

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА РАБОЧИХ КОЛЕС В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

К.Е. Демихов
У.С. Гордеева
А.А. Очков

ked@bmstu.ru
uliana.gordeeva94@gmail.com
aochkov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено создание алгоритма для определения оптимального числа рабочих колес в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса. Такие насосы используются в качестве встраиваемых в хромато-масс-спектрометрах, где они обеспечивают процесс откачки в камере. Турбомолекулярные вакуумные насосы имеют ряд преимуществ перед другими средствами откачки, поскольку позволяют обеспечить заданные параметры откачки подбором оптимальной комбинации проточной части. Для решения этой задачи предложен алгоритм расчета минимального числа колес в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса, что обеспечит заданные откачные характеристики: быстроту действия и требуемую степень повышения давления. Алгоритм основан на известных аналитических зависимостях, описывающих процессы, протекающие в насосах такого типа, следовательно, имеет высокую вычислительную производительность. Определены соответствующие значения параметров проточной части, выбраны значения эмпирических коэффициентов и построены откачные характеристики первых двух рабочих колес насоса. Разработанный алгоритм может быть использован для оптимизации массогабаритных характеристик турбомолекулярных вакуумных насосов, что позволит значительно расширить область их применения

Ключевые слова

Турбомолекулярный высоковакуумный насос, проточная часть, рабочее колесо, оптимизация, быстрота действия

Поступила 21.06.2019

Принята 18.07.2019

© Авторы, 2020

Введение. При проектировании современных технических устройств часто ставится задача по оптимизации их массогабаритных характеристик, хотя и не всегда при этом сама задача конкретизируется [1, 2].

Разработка широко известных турбомолекулярных вакуумных насосов (ТВН) обычно связана с оптимизацией параметров проточной части, состоящей из пакета рабочих колес, параметры которого существенно зависят от общего числа колес в нем [3, 4]. Поэтому при расчете основных характеристик ТВН часто важным фактором является оптимизация параметров проточной части насоса, на что существенно влияет минимизация размеров самого пакета колес и чаще всего их числа.

Расчет минимального числа рабочих колес в проточной части ТВН.

В настоящей работе рассматривается созданный в МГТУ им. Н. Э. Баумана алгоритм расчета минимального числа колес в проточной части ТВН [5], обеспечивающего заданные откачные характеристики, в том числе быстроту действия насоса S и требуемую степень повышения давлений τ :

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{p}{p_{\text{ф}}},$$

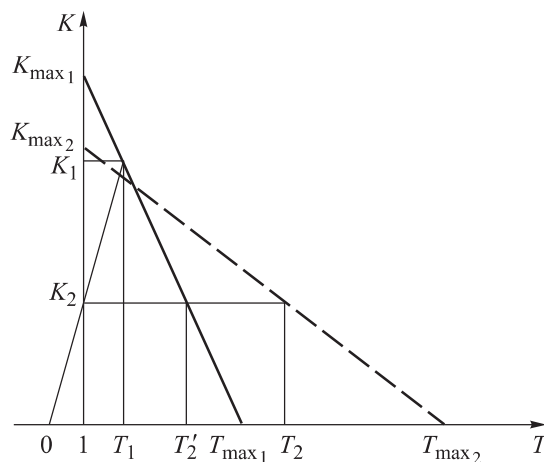
где p — давление газа на стороне всасывания; $p_{\text{ф}}$ — форвакуумное давление на стороне нагнетания.

Основной характеристикой колеса ТВН является зависимость $k = f(\tau)$, где k — коэффициент, характеризующий вероятность переноса молекул газа со стороны всасывания каналов колеса на сторону их нагнетания [6],

$$k = \frac{S}{(V_a / 4)F},$$

где S — быстрота откачки, создаваемая рабочим колесом; V_a — средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа; F — площадь торцевого сечения каналов колеса.

