

УДК 621.51

К. Е. Д е м и х о в

## ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАСОСОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

*Рассмотрена методика определения параметров высоковакуумных механических насосов, работающих в широком диапазоне давлений на стороне всасывания. Приведены практические рекомендации по выбору критерия оптимальности и решение задачи оптимизации.*

**E-mail:** aiv@bmstu.ru

**Ключевые слова:** высоковакуумный механический насос, проточная часть, рабочее колесо, быстрота откачки, откачная характеристика.

В последние годы неуклонно растет число технологических процессов, основанных на необходимости использования вакуумной техники. Причем в большинстве случаев это связано с применением современных высоковакуумных средств откачки, отвечающих целому ряду специфических требований. В области нанотехнологии, атомной энергетики, живых систем, в производстве электровакуумного оборудования, сверхчистых металлов и многих других сферах промышленности необходимо обеспечивать высокий и сверхвысокий вакуум, в котором отсутствуют даже следы органических соединений.

Таким требованиям отвечают турбомолекулярные вакуумные насосы (ТВН), имеющие самое широкое применение в различных системах и установках [1].

Первые образцы ТВН были созданы в конце 50-х гг. XX в., и с тех пор они постоянно находятся в поле зрения исследователей различных стран, в результате работы которых создан целый ряд конструкций насосов с различными схемами, параметрами, эксплуатационными характеристиками. Разработаны основные положения теории и методы расчета ТВН, описывающие с удовлетворительной степенью точности процессы в межлопаточных каналах и позволяющие определять оптимальные размеры отдельных рабочих колес и проточной части насоса в целом [2, 3].

Однако, возросшие требования, предъявляемые к современным насосам, привели к необходимости постановки новых задач, решение ко-

торых дало бы возможность с учетом перспективных методов проектирования разрабатывать ТВН, отличающиеся высокой эффективностью работы, оптимальными интегральными характеристиками в широком диапазоне изменения откачных параметров, в частности давления газа на стороне всасывания.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством и непосредственном участии автора настоящей статьи разработан комплекс математических моделей и методов расчета оптимальных параметров межлопаточных каналов, рабочих колес и проточной части ТВН в целом, нашедших практическое применение при разработке серии ТВН на газостатических опорах, не имевших аналогов в мировой практике. Созданная методология проектирования позволяет определять оптимальные значения угла наклона межлопаточного канала  $\alpha$ , относительной ширины  $a/b$ , относительной высоты  $\lambda$ , минимальный наружный диаметр колес  $D_2$ .

Однако данные факторы скорее представляют интерес в качестве управляемых параметров при решении оптимизационных задач, когда используются комплексные критерии оптимальности. К таковым можно отнести условный объем проточной части ТВН, минимальное значение которого необходимо найти:

$$A_{\min} = \pi/4 D_{2\text{опт}} N_{\text{опт}}, \quad (1)$$

где  $D_{2\text{опт}}$  и  $N_{\text{опт}}$  — соответственно оптимальные наружный диаметр рабочих колес и их число в пакете колес, обеспечивающие минимальное значение условного объема проточной части  $A_{\min}$ .

Наличие минимума параметра  $A$  обусловлено тем, что при увеличении в широком диапазоне наружного диаметра  $D_2$  (значений, бóльших, чем минимальный диаметр  $D_{2\min}$ , определенный для заданной скорости откачки  $S$  из условия требуемой прочности в корневом сечении лопатки) число колес  $N$ , необходимое для обеспечения заданной степени повышения давлений  $\tau$ , уменьшается.

Такое изменение  $N$  объясняется снижением влияния на  $S$  и  $\tau$  газовыделений с внутренней поверхности насоса, перетеканий через радиальные зазоры и возможного нарушения молекулярного режима течения газа в проточной части насоса, а также ростом окружной скорости вращения на среднем радиусе рабочего колеса ТВН.

В целях оценки влияния различных факторов на результаты оптимизации проточной части турбомолекулярного насоса были определены оптимальные параметры ТВН с скоростью откачки  $S = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  по азоту при окружной скорости на наружном диаметре колеса  $U_2 = 150 \text{ м/с}$  для различных давлений газа на стороне всасывания. Результаты расчета приведены в табл. 1 и 2.

