

Разработка метода расчета основных параметров турбомолекулярного вакуумного насоса с комбинированной проточной частью

У.С. Гордеева, К.Е. Демихов, А.А. Очков
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005
tests.ibmes@gmail.com; kdemikhov@yandex.ru; aochkov@bmstu.ru

Разработан метод расчета молекулярной ступени турбомолекулярного вакуумного насоса при работе в молекулярном режиме течения газа. Разработан метод расчета основных параметров ТВН с комбинированной проточной частью, обеспечивающей основные откачные характеристики, в том числе предельное остаточное давление, быстроту действия насоса и степень повышения давления. Построена откачная характеристика насоса с комбинированной проточной частью.

Development of a calculation method of the main parameters of the multistage turbomolecular pump. U.S. Gordeeva, K.E. Demikhov, A.A. Ochkov. A calculation method of the molecular stage of the turbomolecular vacuum pump (TMP) operating in the molecular flow region is developed. The calculation method of the main parameters of the multistage TMP to provide the main pumping parameters including ultimate pressure, pumping speed, compression ratio is also developed. As a result of calculation the performance curve of the multistage TMP is obtained.

Введение

Турбомолекулярные вакуумные насосы (ТВН) нашли широкое применение в науке и различных отраслях промышленности. В связи с высокими требованиями, предъявляемыми к вакуумным системам, проблема их компоновки для обеспечения технологического процесса является актуальной. Турбомолекулярные вакуумные насосы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими механическими вакуумными насосами, а именно не загрязняют откачиваемый объем, обеспечивают низкое предельное остаточное давление, не обладая селективностью откачки [1,2,3]. В настоящее время молекулярные вакуумные насосы отдельно используются достаточно редко, ввиду относительно небольшой быстроты действия. Для повышения эффективности откачки молекулярную ступень комбинируют с турбомолекулярной ступенью ТВН [4,5]. Существует три наиболее распространенные конструктивные группы комбинаций проточных частей: ТВН и цилиндрическая ступень с кольцевыми каналами на роторе (модель Геде рис.1а), ТВН и цилиндрическая ступень со спиральными каналами вдоль поверхности ротора (модель Хольвека рис.1б), ТВН и дисковая ступень со спиральным каналом от внешнего диаметра к центру диска (модель Зигбана рис.1в) [6,7,8]. Анализ литературы показал, что при наличии различных конструктивных схем комбинированных проточных частей ТВН не было выявлено единого метода расчета таких конструкций, что обуславливает новизну проведенного исследования.

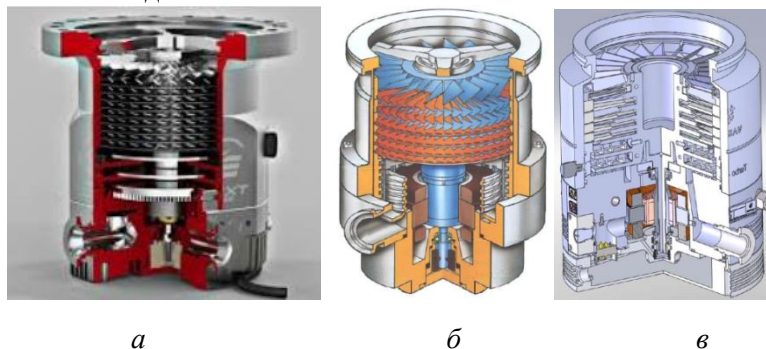


Рис. 1. ТВН с комбинированной проточной частью: а – с молекулярной ступенью Геде; б – с молекулярной ступенью Хольвека; в – с молекулярной ступенью Зигбана.

Метод расчета основных параметров ТВН с комбинированной проточной частью

Структура проточной части рассматриваемого комбинированного ТВН определяется двумя ступенями, расположенными на одном валу: турбомолекулярной и молекулярной цилиндрического типа с кольцевыми каналами на роторе.

В свою очередь турбомолекулярная ступень выполнена в виде нескольких пакетов лопаточных колес, обеспечивающих требуемую быстроту откачки [9].

Для определения геометрии рабочего колеса используются теоретические модели перехода молекул газа через колесо с учетом взаимодействия со стенками межлопаточного канала. Для определения вероятности перехода молекул газа через рабочее колесо (K_{max}) необходимо определить допустимые окружные скорости колеса (u_2), среднюю арифметическую скорость теплового движения молекул откачиваемого газа ($v_{cp,ap}$), а также геометрию рабочего канала [10].

