкция комбинированных ТМН со ступенью Хольвека [14] на примере серии насосов Turbovac компании Leybold [15] предполагают входную область во вторую ступень в периферийной части, при этом направление потока газа в межступенчатом канале осуществляется практически в осевом направлении (рис. 3а). При применении ступени TwisTorr в конфигурации, приведенной на (рис. 3б), поток в межступенчатом канале направлен от периферии к центру в радиальном направлении (обозначено красным).

В случае осевого направления потока газа в межступенчатом канале или «от центра к периферии» результат воздействия межступенчатого канала в виде сопротивления потоку газа будет проявляться в меньшей степени, чем при движении газа в канале в направлении «от периферии к центру». Такое направление потока в межступенчатом канале наблюдается в комбинации турбоступени с TwisTorr или с дисковым молекулярным вакуумным насосом (ДМВН). Этим фактом обусловлен выбор молекулярной ступени дискового типа (ДМВН) в качестве рассматриваемой в данной работе, конструкция которой предполагает движение газа в межступенчатом канале в радиальном направлении, т.е. от внешней части насоса к оси вращения ротора, как показано на рис. 3в.

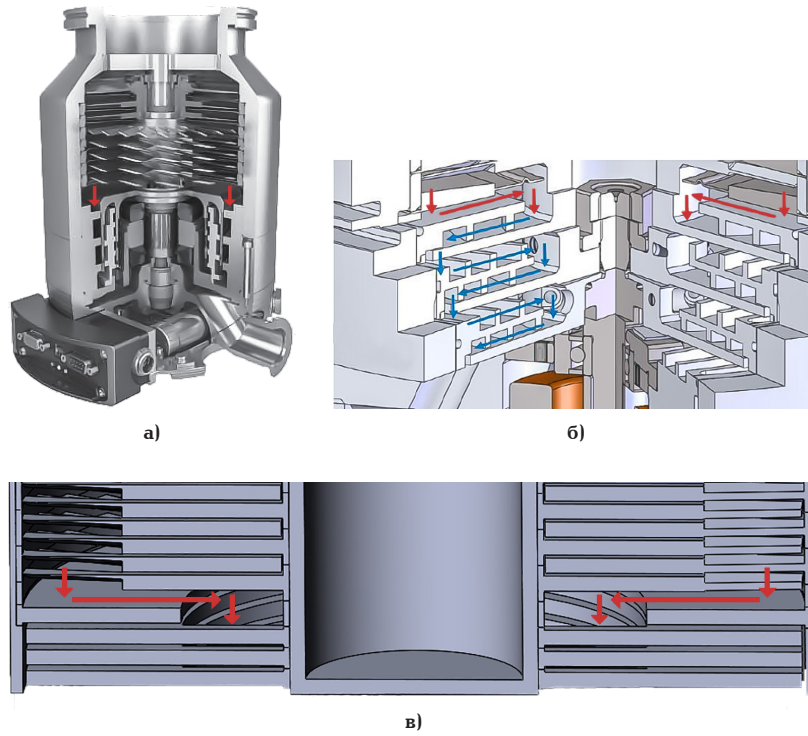


Рис. 3. Направление потока газа в межступенчатом канале:
 а) конструктивная схема ТМН Turbovac компании Leybold;
 б) конструктивная схема гибридного ТМН с второй ступенью типа TwisTorr компании Agilent Technologies; в) конструктивная схема гибридного ТМН с второй ступенью дискового типа (ДМВН)
 Fig. 3. Gas flow direction in the interstage channel:
 a) construction diagram of TMP Turbovac of Leybold company;
 b) construction diagram of hybrid TMP equipped with second TwisTorr stage;
 c) construction diagram of hybrid TMP equipped with second disk type stage/(DMDP)

Расчет откачной характеристики молекулярной ступени с учетом воздействия межступенчатого канала

В общем случае откачная характеристика молекулярной ступени рассчитывается по выбранной исследователем методике расчета соответствующего типа молекулярных насосов. В данной работе расчет откачной характеристики молекулярной ступени дискового типа (ДМВН-ступени) производился представленным ниже способом.

