

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖСТУПЕНЧАТОГО КАНАЛА НА ОТКАЧНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ КОМБИНИРОВАННОГО ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО НАСОСА

### THE INFLUENCE OF INTERSTAGE CHANNEL PARAMETERS ON THE PUMPING PERFORMANCE OF HYBRID TURBOMOLECULAR PUMP

Ю.А.Шостак, (ORCID: 0000-0003-1234-8402), Н.К.Никулин, (ORCID: 0000-0000-0000-0000) / :shostak.uliya@yandex.ru"ru

J.A.Shostak, N.K.Nikulin

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г.Москва

*Исследовано влияние геометрических и динамических параметров межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного турбомолекулярного насоса в молекулярном режиме течения газа. Приведено сравнение откачных характеристик системы на базе комбинированного турбомолекулярного насоса, полученных при расчетах с учетом канала и без канала. Определены границы эффекта, оказываемого межступенчатым каналом на процесс откачки комбинированной проточной частью. Результаты исследования и рекомендации позволяют расширить диапазон рабочих давлений комбинированного турбомолекулярного насоса.*

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

*The influence of the geometric and dynamic parameters of the interstage channel on a combined turbomolecular pump performance in the molecular gas flow regime has been studied. A comparison of the pumping characteristics of a system based on a combined turbomolecular pump obtained from calculations with and without a channel is made. The boundaries of the effect exerted by the interstage channel on the pumping process by the combined flow path are determined. The results of the study and recommendations make it possible to expand the operating pressure range of the combined turbomolecular pump.*

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

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не существует теории, описывающей процесс откачки газа комбинированным турбомолекулярным насосом (далее ТМН) с учетом такого фактора, как влияние канала между осевой 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. Однако приобретение информации об эффекте, оказываемом обозначенным каналом, может позволить совершенствовать актуальные методы расчета комбинированных проточных частей ТМН [1, 2], повысить эффективность работы ТМН и расширить диапазон рабочих давлений.

Целью данной работы является исследование эффекта, оказываемого межступенчатым каналом на откачную характеристику комбинированного ТМН.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование течения газа в проточной части насоса реализуется схематизированным модульным принципом. При таком подходе сложная проточная часть или вакуумная система разбивается на «элементарные» объемы. Проточная часть условно разбивается на 3 блока: осевая ступень, молекулярная ступень и межступенчатый канал, как показано на рис. 1.

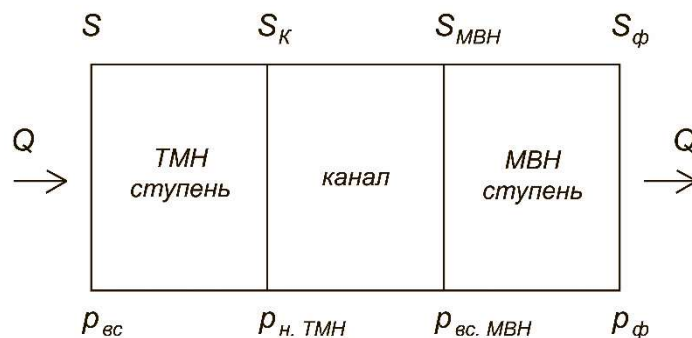


Рис. 1. Схема разбиения на модули проточной части комбинированного ТМН.  $S$  – быстрота откачки камеры;  $p_{вс}$  – давление в камере;  $S_K$  – быстрота откачки во входном сечении межступенчатого канала;  $p_{н.ТМН}$  – давление нагнетания ТМН-ступени;  $S_{МВН}$  – быстрота откачки на стороне всасывания МВН-ступени;  $p_{вс.МВН}$  – давление всасывания МВН-ступени;  $S_{\phi}$  – быстрота откачки на стороне нагнетания МВН-ступени;  $p_{\phi}$  – форвакуумное давление

В работе для исследования влияния параметров межступенчатого канала на откачную характеристику комбинированного ТМН в качестве осевой ступени рассматривается ТМН-700 (насос Turbo – V 701 Navigator Varian) со следующими параметрами [3]:

Максимальное отношение давлений ( $N_2$ )  $\tau_{max m} = 10^9$ . Максимальная быстрота действия ( $N_2$ ) составляет 690 л / с. Частота вращения ротора: 42000 об. / мин. Внутренний диаметр корпуса  $R_d = 250$  мм. Откачная характеристика ступени ТМН-700 приведена в [3]. Радиус основания лопаток последнего колеса ТМН  $R_{ТМН} = 0.75 R_d = 0.094$  м. ( $\lambda = 0.75$  - отношение начального диаметра лопаток к наружному).