Для определения откачных параметров колеса необходимо определить действительную максимальную быстроту действия колеса ($S_{max,действ}$) с учетом полученных геометрических параметров. Для построения откачной характеристики колес необходимо определить степень повышения давления колес каждого из пакетов (τ_{max}) [11].

$$\tau_{max} = \frac{\int_{\lambda}^1 \left[r k_{ab1} + \frac{h_1 (1-\lambda\psi)(r-\lambda)}{H_1 (1-\lambda)} \right] \int_0^{F\gamma + \beta\gamma} \frac{dx dr}{\pi F}}{\int_{\lambda}^1 \left[r k_{ab1} + \frac{h_1 (1-\lambda\psi)(r-\lambda)}{H_1 (1-\lambda)} \right] \int_0^{F\gamma - \beta\gamma} \frac{dx dr}{\pi F}} \quad (1)$$

где ψ – коэффициент толщины лопатки,

k_{ab1} – относительная ширина канала,

h_1 – толщина лопатки,

H_1 – ширина рабочего колеса,

λ – относительный диаметр колеса,

r – относительный радиус,

$\gamma, \beta\gamma$ – вероятности перехода молекул через межлопаточные каналы.

При использовании молекулярной ступени в ТВН комбинированного возможна их работа в молекулярном и вязкостном режимах течения. Для получения расчетных зависимостей основных параметров ступени рассматривается модель В. Геде [12,13].

Для определения основных параметров откачной характеристики ступени требуется определить максимальный перепад давлений в канале $(p_1 - p_2)_{max}$.

$$(p_1 - p_2)_{max} = \frac{6\eta Lu}{h^2} \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости,

L – длина канала,

u – частота вращения ротора,

h – высота канала.

Далее необходимо определить максимальную быстроту откачки канала S_{max} .

$$S_{max} = \frac{mRT}{Mp_2} \quad (3)$$

где m – максимальное количество газа, откачиваемое каналом при равенстве давлений;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура откачиваемого газа;

M – молекулярная масса откачиваемого газа.

Для определения быстроты действия всего насоса необходимо связать между собой геометрические, скоростные и откачные параметры канала молекулярной частив [14].

$$x_1 - x_2 = \frac{h^2}{6\eta(u_1+u_2)}(p_1 - p_2) + \left[\frac{h}{\theta(u_1+u_2)} + \frac{mRT h}{Mb3\eta(u_1+u_2)^2} \right] * \ln \frac{p_1 - \frac{2mRT}{Mb(u_1+u_2)}}{p_2 - \frac{2mRT}{Mb(u_1+u_2)}} \quad (4)$$

где $x_1 - x_2$ – длина канала;
 $u_1; u_2$ – скорость стенок;
 θ – коэффициент внешнего терния;
 b – ширина канала.

А также необходимо определить максимальное отношение давлений τ_{max} .

$$A \left(\tau_{max} + \frac{1}{\tau_{max}} - 2 \right) + B(\tau_{max} - 1) - Clg\tau_{max} + lg^2\tau_{max} = 0 \quad (5)$$

$$\text{где } A = \frac{(2\pi r h)^3}{Lb(2,303h)^2};$$

$$B = \frac{Suh\theta(2\pi r)^3}{b(2,303h)^2};$$

$$C = \frac{(u_1+u_2)2\pi r\theta}{2,303h}.$$

Для построения откачной характеристики насоса определяется быстрота действия насоса с комбинированной проточной частью S_N [15].

$$S_N = S_{\text{раб.}} + \frac{Q_{\text{гв.вс.}}}{p_1} \quad (6)$$

где $Q_{\text{гв.вс.}}$ – поток газовыделений во входном сечении насоса.

Результаты

Разработанный метод расчета использован для получения откачной характеристики ТВН с комбинированной проточной частью, представленной на рис 2.

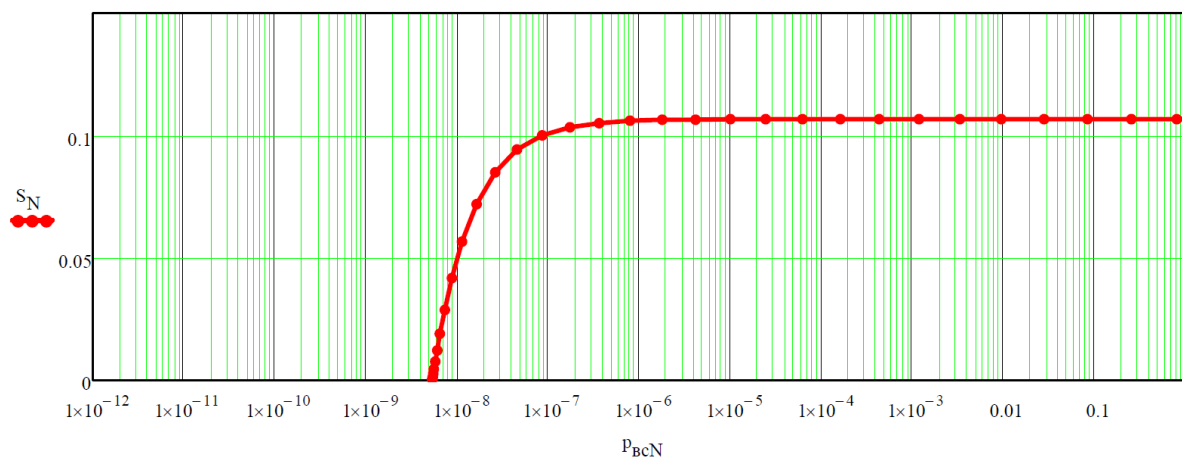


Рис 2. Откачная характеристика ТВН с комбинированной проточной частью.