На рисунке приведены характеристики первых двух колес ТВН: $K_{\text{max}1}$, $K_{\text{max}2}$ — максимальные значения коэффициентов, характеризующих вероятности переноса молекул газа через каналы первого и второго колес в направлении откачки при $\tau = 1$; $\tau_{\text{max}1}$, $\tau_{\text{max}2}$ — максимальные значения степени повышения давлений газа первых двух колес при $K = 0$; K_1 , K_2 (τ_1 , τ_2) — текущие значения коэффициентов, характеризующих вероятности переноса молекул (степени повышения давлений) в рабочих точках откачных характеристик, τ' — степень повышения давлений второго колеса в случае, когда геометрические характеристики первых двух колес одинаковые.



Основные характеристики первых двух колес ТВН

Значения K_{\max} , τ_{\max} существенно зависят от основных параметров канала колес ТВН: α (угла наклона боковых стенок); a/b (относительной ширины канала); λ (относительного радиуса рассматриваемого сечения канала) [7]. Обычно для первого колеса эти параметры выбираются согласно следующим рекомендациям [2, 3]: $\alpha_1 = 45^\circ$; $(a/b)_1 = 1,2-0,8$; $\lambda = 0,6$.

Во всех последующих колесах в пакете ТВН значения α , a/b , λ выбираются из условия обеспечения максимальных значений рабочих степеней повышения давлений $\tau_{\text{опт}}$ в каждом колесе. Это позволит минимизировать общее число рабочих колес в пакете ТВН при условии обеспечения заданной степени повышения давлений:

$$\tau_{\text{общ}} = \prod_1^n \tau_{\text{опт}i},$$

где n — общее число колес.

Алгоритм расчета. Последовательность действий. Предлагаемый алгоритм предполагает следующие этапы действий.

По известным рекомендациям [8] определяется основная характеристика первого колеса, расположенного на стороне всасывания, с параметрами $K_{\max 1}$ и $\tau_{\max 1}$ (см. рисунок).

Зная параметры рабочей точки K_1 , определяем рабочее значение степени повышения давлений τ_1 и величину вероятности переноса молекул газа через последующее второе колесо $K_2 = K_1 / \tau_1$.

С помощью известной эмпирической зависимости [9, 10] определяется максимальное значение степени повышения давления $\tau_{\text{опт}2}$, создаваемое вторым колесом при K_2 :

$$\tau_{\text{опт}2} = ae^{bK_2} + C,$$

где

$$a = \frac{\tau_{\text{max}n} - 1}{1 - e^{bK_{\text{max}1}}};$$

$$C = \frac{1 - \tau_{\text{max}n}e^{bK_{\text{max}1}}}{1 - e^{bK_{\text{max}1}}}.$$

При этом $\tau_{\text{max}n}$ — максимальное значение степени повышения давлений, создаваемое последним в пакете рабочим колесом (n) при $K = 0$, при этом $\alpha = 10^\circ$; $a/b = 0,4 - 0,5$; $\lambda = 0,8$ [3].

Значение эмпирического коэффициента b выбирается в пределах от -9 до -5 [11]. Для $u/v_H = 0,6$ коэффициент $b = -5$, для $u/v_H = 0,2$ коэффициент $b = -9$, где v_H — наиболее вероятная скорость теплового движения молекул газа.

Для определения основной характеристики рассматриваемого второго колеса выбирается максимальное значение коэффициента, характеризующего вероятность переноса молекул через рабочий канал $K_{\text{max}2}$, создаваемое им в диапазоне $K_{\text{max}1} - K_2$.

Затем из уравнения

$$\tau_{\text{max}2} = \frac{\tau_{\text{опт}2} - (K_2/K_{\text{max}2})}{1 - (K_2/K_{\text{max}2})}$$

определяется максимальная степень повышения давлений $\tau_{\text{max}2}$, создаваемая вторым колесом при $K = 0$.

