

DOI: 10.18698/0236-3941-2015-6-121-129

УДК 621.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

К.Е. Демихов, А.А. Очков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: ked@bmstu.ru; aochkov@bmstu.ru

Турбомолекулярные вакуумные насосы получают все большее распространение в различных областях науки и техники по целому ряду объективных причин. Достаточно весомым аргументом при этом считается глубокая проработка теоретических и расчетных аспектов описания рабочих процессов в проточной части насоса. Все это позволяет решать различные задачи по оптимизации параметров турбомолекулярных вакуумных насосов, что весьма важно при современных требованиях к разрабатываемым вакуумным средствам откачки. Рассмотрен созданный авторами метод расчета оптимальных параметров рабочих колес в проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов при условии минимизации их числа. Даны соответствующие рекомендации для решения конкретных технических задач.

Ключевые слова: вакуумный насос, проточная часть, рабочее колесо, межлопаточные каналы, откачная характеристика, быстрота откачки, степень повышения давлений.

SELECTING OPTIMALITY CRITERIA IN DESIGNING FLOW PART OF TURBOMOLECULAR VACUUM PUMPS

К.Е. Demikhov, А.А. Ochkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: ked@bmstu.ru; aochkov@bmstu.ru

Turbomolecular vacuum pumps (TMP) are becoming more widespread in different fields of science and technology nowadays due to a number of intrinsic reasons. The valid argument for it is a deep consideration of theoretical and calculating aspects concerning the description of operational processes in the flow part of a turbomolecular vacuum pump. It allows solving different problems of improving optimality criteria of turbomolecular vacuum pumps. It seems very important considering the present-day requirements imposed on modern vacuum pumping devices. The paper presents the authors' unique calculation method for estimating optimality criteria for impellers in the flow part of TMP, provided their amount minimized. The recommendations for solving actual engineering problems are given.

Keywords: vacuum pump, flow part, impeller, blade channels, pumped characteristic, pumping rate, compression ratio.

В последние годы турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН) привлекают к себе все больше внимания исследователей в различных областях науки и техники благодаря тому, что высоковакуумные

механические насосы (ВМН) этого типа имеют существенные преимущества перед целым рядом других аналогичных средств откачки, отличающихся современными конструкциями ТМН оптимальными характеристиками и параметрами. Это стало возможным в результате того, что к настоящему времени создана достаточно стройная теория рабочих процессов, имеющих место в ТМН. [1–11]. Весомый вклад в это внесли исследования, проводимые в течение многих лет в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре “Вакуумная и компрессорная техника” [2, 5].

В результате разработаны методы расчета различных конструкций современных ТМН, созданы и исследованы оригинальные ВМН на базе схем турбомолекулярных и молекулярных вакуумных насосов, получены современные рекомендации по проектированию высоковакуумных механических насосов с улучшенными характеристиками.

Одним из важнейших этапов процесса оптимизации является выбор критериев оптимальности и управляемых параметров [5], что в значительной мере зависит от цели разработки и конкретных условий эксплуатации самого объекта проектирования. Одной из наиболее часто встречающихся задач по оптимизации характеристик ТМН является минимизация необходимого числа колес в проточной части насоса при условии обеспечения заданных параметров откачки.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод расчета минимального числа колес, обеспечивающий наибольшие значения степени повышения давлений на каждом колесе пакета [5].

В результате исследований предложена эмпирическая зависимость

$$\tau_i = ae^{bK_i} + c, \quad (1)$$

где τ_i — максимальная величина рабочего отношения давлений, создаваемое произвольным колесом; K_i — коэффициент, характеризующий полезную быстроту откачки данного колеса; a, b, c — эмпирические коэффициенты.

С учетом вводимых граничных условий [5]:

$$a = \frac{\tau_{\max n} - 1}{1 - e^{bK_{\max 1}}}, \quad (2)$$

$$c = \frac{1 - \tau_{\max n}e^{bK_{\max 1}}}{1 - e^{bK_{\max 1}}}, \quad (3)$$

где $K_{\max 1}$ — коэффициент, характеризующий максимальное значение быстроты откачки, создаваемое первым колесом в пакете (на стороне всасывания), $\tau_{\max n}$ — максимальное значение степени повышения давлений, создаваемых рабочим колесом, расположенным на стороне нагнетания пакета.

Величина $K_{\max 1}$ обычно определяется при выборе значения угла наклона лопаток $\alpha = 45^\circ$ и относительной ширины канала $a/b = 1,4$.

Значение $\tau_{\max n}$ рассчитывается при $\alpha = 10^\circ$, $a/b = 0,4$. Величина коэффициента b выбирается в пределах $b = -5 \dots -9$ [5].