**Параметры проточной части ТВН с дисковыми колесами**

Номер колеса	При $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па;		При $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па;		При $p = 1,3$ Па;	
	$\alpha$ , градусы	$a/b$	$\lambda$	$\alpha$ , градусы	$a/b$	$\lambda$
1-3	45	1,2	0,6	45	1,2	0,6
4	45	1,2	0,6	40	1,0	0,6
5	45	1,0	0,6	40	1,0	0,6
6	45	1,0	0,6	40	1,0	0,65
7	45	1,0	0,65	45	0,8	0,65
8	45	0,8	0,65	35	0,8	0,65
9	40	0,8	0,65	35	0,8	0,65
10,11	35	0,8	0,7	30	0,8	0,75
12	30	0,8	0,75	30	0,6	0,75
13	30	0,8	0,75	25	0,8	0,75
14	25	0,8	0,8	25	0,6	0,8
15	25	0,8	0,75	30	0,6	0,8
16	25	0,6	0,8	25	0,6	0,8
17	30	0,6	0,8	30	0,6	0,8
18	25	0,6	0,8	25	0,6	0,8
19	20	0,8	0,6	30	0,6	0,8
20	25	0,6	0,8	25	0,6	0,8
21	20	0,8	0,8	-	-	-
22-23	20	0,8	0,8	-	-	-
24	20	0,8	0,8	-	-	-
25-31	20	0,8	0,8	-	-	-
32	20	0,6	0,8	-	-	-

**Параметры проточной части ТВН с лопаточными колесами**

Номер колеса	При $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па;		При $p = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па;		При $p = 1,3$ Па;	
	$\alpha$ , градусы	$a/b$	$\lambda$	$\alpha$ , град	$a/b$	$\lambda$
1–3	45	0,8	0,6	45	0,8	0,6
4	45	0,8	0,6	45	0,6	0,6
5	45	0,8	0,6	45	0,6	0,6
6	45	0,8	0,6	40	0,6	0,6
7	45	0,8	0,6	35	0,6	0,6
8	40	0,6	0,6	30	0,6	0,65
9	35	0,6	0,6	30	0,6	0,65
10	30	0,6	0,65	25	0,6	0,7
11	30	0,6	0,7	20	0,6	0,75
12	25	0,6	0,7	25	0,6	0,75
13	25	0,6	0,75	20	0,6	0,8
14	20	0,6	0,75	20	0,6	0,75
15	20	0,6	0,75	20	0,6	0,8
16	20	0,6	0,8	20	0,6	0,75
17	20	0,6	0,75	–	–	–
18	20	0,6	0,8	–	–	–
19	20	0,6	0,75	–	–	–
20	20	0,6	0,8	–	–	–
21	20	0,6	0,75	–	–	–
22	20	0,6	0,8	–	–	–
23–25	20	0,6	0,75	–	–	–
26	20	0,6	0,75	–	–	–
27–33	20	0,6	0,75	–	–	–

Проанализировав полученные расчетные данные, можно заключить, что на параметры насоса оказывают влияние конструкция колес (дисковые или лопаточные), а также давление газа на стороне всасывания.

Так, изменяются необходимое минимальное число в пакете ТВН и распределение размеров межлопаточных каналов по ступеням. Как показали результаты расчетов, для первых трех-четырех колес, расположенных на стороне всасывания, требуемые геометрические параметры межлопаточных каналов имеют значения:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $a/b = 1,2 \dots 0,8$  и  $\lambda = 0,6$ . В последующих колесах параметры межлопаточных каналов лежат в диапазоне  $\alpha = 45^\circ \dots 20^\circ$ ,  $a/b = 1,2 \dots 0,6$  и  $\lambda = 0,6 \dots 0,8$ . При этом для второй половины пакета колес величины  $a/b$  и  $\lambda$  остаются практически постоянными:  $a/b = 0,8 \dots 0,6$  и  $\lambda = 0,8 \dots 0,75$ .