Откачная характеристика ДМВН-ступени без учета канала (рис. 4):

$$S_{\text{ДМВН}}(p_{\text{вс.ДМВН}}) = \frac{\tau_{\text{max.ДМВН}} \cdot p_{\text{ф}}}{\tau_{\text{max.ДМВН}} \cdot p_{\text{вс.ДМВН}} - 1}, \quad (1)$$

где $S_{\text{max.ДМВН}}$ — максимальная быстрота действия дисковой молекулярной ступени, м³/с; $\tau_{\text{max.ДМВН}}$ — максимальное отношение давлений, создаваемое молекулярной ступенью; $p_{\text{ф}}$ — форвакуумное давление, Па; $p_{\text{вс.ДМВН}}$ — давление всасывания дисковой ступени, Па.

Максимальная быстрота действия $S_{\text{max.ДМВН}}$ и максимальное отношение давлений $\tau_{\text{max.ДМВН}}$ дисковой ступени для N рабочих дисков:

$$S_{\text{max.ДМВН}} = \frac{1}{4} \vartheta_{\text{cp}} (k_{1\text{Д}} F_{1\text{Д}} - k_{1\text{2Д}} F_{2\text{Д}}) + (N-1) \cdot \frac{1}{4} \vartheta_{\text{cp}} (k_{2\text{1Д}} F_{1\text{Д}} - k_{2\text{2Д}} F_{2\text{Д}}); \quad (2)$$

$$\tau_{\text{max.ДМВН}} = \frac{k_{1\text{Д}} F_{1\text{Д}} + (N-1) k_{2\text{1Д}} F_{1\text{Д}}}{k_{1\text{2Д}} F_{2\text{Д}} + (N-1) k_{2\text{2Д}} F_{2\text{Д}}}, \quad (3)$$

где ϑ_{cp} — средняя арифметическая скорость дви-

жения молекул газа, $\vartheta_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$; T — температура

газа, К; M — молярная масса рабочего газа (расчет производился по азоту), кг/кмоль; R — универсальная газовая постоянная; $k_{1\text{Д}}$ — вероятность перехода молекул газа через первое междисковое пространство в прямом направлении; $k_{2\text{1Д}}$ — вероятность перехода молекул газа через второе и последующие междисковые пространства в прямом направлении; $k_{2\text{2Д}}$ — вероятность перехода молекул газа через второе и последующие междисковые пространства в обратном направлении; $k_{1\text{2Д}}$ — вероятность перехода молекул газа через первое междисковое пространство в обратном направлении; $F_{1\text{Д}}$ — площадь входного отверстия в дисковую молекулярную ступень; $F_{2\text{Д}}$ — площадь выходного отверстия в дисковой молекулярной ступени.

Прямой Q_{12} и обратный Q_{21} поток молекул газа через межступенчатый канал:

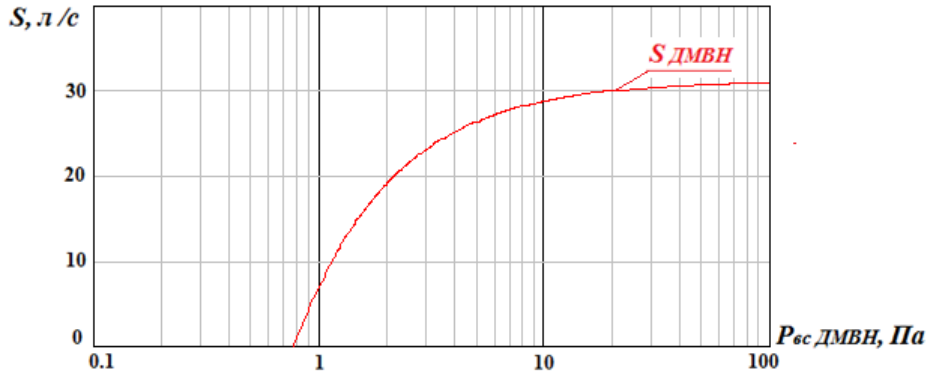


Рис. 4. Откачная характеристика ДМВН
Fig. 4. DMDP pumping performance

$$Q_{12} = \frac{1}{4} k_{1K} \vartheta_{cp} F_{1K} P_{н.ТМН}; \quad (4)$$

$$Q_{21} = \frac{1}{4} k_{2K} \vartheta_{cp} F_{2K} P_{вс.ДМВН}, \quad (5)$$

где F_{1K} — площадь входного отверстия в межступенчатый канал; F_{2K} — площадь выходного отверстия из межступенчатого канала, $F_{2K} = F_{1K} \cdot p_{н.ТМН}$ — давление нагнетания турбомолекулярной ступени, т.е. давление во входном сечении межступенчатого канала; k_{1K} — вероятность перехода молекул газа через межступенчатый канал в прямом направлении; k_{2K} — вероятность перехода молекул газа через межступенчатый канал в обратном направлении.

Вероятность перехода через междисковые пространства и через межступенчатый канал рассчитывается по методике, изложенной в работах [16, 17]. Метод расчета и допущения аналогичны примененным при моделировании процесса течения газа в канале в вышеуказанных работах.

Результирующий поток газа в межступенчатом канале определяется как разность прямого и обратного потоков:

$$Q_U = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{1K} F_{1K} P_{н.ТМН} - k_{2K} F_{2K} P_{вс.ДМВН})$$

или

$$Q_U = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} P_{н.ТМН} (k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K} \tau_K), \quad (6)$$

где τ_K — отношение давлений в межступенчатом канале, $\tau_K = \frac{P_{вс.ДМВН}}{P_{н.ТМН}}$.

По определению потока молекул газа через сечение, который равен $Q = Sp$ [18, с. 51], разделив Q_U на давление во входном сечении канала $P_{н.ТМН}$, получим быстроту откачки во входном сечении канала:

$$S_K = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} (k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K} \tau_K). \quad (7)$$

Поток газа на всасывании ДМВН определяется уравнением:

$$Q_{ДМВН} = S_{ДМВН} \cdot P_{вс.ДМВН}. \quad (8)$$

Из условия равенства газового потока в каждом сечении поток газа на выходе из ТМН-ступени (на входе в межступенчатый канал) равен потоку газа на входе в ДМВН-ступень:

$$Q_U = Q_{ДМВН} \quad (9)$$

или

$$S_K \cdot P_{н.ТМН} = S_{ДМВН} \cdot P_{вс.ДМВН}. \quad (10)$$

С учетом уравнений (6) – (10), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \vartheta_{cp} \left(k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K} \frac{P_{вс.ДМВН}}{P_{н.ТМН}} \right) \cdot P_{н.ТМН} &= \\ &= S_{ДМВН} \cdot P_{вс.ДМВН}. \end{aligned} \quad (11)$$

Путем преобразований из (11) получаем давление во входном сечении канала, равное давлению нагнетания турбомолекулярной ступени $P_{н.ТМН}$ в зависимости от давления всасывания ДМВН $P_{вс.ДМВН}$:

$$\begin{aligned} P_{н.ТМН} (P_{вс.ДМВН}) &= \\ &= \frac{P_{вс.ДМВН} \left(S_{ДМВН} + \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{2K} F_{2K} \right)}{\frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{1K} F_{1K}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Быстрота откачки во входном сечении канала:

$$\begin{aligned} S_K (P_{вс.ДМВН}) &= \\ &= \frac{1}{4} \vartheta_{cp} \left(k_{1K} F_{1K} - k_{2K} F_{2K} \frac{P_{вс.ДМВН}}{P_{н.ТМН} (P_{вс.ДМВН})} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Зависимость быстроты откачки от давления во входном сечении канала $S_K = f(P_{н.ТМН}(P_{вс.ДМВН}))$ представляет собой откачную характеристику дисковой молекулярной ступени с учетом канала.