Алгоритм расчета предусматривает после выбора значения коэффициента K_1 (для первого колеса в пакете) последовательное определение величины степени повышения давлений τ_i и коэффициента K_i для каждого колеса, пока не будет достигнуто требуемое значение общей степени повышения давления насоса $\tau_{\text{об}} = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_n$, создаваемого минимальным числом колес n в пакете.

Эффективность применения данного метода зависит от обоснованности выбора коэффициента K_1 как определяющего параметра откачной характеристики всего насоса.

Максимальное значение быстроты откачки ТМН по условию всасывания определяется по формуле

$$S_{\max} = S_{\text{н}} + \frac{Q_{\text{пер1}}}{p_1} + \frac{Q_{\text{гв1}}}{p_1}, \quad (4)$$

где $S_{\text{н}}$ — рабочее значение быстроты откачки насоса; $Q_{\text{пер1}}$ — поток газа, перетекающий через радиальный зазор первого колеса; $Q_{\text{гв1}}$ — поток газа, десорбирующего с поверхности колеса и корпуса на стороне всасывания; p_1 — давление газа во всасывающей полости насоса. Коэффициент, определяющий эффективность откачки насосом,

$$K_1 = \frac{S_{\text{н}}}{S_{\max 1}} \quad (5)$$

или из уравнения (4)

$$K_1 = 1 - \frac{Q_{\text{пер1}}}{p_1} - \frac{Q_{\text{гв1}}}{p_1}. \quad (6)$$

Соответственно

$$\begin{aligned} Q_{\text{пер1}} &= u_1(p_2 - p_1), \\ Q_{\text{гв1}} &= \sum_{j=1}^k F_j q_j, \end{aligned} \quad (7)$$

где u_1 — пропускная способность радиального зазора первого колеса; p_2 — давление на стороне нагнетания этого колеса; F_j и q_j — соответственно площадь участка поверхности, обладающего величиной удельного потока десорбирующегося газа q_j ; k — общее число рассматриваемых участков поверхности всасывания.

Из соотношения (6) можно получить выражение для коэффициента K_1 :

$$K_1 = 1 - u_1(\tau_1 - 1) - \frac{\sum_{j=1}^k F_j q_j}{p_1}, \quad (8)$$

который определяет соотношение между полезной нагрузкой насоса и величинами дополнительных потоков массы за счет перетеканий и газовой выделений. Причем, чем больше значение K_1 , тем выше эффективность откачки ТМН.

В табл. 1 приведены результаты расчетов по определению минимальных чисел колес N_{\min} в проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов при откачке водорода, азота и аргона для различных значений коэффициента K_1 .

Таблица 1

Минимальные значения числа колес N_{\min} в пакете при откачке различных газов

Газ	$u_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	K_1	N_{\min}	
			$p_1 = 10^{-6} \text{ Па}$	$p_1 = 10^{-7} \text{ Па}$
Водород	200	0,1	46	55
		0,2	47	56
		0,3	48	56
		0,4	48	57
		0,5	49	58
		0,6	50	59
		0,7	51	60
		0,8	53	62
		0,9	56	65
	300	0,1	32	38
		0,2	32	38
		0,3	33	39
		0,4	33	39
		0,5	34	40
		0,6	35	41
		0,7	36	42
		0,8	37	43
		0,9	39	45
Азот	200	0,1	13	15
		0,2	13	15
		0,3	13	15
		0,4	13	16
		0,5	14	16
		0,6	14	16
		0,7	15	17
		0,8	15	18
		0,9	16	19
	300	0,1	8	9
		0,2	8	9
		0,3	8	10
		0,4	9	10
		0,5	9	10
		0,6	9	10
		0,7	9	11
		0,8	10	11
		0,9	11	12

Газ	$u_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	K_1	N_{min}	
			$p_1 = 10^{-6} \text{ Па}$	$p_1 = 10^{-7} \text{ Па}$
Аргон	200	0,1	11	12
		0,2	11	13
		0,3	11	13
		0,4	11	13
		0,5	12	13
		0,6	12	14
		0,7	12	14
		0,8	13	15
		0,9	14	16
	300	0,1	6	7
		0,2	6	7
		0,3	6	7
		0,4	7	7
		0,5	7	8
		0,6	7	8
		0,7	7	8
		0,8	7	8
		0,9	8	9

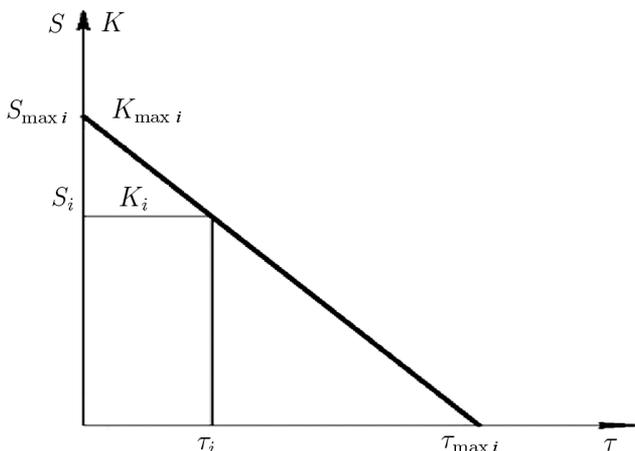
Среднее значение окружной скорости колес принималось равным 200 и 300 м/с. Давление нагнетания насоса — $p_{\text{ф}} = 0,1 \text{ Па}$, давления всасывания выбирались равными $p_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ и $p_1 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Па}$.