Допущения:

- $S_{max ТМН} = const$ ;
- натекания вследствие негерметичности отсутствуют;
- отсутствует поток газовыделений с поверхностей форвакуумной полости;

По работам авторов Шнепп, Шерстюк, посвященным осевым вентиляторам с такими же рабочими колесами [4], максимальная быстрота действия в вязкостном режиме снижается незначительно (до 17 %).

Аппроксимирующая зависимость, полученная по экспериментальным данным автора Т. Sawada [5], отношения давлений, создаваемого ТМН-ступенью от давления на входе в молекулярную ступень:

$$\tau_{max .ТМН} (p_{вс.МВН}) = \tau_{max v} + \frac{\tau_{max m} - \tau_{max v}}{1 + \frac{0.75}{Kn}}$$

или

$$\tau_{\max.TMH}(p_{вс.МВН}) = \tau_{\max v} + \frac{\tau_{\max m} - \tau_{\max v}}{1 + \frac{115.2 \cdot a/b \cdot H \cdot p_{вс.МВН}}{\sin \alpha}},$$

где  $\tau_{\max m}$  – максимальное отношение давлений, создаваемое осевой ступенью в молекулярном режиме течения газа;  $\tau_{\max v}$  – максимальное отношение давлений, создаваемое осевой ступенью в вязкостном режиме течения газа;  $Kn$  – критерий Кнудсена;  $a/b$  – отношение ширины межлопаточного канала к его длине;  $H$  – ширина лопатки колеса ТМН-ступени в осевом направлении;  $\alpha$  – угол наклона межлопаточного канала ТМН-ступени.

Быстрота откачки камеры  $S_1$ , рассчитываемая без учета межступенчатого канала в зависимости от давления всасывания МВН-ступени  $p_{вс. МВН}$ :

$$S_1(p_{вс.МВН}) = S_{МВН}(p_{вс.МВН}) \cdot \frac{\tau_{\max.TMH}(p_{вс.МВН})}{1 + \frac{S_{МВН}(p_{вс.МВН})}{S_{\max.TMH}} \cdot (\tau_{\max.TMH}(p_{вс.МВН}) - 1)},$$

где  $S_{МВН}(p_{вс. МВН})$  – откачная характеристика молекулярной ступени.

Зависимость давления всасывания ТМН от давления всасывания МВН-ступени без учета канала:

$$p_{1_{вс}}(p_{вс.МВН}) = \frac{p_{вс.МВН}}{\tau_{\max.TMH}(p_{вс.МВН}) - \frac{S_1(p_{вс.МВН})}{S_{\max.TMH}} \cdot (\tau_{\max.TMH}(p_{вс.МВН}) - 1)}.$$

Откачная характеристика комбинированного ТМН или зависимость быстроты откачки камеры от давления на стороне всасывания ТМН  $S_1(p_{1_{вс}})$ , рассчитываемая без учета межступенчатого канала представлена на рис. 1.

Откачная характеристика  $S_1(p_{1_{вс}})$  получена при  $p_{\phi} = \text{const}$ , то есть при фиксированном форвакуумном давлении, пересчет характеристики по давлению со стороны нагнетания на сторону всасывания осуществлялся последовательно, начиная с форвакуумного давления. Для получения характеристики с переменным форвакуумным давлением, необходимо начинать пересчет с атмосферного давления.

Откачная характеристика  $S_1(p_{1_{вс}})$  является зависимостью от двух параметров: давление всасывания ТМН  $p_{1_{вс}}$  и давления всасывания МВН  $p_{вс. МВН}$  при постоянной величине  $p_{\phi}$ .

Для получения откачной характеристики с учетом канала необходимо отразить зависимость от трех параметров: давление всасывания ТМН  $p_{2_{вс}}$ , давление нагнетания ТМН-ступени  $p_{1_{н. ТМН}}$  и давления всасывания МВН  $p_{вс. МВН}$  при постоянной величине  $p_{\phi}$ .