Проводимость канала, ограниченного неподвижными поверхностями (рис. 5):

$$U_K = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{1K} F_{1K} = \frac{1}{4} \vartheta_{cp} k_{2K} F_{2K}. \quad (14)$$

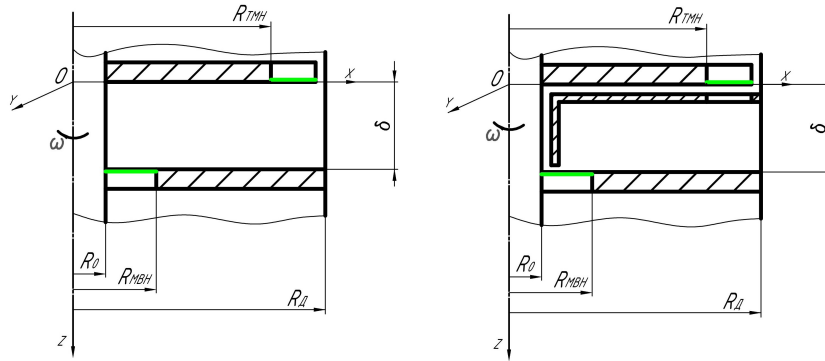


Рис. 5. Геометрические параметры межступенчатого канала
Fig. 5. Geometric parameters of the interstage channel

Быстрота откачки во входном сечении канала в статорном исполнении:

$$S_K(p_{вс.ДМВН}) = \frac{1}{4} g_{cp} k_{1K} F_{1K} (1 - \tau_K(p_{вс.ДМВН})) \quad (15)$$

или

$$S_K(p_{вс.ДМВН}) = \frac{1}{4} g_{cp} k_{1K} F_{1K} \left(1 - \frac{p_{вс.ДМВН}}{p_{н.ТМН}(p_{вс.ДМВН})} \right). \quad (16)$$

Для выявления влияния канала выполняется расчет откачных характеристик ДМВН-ступени с учетом канала при его различных геометрических и скоростных параметрах. Каналы разбиваются по типам. К каждому типу относится канал, обладающий определенными признаками, в числе которых:

- 1) граничное условие на поверхности последнего колеса ТМН-ступени;
 - 2) граничное условие на цилиндрической поверхности ротора;
 - 3) относительная ширина канала $\delta_K / (R_{ТМН} - R_{ДМВН})$.
- Геометрические параметры δ_K , $R_{ТМН}$, $R_{ДМВН}$, R_0 приведены на рис. 5.

Безразмерная скорость подвижных поверхностей определяется отношением u/v_n ; где u — окружная скорость на наружном диаметре рабочих колес и дисков, ротора; v_n — наиболее вероятная скорость теплового движения молекул рабочего газа.

Граничное условие на поверхности последнего колеса ТМН-ступени может формулироваться в 2-х вариантах:

— $u_1/v_n = 0$, что соответствует неподвижной поверхности, ограничивающей канал со стороны осевой ступени (конструктивно, например, установка последнего колеса турбоступени статорным, постановка статорного экранирующего диска или экранизация кольцевой подвижной поверхности последнего колеса ТМН-ступени, радиуса $R_{ТМН} - R_0$ иными способами);

— $u_1/v_n \neq 0$, что соответствует подвижной кольцевой поверхности последнего колеса ТМН-ступени.

Аналогично формулируется граничное условие на цилиндрической поверхности ротора: $u_2/v_n = 0$ или $u_2/v_n \neq 0$.

Фиксируется значение величины относительной ширины $\delta_K / (R_{ТМН} - R_{ДМВН})$ для каждого типа канала.

Таким образом формируется упорядоченный набор типов межступенчатого канала, возможных

к применению для соединения данных осевой и молекулярной ступеней и строятся откачные характеристики ДМВН с учетом канала различных типов.

Откачная характеристика ДМВН с учетом канала i -го типа:

$$S_{Ki}(p_{вс.МВН}) = \frac{1}{4} g_{cp} \left(k_{i1K} F_{1K} - k_{i2K} F_{2K} \frac{p_{вс.МВН}}{p_{н.ТМН}(p_{вс.МВН})} \right), \quad (17)$$

где k_{i1K} — вероятность перехода молекул газа через межступенчатый канал в прямом направлении для канала i -го типа; k_{i2K} — вероятность перехода молекул газа через межступенчатый канал в обратном направлении для канала i -го типа; $p_{н.ТМН}$ — давление нагнетания ТМН-ступени при применении канала i -го типа, Па.