На рис. 1 представлены результаты расчетов по определению оптимальных параметров  $D_{2\text{опт}}$ ,  $N_{\text{опт}}$  и  $A_{\text{min}}$  ТВН с быстротой откачки  $S = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$  в широком диапазоне давлений при использовании лопаточных и дисковых колес. Как следует из рис. 1, каждому значению давления газа на стороне всасывания соответствует

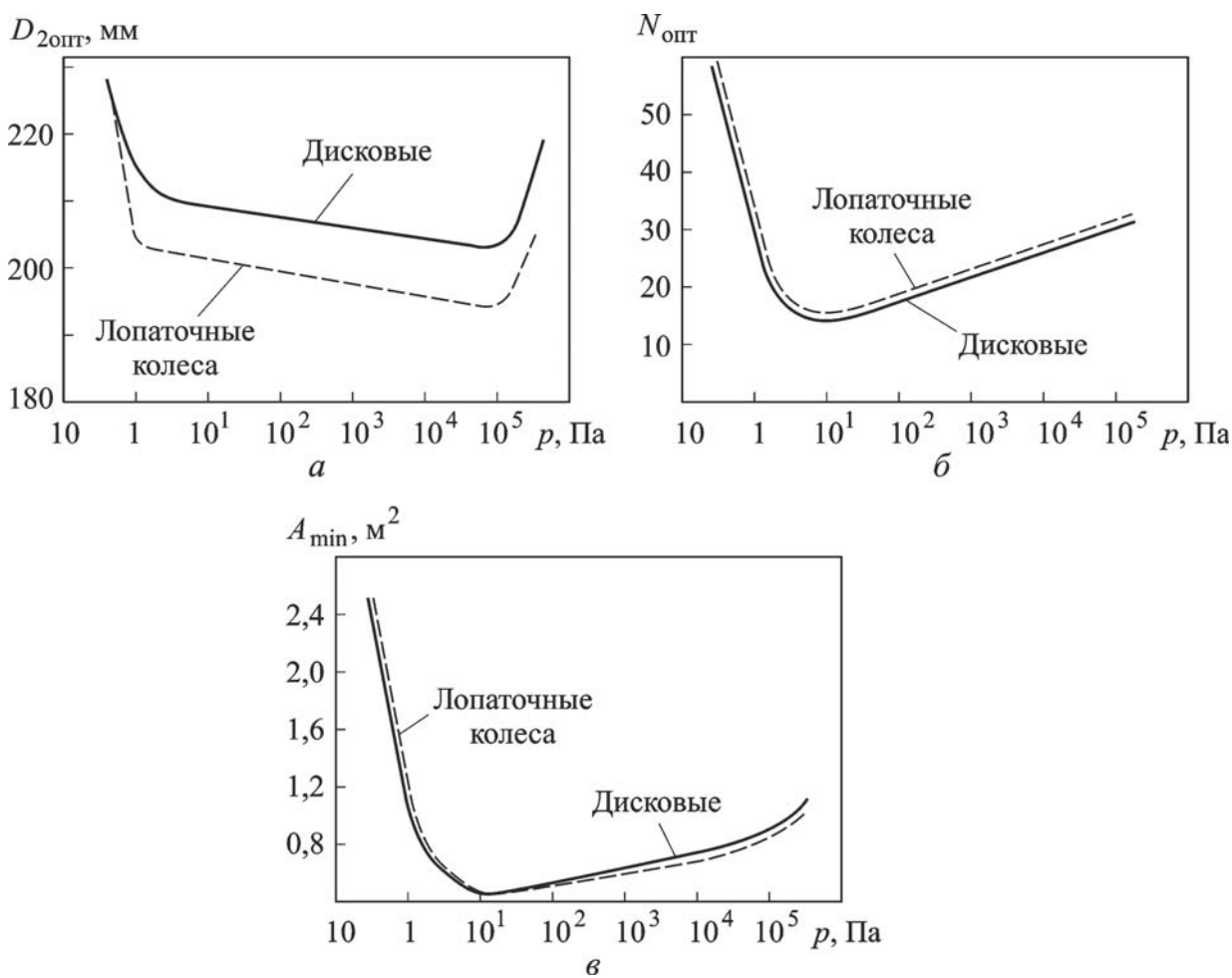


Рис. 1. Зависимости оптимальных значений наружного диаметра колес  $D_{2\text{опт}}$  (а), значений числа колес  $N_{\text{опт}}$  (б) и минимальных значений условного объема пакета колес  $A_{\text{min}}$  (в) от давлений всасывания  $p$  для лопаточных и дисковых колес

определенные значения оптимальных параметров, существенно меняющихся для различных значений  $p$ .