Заключение

В связи с тем, что ТВН наиболее часто применяются в промышленной и исследовательской практике, увеличение скорости действия и предельного остаточного давления, обеспечиваемого насосом, являются наиболее важными задачами. Комбинированные схемы проточной части ТВН обладают наибольшим потенциалом для эффективного выполнения поставленных задач.

Разработанный метод расчета позволяет определить основные параметры ТВН с комбинированной проточной частью такие как: степень повышения давления каждой ступенью, перепад давления, скорость действия насоса.

В результате использования данного метода получена откачная характеристика ТВН с комбинированной проточной частью.

Литература

1. Демихов, К. Е., Никулин, Н. К., Свичкарь, Е. В. Перспективы развития комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов. Инженерный журнал: наука и инновации, (5), - 2013, 36-36.
2. Демихов К. Е. Современные направления развития высоковакуумных механических насосов //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2014. – №. 5 (98).
3. Фролов, Е. С., Автономова, И. В., Васильев, В. И., Никулин, Н. К., Пластинин, П. И. Механические вакуумные насосы. Производственное издание. Машиностроение. -1989.
4. Демихов К. Е. Основные подходы к выбору критериев оптимальности при проектировании высоковакуумных механических насосов //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2015. – №. 4 (103).
5. Демихов К. Е., Очков А. А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №. 5. – С. 17.
6. Вакуумная техника / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др. / под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
7. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 с.
8. Демихов К. Е. Особенности оптимизации проточной части высоковакуумных механических насосов в широком диапазоне давлений //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2012. – №. 3.
9. Демихов К. Е., Очков А. А. Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – №. 6 (117).
10. Демихов К. Е., Очков А. А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – №. 5 (110).
11. Демихов К. Е., Очков А. А., Полежаев А. Влияние различных параметров проточной части цилиндрического молекулярного вакуумного насоса на его характеристики //Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2015. – №. 3. – С. 1-8.
12. Демихов К. Е., Очков А. А., Цакадзе Г. Т. Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – №. 5 (116).
13. Свичкарь Е. В., Никулин Н. К., Демихов К. Е. Методика расчёта откачной характеристики высоковакуумной системы с турбомолекулярным вакуумным насосом //Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». – 2018. – Т. 2. – №. 1.

14. 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. – Т. 16. – №. 11. – С. 625-632.
15. Демихов К. Е., Очков А. А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса //Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Машиностроение». – 2016. – №. 5 (110).

Вязкость и плотность минеральных вакуумных масел

*Д.И.Саздеев, М.Г.Фомина, В.А.Аляев, Ф.М.Гумеров, *И.М.Абдулагатов*
Казань, КНИТУ, ул. Карла Маркса, 68, E-mail: sagdeev@mail.ru
**Махачкала, ДГУ, ул. Гаджиева, 43-а, E-mail: ilmutdina@gmail.com*

Исследованы коэффициенты динамической вязкости и плотность восьми вакуумных масел, относящихся по принятой классификации к минеральным вакуумным маслам нефтяного происхождения (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1C, VM-8, VM-9)

Viscosity and density of mineral vacuum oils. D.I.Sagdeev, M.G.Fomina, V.A.Alyayev, F.M.Gumerov, I.M.Abdulagatov. Coefficients of dynamic viscosity and density of eight vacuum oils are investigated. These oils are related to mineral vacuum oils of oil origin (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1S, VM-8, VM-9) according to the accepted classification.

В настоящее время в вакуумной технике нашли широкое применение вакуумные рабочие жидкости (ВРЖ) различного происхождения, представляющие собой сложные смеси. В связи с этим экспериментальное исследование физико-химических свойств ВРЖ является актуальной практической задачей. Обзор существующих вакуумных рабочих жидкостей и их полная характеристика с приведением теплофизических и физико-химических свойств полностью приведен в работах [1-3].

По химической природе вакуумные рабочие жидкости подразделяются на минеральные (продукты глубокой переработки нефти) и синтетические (силиконовые жидкости, полифениловые эфиры, агрессивно-стойкие жидкости, жидкости на основе углеродсодержащих органических соединений).

По своему предназначению они подразделяются на следующие группы: для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением, для пароструйных диффузионных и бустерных насосов, для турбомолекулярных насосов.

Нами были исследованы коэффициенты динамической вязкости и плотность восьми ВРЖ, относящихся по принятой классификации к минеральным вакуумным маслам нефтяного происхождения (VM-1, VM-II, VM-3, VM-5, VM-6, VM-1C, VM-8, VM-9) [4]. Характеристика исследованных минеральных вакуумных масел представлена в таблице 1.

Исследование вязкости и плотности вышеприведенных вакуумных масел при атмосферном давлении в интервале изменения температур от 298 К до 473 К было проведено на экспериментальной установке для совместного измерения коэффициента динамической вязкости и плотности [5-10]. Измерение коэффициента динамической вязкости проводилось методом падающего груза в относительном варианте, а измерение плотности - методом гидростатического взвешивания.