Откачная характеристика с учетом канала также, как и без канала  $S_1(p_{1_{вс}})$  может быть рассчитана для переменного форвакуумного давления  $p_{\phi}$ , аналогичным путем, отмеченным выше.

Для выявления влияния межступенчатого канала выполняется расчет откачных характеристик ТМН с учетом канала при его различных геометрических и скоростных параметрах (рис. 2).

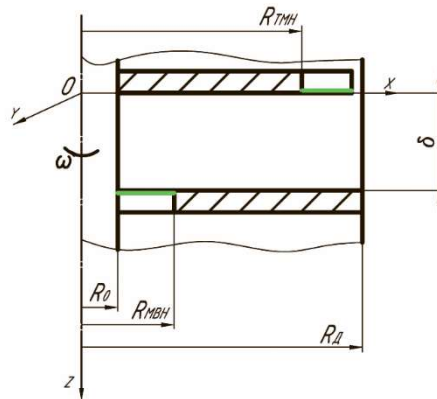


Рис. 2. Геометрические параметры межступенчатого канала.

Быстрота откачки камеры S2, рассчитываемая с учетом межступенчатого канала в зависимости от давления всасывания МВН-ступени  $p_{вс. МВН}$ :

$$S2(p_{вс. МВН}) = S_{K1}(p_{вс. МВН}) \cdot \frac{\tau_{\max. ТМН}(p_{1н. ТМН}(p_{вс. МВН}))}{1 + \frac{S_{K1}(p_{вс. МВН})}{S_{\max. ТМН}} \cdot (\tau_{\max. ТМН}(p_{1н. ТМН}(p_{вс. МВН})) - 1)},$$

где  $S_{K1}(p_{вс. МВН})$  – быстрота откачки во входном сечении межступенчатого канала.

Зависимость давления всасывания ТМН от давления всасывания МВН-ступени с каналом:

$$p_{вс. ТМН}^2(p_{вс. МВН}) = \frac{p_{1н. ТМН}(p_{вс. МВН})}{\tau_{\max. ТМН}(p_{1н. ТМН}(p_{вс. МВН})) - \frac{S2(p_{вс. МВН})}{S_{\max. ТМН}} \cdot (\tau_{\max. ТМН}(p_{1н. ТМН}(p_{вс. МВН})) - 1)}$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выявления влияния канала выполняется расчет откачных характеристик ТМН 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:

- граничное условие на поверхности последнего колеса ТМН-ступени;
- граничное условие на цилиндрической поверхности ротора;
- величина относительной ширины канала  $\delta / (R_{ТМН} - R_{МВН})$ .

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:

- $u1/v_n = 0$ , что соответствует неподвижной поверхности, ограничивающей канал со стороны осевой ступени (конструктивно, например, установка последнего колеса осевой ступени статорным, постановка статорного экранирующего диска или экранизация кольцевой подвижной поверхности последнего колеса ТМН-ступени, радиуса  $R_{ТМН} - R_0$  иными способами).

- $u1/v_n \neq 0$ , 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  $\delta/ (R_{ТМН} - R_{МВН})$  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 насоса с учетом канала различных возможных конфигураций.

Откачные характеристики ТМН с учетом канала приведены на рис. 3, характер которых демонстрирует, что воздействие канала приводит к снижению характеристики насоса; за счет параметров канала возможно повышение эффективности и расширение диапазона рабочих давлений ТМН.