Как следует из графиков, при увеличении давления  $p > 10^{-1} \dots 1$  Па существенно возрастают оптимальные значения  $D_{2\text{опт}}$  и  $N_{\text{опт}}$ , что, в свою очередь, приводит к увеличению  $A_{\text{min}}$ . Это связано с нарушением молекулярного режима течения газа в проточной части насоса и, соответственно, ухудшением откачных параметров колес ТВН и, в свою очередь, приводит к необходимости увеличения размеров колес и их числа в пакете с тем, чтобы обеспечить требуемую быстроту откачки.

При значительном уменьшении давления газа на стороне всасывания ( $p < 10^{-4} \dots 10^{-5}$  Па) имеет место также рост оптимальных параметров  $D_{2\text{опт}}$  и  $N_{\text{опт}}$ , что обусловливается более существенным влиянием внутренних газовыделений и перетеканий через радиальные зазоры.

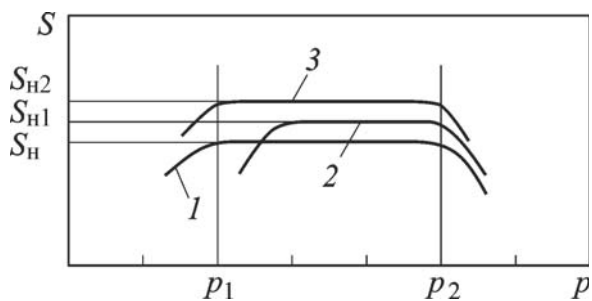
В результате оптимальные значения  $A_{\text{min}}$  имеют место при давлениях в диапазоне  $p = 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  Па.

Одним из весомых преимуществ ТВН является постоянство создаваемой быстроты откачки в широком диапазоне давлений. Как показали приведенные результаты расчетов, обеспечить оптимизацию параметров проточной части ТВН в полном объеме в обычно требуемом диапазоне изменения давлений  $p$  не представляется возможным. Поэтому с учетом данной особенности предлагается следующая методология определения оптимальных параметров проточной части ТВН.

На рис. 2 представлены типовые откачные характеристики ТВН.

Пусть графическая зависимость 1 — это требуемая по техническому заданию откачная характеристика, когда обеспечивается требуемая быстрота откачки  $S$  в диапазоне давлений  $p_1 - p_2$ . Определив оптимальные параметры проточной части насоса, поддерживающей требуемое значение быстроты откачки при давлении  $p_2$ , можно, например, получить откачную характеристику (зависимость 2) с быстротой откачки  $S_{\text{н1}} \geq S_{\text{н}}$  при давлении  $p_2$ . Однако, при давлении  $p_1$  создаваемая быстрота откачки не достигает необходимого значения.

Поэтому, введя определенную коррекцию в параметры колес в пакете ТВН, добиваются обеспечения быстроты откачки  $S_{\text{н2}} \geq S_{\text{н}}$  во всем диапазоне давлений  $p_1 - p_2$ . При этом обязательно решают задачу минимизации параметра  $\Delta S_{\text{н}} = S_{\text{н2}} - S_{\text{н1}}$ .



**Рис. 2. Откачные характеристики вариантов разрабатываемого ТВН:**

1 — откачная характеристика в соответствии с ТЗ; 2 и 3 — откачные характеристики варианта ТВН, обеспечивающие необходимые параметры при давлении  $p_2$  и в заданном диапазоне давлений  $p_1 - p_2$  соответственно

Таким образом, определены оптимальные параметры проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса, обеспечивающего заданную откачную характеристику.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В а к у м н а я 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.
2. Д е м и х о в К. Е., Н и к у л и н Н. К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 255 с.
3. Д е м и х о в К. Е., С а п е ж и н с к и й М. Г., О г л о б л и н И. И. / Оптимизация проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 79–82.
4. Д е м и х о в К. Е. Оптимальные геометрические параметры межлопаточных каналов колес турбомолекулярного вакуумного насоса // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 12. – С. 66–69.

Статья поступила в редакцию 10.04.2012

Константин Евгеньевич Демихов окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 150 научных работ в области вакуумной и компрессорной техники.

K.Ye. Demikhov graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of vacuum and compressor technology.