Далее, с помощью известных методов расчета [12, 13] определяются соответствующие значения параметров канала второго колеса: α_2 ; $(a/b)_2$; λ_2 , обеспечивающие откачную характеристику второго колеса с характерными точками $K_{\text{max}2}$, $\tau_{\text{max}2}$, $\tau_{\text{опт}2}$.

Зная откачную характеристику второго колеса, последовательно определяются соответствующие параметры третьего колеса и всех последующих ступеней ТВН [8, 14].

И так до момента, пока не будет выдержано условие, когда

$$\prod_{i=1}^n \tau_{\text{опт}i} \geq \tau_{\text{общ}}.$$

При этом n и будет минимальным числом ступеней разрабатываемого ТВН для заданных исходных параметров откачки.

Заключение. При проектировании современных ТВН задача оптимизации основных параметров является наиболее значимой. Минимизация габаритных размеров насосов позволяет использовать их в качестве встраиваемых и тем самым расширяет сферу применения.

В настоящей статье рассмотрен вопрос оптимизации массогабаритных размеров ТВН посредством минимизации числа рабочих колес в проточной части. Для этого авторами разработан алгоритм определения минимального числа колес. Определены соответствующие значения параметров канала рабочих колес. Выбраны величины эмпирических коэффициентов. Построены откачные характеристики первых двух рабочих колес ТВН. Число рабочих колес, полученное с помощью реализации данного алгоритма, позволяет обеспечить заданные откачные характеристики насоса, в том числе быстроту его действия и требуемую степень повышения давлений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Демихов К.Е. Современные направления развития высоковакуумных механических насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5, с. 3–11.
- [2] Демихов К.Е. Основные подходы к выбору критериев оптимальности при проектировании высоковакуумных механических насосов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 4, с. 76–85.
DOI: 10.18698/0236-3941-2015-4-76-85
- [3] Демихов К.Е., Очков А.А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-750
- [4] Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., ред. Вакуумная техника. М., Машиностроение, 2009.
- [5] Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
- [6] Демихов К.Е. Особенности оптимизации проточной части высоковакуумных механических насосов в широком диапазоне давлений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 3, с. 80–86.
- [7] Демихов К.Е., Очков А.А. Универсальная математическая модель процесса откачки газа молекулярным вакуумным насосом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 6, с. 134–143.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-134-143
- [8] Демихов К.Е., Очков А.А. Определение эффективного диапазона давлений газа на стороне всасывания турбомолекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2016, № 5, с. 89–95.
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-89-95

- [9] Li Y., Chen X., Guo W., et al. Accurate simulation of turbomolecular pumps with modified algorithm by 3D direct simulation Monte Carlo method. *Vacuum*, 2014, vol. 109, pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.03.023
- [10] Li Y., Chen X., Jia Y., et al. Numerical investigation of three turbomolecular pump models in the free molecular flow range. *Vacuum*, 2014, vol. 101, pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.vacuum.2013.10.002
- [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] Свичкарь Е.В., Никулин Н.К., Демихов К.Е. Методика расчета откачной характеристики высоковакуумной системы с турбомолекулярным вакуумным насосом. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*, 2018, т. 2, № 1, с. 65–71.
- [13] Демихов К.Е., Очков А.А., Цакадзе Г.Т. Метод расчета оптимальных параметров комбинированного молекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 5, с. 98–104. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-98-104
- [14] Han B., Huang Z., Le Y. Design aspects of a large scale turbomolecular pump with active magnetic bearings. *Vacuum*, 2017, vol. 142, pp. 96–105. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.12.010

Демихов Константин Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Гордеева Ульяна Саидовна — аспирантка кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Очков Андрей Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Демихов К.Е., Гордеева У.С., Очков А.А. Алгоритм определения оптимального числа рабочих колес в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 1, с. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-119-127>