Оценка влияния межступенчатого канала на откачную характеристику молекулярной ступени

Для оценки влияния межступенчатого канала на откачную характеристику ДМВН рассматриваются каналы 4-х типов, параметры которых приведены в табл. 1. Проанализировав влияние относительной ширины канала [17, с. 13], можно заключить, что при величинах относительной ширины канала, больших 1,5–2, вероятность перехода практически прекращает возрастать и асимптотически стремится к постоянному значению, при котором, соответственно, проводимость канала достигает своего максимального значения. Дальнейшее расширение канала практически не оказывает влияния на вероятность перехода и проводимость. В связи с этим принимается к рассмотрению канал с верхним граничным значением относительной ширины, равным 2. Нижнее граничное значение относительной ширины принимается равным 0,3 из конструктивных соображений.

Откачные характеристики ДМВН-ступени с учетом канала приведены на рис. 6; характер которых демонстрирует, что воздействие канала приводит к снижению эффективности молекулярной ступени.

Количественная оценка влияния канала на откачную характеристику может быть проведена определением величины снижения быстроты действия ДМВН-ступени за счет сопротивления канала, определяемой следующим образом:

Таблица 1. Эффективность ДМВН-ступени с каналом
Table 1. Efficiency of the DMDP-stage with the channel

№ типа канала	Граничное условие на поверхности		Относительная ширина канала $\delta_K/(R_{ТМН}-R_{ДМВН})$	Снижение быстроты действия, % $\delta S_{ДМВН} = \frac{S_{ДМВН} - S_{Ki}}{S_{ДМВН}} \cdot 100\%$	
	последнее колесо ТМН-ступени	цилиндрическая поверхность ротора		$P_{вс, ДМВН} = 10$ Па	$P_{вс, ДМВН} = 5$ Па
1	$u_1/v_H \neq 0$ $u_1/v_H = 1,3$	$u_2/v_H \neq 0$ $u_2/v_H = 1,3$	0,3	63,6	63,2
2	$u_1/v_H \neq 0$ $u_1/v_H = 1,3$	$u_2/v_H \neq 0$ $u_2/v_H = 1,3$	2	45,8	45,7
3	$u_1/v_H = 0$	$u_2/v_H = 0$	0,3	31,6	30,5
4	$u_1/v_H = 0$	$u_2/v_H = 0$	2	10,3	10,1

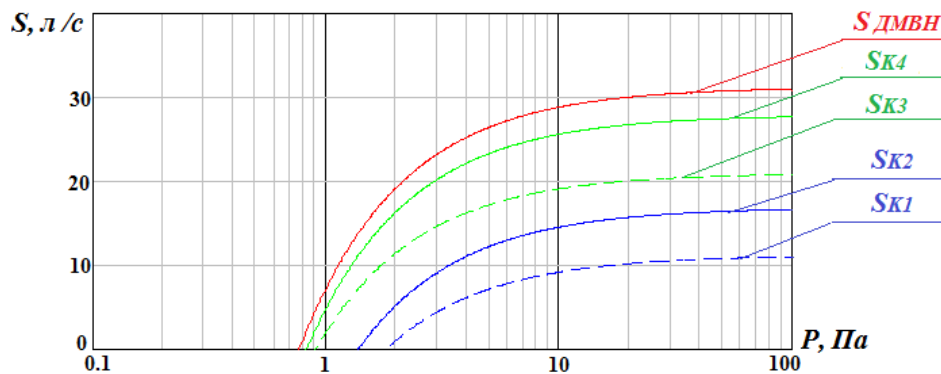


Рис. 6. Откачная характеристика ДМВН-ступени:

$S_{ДМВН}$ — без учета канала; S_{K1} — с учетом канала 1-го типа;
 S_{K2} — с учетом канала 2-го типа; S_{K3} — с учетом канала 3-го типа;
 S_{K4} — с учетом канала 4-го типа; $p_\phi = 10$ Па