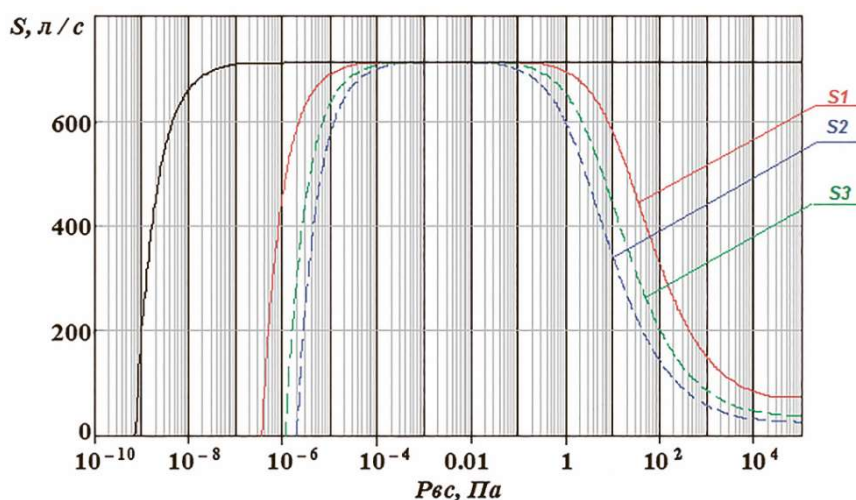


Рис. 3. Откачная характеристика ТМН. S1 – без канала; S2 – с каналом относительной ширины 0.3; S3 – с каналом относительной ширины 2.

В предыдущих работах [6, 7] изложено моделирование течения газа в межступенчатом канале на основе статистического метода пробной части Монте-Карло, расчет проводимости канала и вакуумных характеристик канала в рамках данной работы осуществлялся на основе результатов, изложенных в указанных работах.

Влияние относительной ширины канала и скорости вращения ротора на откачную характеристику ТМН может быть оценено изменением диапазона рабочих давлений ТМН. Отношение рабочих давлений ТМН при одинаковой скорости действия увеличивается в  $m$  раз:

$$m = \frac{p_{1\max} / p_{3\min}}{p_{2\max} / p_{2\min}},$$

где  $p_{1\max}$ ,  $p_{1\min}$  – максимальное и минимальное рабочее давление соответственно с учетом канала 1-го типа;  $p_{2\max}$ ,  $p_{2\min}$  – максимальное и минимальное рабочее давление соответственно с учетом канала 2-го типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ и определено качественное и оценено количественное влияние параметров межступенчатого канала на откачную характеристику ТМН. Канал представляет собой дополнительное сопротивление, последнее может быть минимизировано.

Рекомендованный диапазон относительной ширина канала - от 0.5 до 2. Из данного диапазона чем больше выбранная ширина, тем эффективнее, однако проектировать каналы еще шире не имеет смысла.

При проектировании проточной части следует минимизировать площадь подвижных поверхностей, ограничивающих канал. С увеличением скорости вращения ротора или площади подвижных поверхностей, ограничивающих канал, сопротивление канала возрастает. С точки зрения вакуумных характеристик при проектировании следует принимать максимальную ширину канала из рекомендованного диапазона, которую позволяет массогабаритный критерий.

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

За счет увеличения ширины канала отношение рабочих давлений при одинаковой скорости действия увеличивается в 3-15 раз.

За счет экранирования подвижных поверхностей отношение рабочих давлений при одинаковой скорости действия увеличивается в 8-130 раз.

Наибольший вклад в изменение диапазона рабочих давлений вносит влияние подвижных поверхностей.

За счет параметров канала возможно изменение отношения рабочих давлений при одинаковой скорости действия в 200-300 раз, что соответствует расширению диапазона рабочих давлений на 2.3 - 2.5 порядка.

Неучет в расчете межступенчатого канала приводит к теоретическому завышению скорости действия до 70% (впоследствии несовпадение реальных и расчетных характеристик).

Неучет канала при расчете приводит к теоретическому завышению отношения рабочих давлений до 50 – 470 раз, т. е. теоретическому расширению диапазона рабочих давлений до 1.5 – 2.7 порядка (впоследствии несовпадение реальных и расчетных характеристик).

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. 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.
2. Демихов К. Е., Никулин Н. К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. LAP Lambert Academic Publishing. 2013, 312 с. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746.
3. Leybold GmbH. Full line catalog. Vacuum components and vacuum technology. Leybold GmbH, 2021. 1046 P. URL: <https://www.leybold.com> (дата обращения: 03.06.2021).
4. Шерстюк А.Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1972. 344 с.
5. Sawada T. The Axial Flow Molecular Pump: 4th Reprot, Performance of a Rotor with a Single Blade Row in the Transition Flow Regime //Bulletin of JSME. – 1973. – Т. 16. – №. 96. – С. 993-1001.
6. 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.
7. Шостак Ю. А. Никулин Н. К и др. Влияние межступенчатого канала на эффективность молекулярной ступени комбинированного турбомолекулярного насоса //Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». – 2021. – Т. 5. – №. 3. – С. 45-53.