ALGORITHM FOR DETERMINING OPTIMUM RUNNER NUMBER IN THE BLADING SECTION OF A TURBOMOLECULAR PUMP

K.E. Demikhov

ked@bmstu.ru

U.S. Gordeeva

uliana.gordeeva94@gmail.com

A.A. Ochkov

aochkov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers developing an algorithm for determining the optimum runner number in the blading section of a turbomolecular pump. Such pumps are built into chromatograph mass spectrometers for ensuring vacuum production in the chamber. Turbomolecular pumps boast a number of advantages over other pumping solutions since it is possible to arrive at the required pumping parameters by means of selecting the optimum blading section configuration. In order to solve this problem, we present an algorithm for calculating the optimum runner number in the blading section of a turbomolecular pump, ensuring the pumping characteristics required: pumping speed and pressure ratio. The algorithm is based on well-known analytical expressions describing processes taking place in pumps of this type, which means it is highly computationally efficient. We determined the respective blading section parameter values, selected the values of empirical coefficients and plotted the pumping performance for the first two runners. The algorithm developed may be used to optimise mass and dimensions of turbomolecular pumps, which could significantly expand their use

Keywords

Turbomolecular high vacuum pump, blading section, runner, optimisation, pumping speed

Received 21.06.2019

Accepted 18.07.2019

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Demikhov K.E. Current trends of high-vacuum pumps. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 5, pp. 3–11 (in Russ.).
- [2] Demikhov K.E. Basic principles of selecting optimality criteria in designing high-vacuum mechanical pumps. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 4, pp. 76–85 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-4-76-85

- [3] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Software for turbomolecular vacuum pumps key parameters optimization. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 5 (in Russ.).
DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-750
- [4] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., eds. *Vakuumnaya tekhnika* [Vacuum technique]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009.
- [5] Demikhov K.E., Nikulin N.K. *Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov* [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010.
- [6] Demikhov K.E. Peculiarities of optimization of flow part of high-vacuum mechanical pumps in the wide pressure ran. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2012, no. 3, pp. 80–86 (in Russ.).
- [7] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Universal mathematical model of de-gassing process by molecular vacuum pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2017, no. 6, pp. 134–143 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-134-143
- [8] Demikhov K.E., Ochkov A.A. Effective range of gas pressure at the suction side of the turbomolecular vacuum pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2016, no. 5, pp. 89–95 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-5-89-95
- [9] Li Y., Chen X., Guo W., et al. Accurate simulation of turbomolecular pumps with modified algorithm by 3D direct simulation Monte Carlo method. *Vacuum*, 2014, vol. 109, pp. 354–359. DOI: 10.1016/j.vacuum.2014.03.023
- [10] Li Y., Chen X., Jia Y., et al. Numerical investigation of three turbomolecular pump models in the free molecular flow range. *Vacuum*, 2014, vol. 101, pp. 337–344. DOI: 10.1016/j.vacuum.2013.10.002
- [11] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Polezhaev A. Various parameters of the flowing part of a cylindrical molecular vacuum pump effecting on its characteristics. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2015, no. 3, pp. 1–8 (in Russ.).
- [12] Svichkar' E.V., Nikulin N.K., Demikhov K.E. Method for calculating pumping characteristic of high-vacuum system with turbomolecular vacuum pump. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya "Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie"* [Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering], 2018, vol. 2, no. 1, pp. 65–71 (in Russ.).
- [13] Demikhov K.E., Ochkov A.A., Tsakadze G.T. A technique for computing optimum parameters of a combined molecular drag vacuum pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2017, no. 5, pp. 98–104 (in Russ.).
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-98-104

[14] Han B., Huang Z., Le Y. Design aspects of a large scale turbomolecular pump with active magnetic bearings. *Vacuum*, 2017, vol. 142, pp. 96–105.

DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.12.010

Demikhov K.E. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Vacuum and Compressor Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gordeeva U.S. — Post-Graduate Student, Department of Vacuum and Compressor Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ochkov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Vacuum and Compressor Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Demikhov K.E., Gordeeva U.S., Ochkov A.A. Algorithm for determining optimum runner number in the blading section of a turbomolecular pump. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 1, pp. 119–127 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-1-119-127>