Fig. 6. DMDP pumping performance:

$S_{ДМВН}$ is the pumping speed excluding the channel;
 S_{K1} is the pumping speed including the first type channel;
 S_{K2} is the pumping speed including the second type channel;
 S_{K3} is the pumping speed including the third type channel;
 S_{K4} is the pumping speed including channel of the fourth type at $p_\phi = 10$ Pa

$$\delta S_{ДМВН} = \frac{S_{ДМВН} - S_{Ki}}{S_{ДМВН}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Заключение

Межступенчатый канал снижает эффективность молекулярной ступени комбинированного ТМН в диапазоне от 10 до 60% в зависимости от параметров канала. В среднем компромиссном случае, принимая во внимание все критерии, на 20%. При расчете и проектировании межступенчатого канала рекомендуется исходить из того, что проводимость канала должна превышать быстроту действия молекулярной ступени не менее чем в 5–10 раз.

Список источников

1. Демихов К. Е., Никулин Н. К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов: моногр. Кишинев: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 312 с. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746.
2. Dolcino L. TwisTorr molecular drag pumping technology. A new Technology for high performance Turbomolecular Drag Pumps. Santa Clara: Agilent Technologies GmbH, 2010. P. 1–26.

3. Kloss Yu. Yu., Martynov D. V., Cheremisin F. G. Computer simulation and analysis of the Holweck pump in the transient regime // Technical Physics. 2012. Vol. 57, Issue 4. P. 451–456. DOI: 10.1134/S1063784212040159.
4. Giors S., Campagna L., Emelli E. New spiral molecular drag stage design for high compression ratio, compact turbomolecular-drag pumps // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2010. Vol. 28, Issue 4. P. 931–936. DOI: 10.1116/1.3386591.
5. Nanbu K., Kubota H., Igarashi S., Urano, C., Enosawa H. Performance of spiral grooves on a rotor of turbomolecular pump // Trans. JSME. 1991. Vol. 57, Issue 3. 533. P. 172–177.
6. Skovorodko P. A. Free molecular flow in the Holweck pump // AIP Conf. Proc. 2001. Vol. 585. P. 900–902.
7. Cheng H.-P., Jou R.-Y., Chen F.-Z. [et al.]. Three-dimensional flow analysis of spiral-grooved turbo booster pump in slip and continuum flow // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2000. Vol. 18, Issue 2. P. 543–551. DOI: 10.1116/1.582221.
8. Panos C. N., Antoniou A. G., Valamontes S. E. The helicoid multi-groove vacuum pump in both viscous and molecular states // Vacuum. 1994. Vol. 45, Issue 8. P. 841–847. DOI: 10.1016/0042-207X(94)90121-X.
9. Демихов К. Е. Особенности оптимизации проточной части высоковакуумных механических насосов в широком диапазоне давлений // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. № 3 (88). С. 80–86.
10. Демихов К. Е., Очков А. А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных ваку-

умных насосов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5 (17). С. 32–41.

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. Audi M., Giors S., Gotta R. The state of the art in Molecular-Drag Turbo-pump Technology // Agilent Technologies Vacuum Products Division. Santa Clara: Agilent Technologies GmbH, 2011. P. 1–26.

13. Siegbahn M. A New design for a high vacuum pump // Ark. Matematik Astronomy Physik. 1943. Vol. 30b. P. 261–270.

14. Giors S., Colombo E., Inzoli F. [et al.]. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2006. Vol. 24, Issue 4. P. 1584–1591. DOI: 10.1116/1.2178362.

15. Leybold GmbH. Full line catalog. Vacuum components and vacuum technology. Koln: Leybold GmbH, 2021. 1046 p. URL: <https://www.leybold.com/epaper/en/#1> (дата обращения: 03.06.2021).

16. 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.

17. 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.

18. Вакуумная техника: справочник / под ред. К. Е. Демидова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2009. 589 с. ISBN 978-5-94275-436-5.

ШОСТАК Юлия Алексеевна, аспирант кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследова-

тельского университета) (МГТУ им. Н. Э. Баумана), г. Москва.