Как следует из сравнения результатов расчета, при увеличении K_1 в целях повышения эффективности откачки, значение необходимого минимального числа колес возрастает, что, в свою очередь, увеличивает габаритные размеры проточной части. В связи с этим для обеспечения эффективной откачки первым колесом целесообразно задавать значение коэффициента $K_1 = 0,6 \dots 0,7$.

Другой проблемой при оптимизации пакета рабочих колес ТМН является определение оптимальных размеров межлопаточных каналов α и a/b .

На рисунке приведена основная характеристика типичного колеса ТМН, где K_i и τ_i — соответственно параметры рабочей точки характеристики i -го колеса в пакете проточной части. Они определяются с помощью уравнения (1) при их последовательном расчете, начиная с первого колеса на стороне всасывания; $K_{\text{max } i}$ и $\tau_{\text{max } i}$ — максимальные значения параметров ($K_{\text{max } i}$ при $\tau_i = 1$, $\tau_{\text{max } i}$ при $K_i = 0$). Эти параметры, зависящие от размеров межлопаточных каналов α и a/b , объединяются линейной зависимостью

$$K_{\text{max } i} = K_i \frac{\tau_{\text{max } i} - 1}{\tau_{\text{max } i} - \tau_i}. \quad (9)$$



Основная характеристика i -го колеса в проточной части ТМН

Задача заключается в определении оптимальных параметров — $\alpha_{\text{опт}}$ и $(a/b)_{\text{опт}}$, которые согласуются с параметрами $K_{\text{max } i}$, $\tau_{\text{max } i}$, K_i и τ_i уравнения (9). В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана программа расчета, обеспечивающая формализацию такого поиска. Результаты расчета представлены в табл. 2–4 (N — порядковый номер колеса в пакете проточной части; давление газа при всасывании принималось $p_1 = 10^{-6}$, на стороне нагнетания $p_\Phi = 0,1$ Па; среднее значение окружной скорости колес $u_c = 300$ м/с, значение коэффициента $K_1 = 0,7$; диапазоны изменения параметров: α от 45° до 10° с шагом 5° , a/b от 1,4 до 0,4 с шагом 0,1).

Как показывают результаты расчета, в пакете колес в направлении от всасывания к нагнетанию имеет место достаточно быстрое (в первых двух-трех колесах) уменьшение относительной ширины канала $(a/b)_{\text{опт}}$ (от максимума к минимуму) и угла наклона $\alpha_{\text{опт}}$, исключение составляет вариант с откачкой водорода, где угол $\alpha_{\text{опт}}$ начинает существенное уменьшение примерно после одной трети числа колес, что обычно присуще турбомолекулярным вакуумным насосам и соответствует результатам других исследований [2, 5].

Выводы. 1. Минимизация числа колес в проточной части ТМН, обеспечивающего заданные параметры откачки, позволяет существенно уменьшить массогабаритные характеристики насоса.

2. При выборе коэффициента K_1 , характеризующего эффективность откачки первого колеса в пакете проточной части и, следовательно, насоса в целом, необходимо учитывать особенности требований к характеристикам разрабатываемого ТМН (например, обеспечение минимальных значений давления всасывания). В случае, когда

**Распределение оптимальных параметров межлопаточных каналов
по ступеням при откачке водорода**

N	$\alpha_{\text{опт}}, ^\circ$	$(a/b)_{\text{опт}}$	$\tau_{i\text{опт}}$
1	45	1,4	1,144
2	45	0,7	1,179
3	45	0,6	1,217
4	45	0,5	1,257
5	45	0,5	1,296
6	40	0,5	1,332
7	35	0,5	1,363
8	30	0,5	1,389
9	30	0,5	1,410
10	25	0,5	1,425
11	20	0,5	1,437
12	20	0,5	1,445
13	15	0,5	1,451
14	15	0,5	1,455
15	15	0,5	1,458
16	15	0,5	1,460
17	15	0,5	1,461
18	15	0,5	1,462
19	15	0,5	1,463
20	15	0,5	1,463
21	15	0,5	1,464
22	15	0,5	1,464
23	15	0,5	1,464
24	15	0,5	1,464
25	15	0,5	1,464
26	15	0,5	1,464
27	15	0,5	1,464
28	15	0,5	1,464
29	15	0,5	1,464
30	15	0,5	1,464
31	15	0,5	1,464
32	15	0,5	1,464
33	15	0,5	1,464
34	15	0,5	1,464
35	15	0,5	1,464
36	15	0,5	1,464