SPIN-код: 3899-2625

AuthorID (РИНЦ): 963095

Адрес для переписки: shostak.uliya@yandex.ru

НИКУЛИН Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.

SPIN-код: 6857-8773

AuthorID (РИНЦ): 244267

ЦАКАДЗЕ Георгий Тамазиевич, магистр по направлению «Технологические машины и оборудование», МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.

SPIN-код: 8841-7363

AuthorID (РИНЦ): 1100257

Адрес для переписки: tsk.sv2@gmail.com

ШОСТАК Петр Алексеевич, студент гр. БМТ2-21М факультета «Биомедицинская техника», МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.

SPIN-код: 1669-9827

AuthorID (РИНЦ): 1036289

Адрес для переписки: shostak.petya@yandex.com

ШОСТАК Алексей Михайлович, старший преподаватель кафедры «Механизации сельского хозяйства» Абхазского государственного университета, г. Сухум, Республика Абхазия.

Для цитирования

Шостак Ю. А., Никулин Н. К., Цакадзе Г. Т., Шостак П. А., Шостак А. М. Влияние межступенчатого канала на эффективность молекулярной ступени комбинированного турбомолекулярного насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 45–53. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-45-53.

Статья поступила в редакцию 17.06.2021 г.

© Ю. А. Шостак, Н. К. Никулин, Г. Т. Цакадзе, П. А. Шостак, А. М. Шостак

THE INFLUENCE OF INTERSTAGE CHANNEL ON EFFICIENCY OF MOLECULAR DRAG STAGE IN HYBRID TURBOMOLECULAR PUMP

J. A. Shostak¹, N. K. Nikulin¹, G. T. Tsakadze¹,
P. A. Shostak¹, A. M. Shostak²

¹Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya St., 5/1, 105005
²Abkhaz State University,
Abkhazia, Sukhum, Universitetskaya St., 1, 384904

The interstage channel is one of the factors affecting the efficiency of the molecular drag stage in a hybrid turbomolecular pump (TMP). The influence of parameters of the channel on the pumping performance of the molecular drag stage is investigated. The offered approach allows calculating the pumping performance of a molecular drag stage taking into account the effect of the interstage connecting channel on the pumping process. The comparison of the pumping characteristics of a molecular drag stage obtained in calculation taking into account the effect of the channel and excluding it is given. This article assesses the efficiency of the molecular drag stage in a hybrid TMP depending on geometric and dynamic parameters of the channel. The outcomes and recommendations allow to expand the range of working pressures of a hybrid TMP exclusively by means of parameters of the connecting channel.

Keywords: turbomolecular pump, molecular drag pump, channel conductivity, volumetric gas flow, moving walls channel, pumping speed, resistance, gas flow.

References

1. Demikhov K. Ye., Nikulin N. K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Chisinau, 2013. 312 p. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746. (In Russ.).
2. Dolcino L. TwisTorr molecular drag pumping technology. A new Technology for high performance Turbomolecular Drag Pumps. Santa Clara: Agilent Technologies GmbH, 2010. P. 1–26. (In Engl.).
3. Kloss Yu. Yu., Martynov D. V., Cheremisin F. G. Computer simulation and analysis of the Holweck pump in the transient regime // *Technical Physics*. 2012. Vol. 57, Issue 4. P. 451–456. DOI: 10.1134/S1063784212040159. (In Engl.).
4. Giors S., Campagna L., Emelli E. New spiral molecular drag stage design for high compression ratio, compact turbomolecular-drag pumps // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2010. Vol. 28, Issue 4. P. 931–936. DOI: 10.1116/1.3386591. (In Engl.).
5. Nanbu K., Kubota H., Igarashi S., Urano, C., Enosawa H. Performance of spiral grooves on a rotor of turbomolecular pump // *Trans. JSME*. 1991. Vol. 57, Issue 3. 533. P. 172–177. (In Engl.).
6. Skovorodko P. A. Free molecular flow in the Holweck pump // *AIP Conf. Proc.* 2001. Vol. 585. P. 900–902. (In Engl.).
7. Cheng H.-P., Jou R.-Y., Chen F.-Z. [et al.]. Three-dimensional flow analysis of spiral-grooved turbo booster pump in slip and continuum flow // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2000. Vol. 18, Issue 2. P. 543–551. DOI: 10.1116/1.582221. (In Engl.).
8. Panos C. N., Antoniou A. G., Valamontes S. E. The helicoid multi-groove vacuum pump in both viscous and molecular states // *Vacuum*. 1994. Vol. 45, Issue 8. P. 841–847. DOI: 10.1016/0042-207X(94)90121-X. (In Engl.).
9. Demikhov K. Ye. Osobennosti optimizatsii protochnoy chasti vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov v shirokom diapazone davleniy [Peculiarities of optimization of flow part of high-vacuum mechanical pumps in the wide pressure range] // *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Seriya «Mashinostroyeniye». Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2012. No. 3 (88). P. 80–86. (In Russ.).
10. Demikhov K. Ye., Ochkov A. A. Programnoye obespecheniye optimizatsii osnovnykh parametrov turbomolekulyarnykh vakuumnykh nasosov [Software for turbomolecular vacuum pumps key parameters optimization] // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. No. 5 (17). P. 32–41. (In Russ.).
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. Audi M., Giors S., Gotta R. The state of the art in Molecular-Drag Turbo-pump Technology // *Agilent Technologies Vacuum Products Division*. Santa Clara: Agilent Technologies GmbH, 2011. P. 1–26. (In Engl.).
13. Siegbahn M. A New design for a high vacuum pump // *Ark. Matematik Astronomy Physik*. 1943. Vol. 30b. P. 261–270. (In Engl.).
14. Giors S., Colombo E., Inzoli F. [et al.]. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2006. Vol. 24, Issue 4. P. 1584–1591. DOI: 10.1116/1.2178362. (In Engl.).
15. Leybold GmbH. Full line catalog. Vacuum components and vacuum technology. Koln: Leybold GmbH, 2021. 1046 p. URL: <https://www.leybold.com/epaper/en/#1> (accessed: 03.06.2021). (In Engl.).
16. Nikulin N. K., Mishustin V. A., Shostak Yu. 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. Mashiny i Ustanovki: Proyektirovaniye, Razrabotka i Ekspluatatsiya*. 2015. No. 6. P. 15–39. (In Russ.).

17. Shostak J. A., Nikulin N. K., Shostak P. A., Tsakadze G. T., Svichkar E. V. Issledovaniye mezhstupenchatogo kanala kombinirovannogo turbomolekulyarnogo nasosa [Study of interstage channel of hybrid turbomolecular pump] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *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. (In Russ.).

18. 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.).

SHOSTAK Julia Alekseevna, Graduate Student of E5 Vacuum and Compressor Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia.

SPIN-code: 3899-2625

AuthorID (RSCI): 963095

Correspondence address: shostak.uliya@yandex.ru

NIKULIN Nikolai Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of E5 Vacuum and Compressor Equipment Department, BMSTU, Moscow, Russia.

SPIN-code: 6857-8773

AuthorID (RSCI): 244267

TSAKADZE Georgy Tamazievich, Master in Technological Machines and Equipment, BMSTU, Moscow, Russia.

SPIN-code: 8841-7363

AuthorID (RSCI): 1100257

SHOSTAK Petr Alekseevich, Student gr. BMT2-21M of Biomedical Engineering Faculty, BMSTU, Moscow, Russia.

SPIN-code: 1669-9827

AuthorID (RSCI): 1036289

SHOSTAK Aleksey Mikhailovich, Senior Lecturer of Agricultural Mechanization Department, Abkhaz State University, Sukhum, Abkhazia.

For citations

Shostak J. A., Nikulin N. K., Tsakadze G. T., Shostak P. A., Shostak A. M. The influence of interstage channel on efficiency of molecular drag stage in hybrid turbomolecular pump // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 45–53. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-45-53.

Received June 17, 2021.

© J. A. Shostak, N. K. Nikulin, G. T. Tsakadze,
P. A. Shostak, A. M. Shostak