**Распределение оптимальных параметров межлопаточных каналов
по ступеням при откачке азота**

N	$\alpha_{\text{опт}}, ^\circ$	$(a/b)_{\text{опт}}$	$\tau_{i\text{опт}}$
1	45	1,4	2,529
2	25	0,7	4,251
3	25	0,5	5,574
4	15	0,5	6,059
5	15	0,5	6,063
6	15	0,5	6,065
7	15	0,5	6,065
8	15	0,5	6,065
9	15	0,5	6,065

Таблица 4

**Распределение оптимальных параметров межлопаточных каналов
по ступеням при откачке аргона**

N	$\alpha_{\text{опт}}, ^\circ$	$(a/b)_{\text{опт}}$	$\tau_{i\text{опт}}$
1	45	1,4	5,185
2	20	0,9	10,929
3	20	0,5	12,871
4	15	0,5	13,068
5	15	0,5	13,084
6	15	0,5	13,085
7	15	0,5	13,085

отсутствуют четкие доводы в пользу какого-либо приоритета, рекомендуется выбирать значение коэффициента $K_1 = 0,6 \dots 0,7$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по вакуумной технике и технологиям* / под ред. Д. Хоффмана, Б. Сингха, Дж. Томаса. М.: Техносфера, 2011, 736 с.
2. *Вакуумная техника: Справочник* / 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.
3. *Розанов Л.Н.* Вакуумная техника. М.: Высшая шк. 2007. 390 с.
4. *Вакуумная электроника* / А.Н. Диденко, Н.К. Никулин, Ю.С. Протасов, Г.Н. Фурсей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 604 с.
5. *Демихов К.Е., Никулин Н.К.* Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 с.
6. *Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms* / E.A. Deulin, V.P. Mikhailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa. Dordrecht: Springer, 2010, 234 p. (Fluid Mechanics and its Applications: vol. 91).
7. *Product Leitfaden.* Alcatel Hochvakuumtechnik. GmbH, Annecy, 1995.
8. *Komponentenfür die Vakuumtechnik,* Balzers-Pfeiffer GmbH, Balzers, 1996.
9. *Vakuum catalog.* Edwards. Hochvakuum. GmbH, Marburg, 1993.
10. *Teil B., Leybold A.G.* Katalog HV300, Cologne, 1994.
11. *Vacuum product catalog,* Varian Ass. Lexington, 1995–1998.

REFERENCES

- [1] Hoffman D., Singh B., Thomas J. Handbook of Vacuum Science and Technology. Burlington, Academic Press, 1998. 736 p.
- [2] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K. Vakuumnaya tekhnika: Spravochnik [Vacuum Technology. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p.
- [3] Rozanov L.N. Vakuumnaya tekhnika [Vacuum Technology. College textbook]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 2007. 390 p.
- [4] Didenko A.N., Nikulin N.K., Protasov Yu.S., Fursey G.N. Vakuumnaya elektronika. Ch.1. [Vacuum Electronics: Student training manual. Part 1]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2008. 604 p.
- [5] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of High-Vacuum Mechanical Pump]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2010. 255 p.
- [6] Deulin E.A., Mikhailov V.P., Panfilov Yu.V., Nevshupa R.A. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms. *Fluid Mechanics and its Applications*. Dordrecht: Springer, 2010, vol. 91. 234 p.
- [7] Product Leitfaden. Alcatel Hochvakuumtechnik. GmbH, Annecy, 1995.
- [8] Komponenten für die Vakuumtechnik, Balzers-Pfeiffer GmbH, Balzers, 1996.
- [9] Vakuum catalog. Edwards. Hochvakuum. GmbH, Marburg, 1993.
- [10] Katalog HV300, Teil B., Leybold AG, Cologne, 1994.
- [11] Vacuum product catalog, Varian Ass. Lexington. 1995–1998.

Статья поступила в редакцию 8.09.2015

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

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

Очков Андрей Андреевич — аспирант, ассистент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ochkov A.A. — Ph.D. student of the Department of Vacuum and Compressor Units, Bauman Moscow State Technical University.
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Демихов К.Е., Очков А.А. Определение оптимальных параметров проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 6. С. 121–129.

Please cite this article in English as:

Demikhov K.E., Ochkov A.A. Selecting optimality criteria in designing flow part of turbomolecular vacuum pumps. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 6, pp. 121–129.