

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАБОЧИХ КОЛЕС В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

К.Е. Демихов

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

e-mail: ked@bmstu.ru

Определение оптимальных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов является актуальной проблемой современного вакуумного машиностроения. Поскольку вакуумные насосы обычно входят в состав самых разнообразных установок, то необходима оценка влияния внешних условий на откачные устройства, что, безусловно, сказывается на обеспечении оптимизации параметров насоса. Одним из методов является обособанное формирование проточной части вакуумного турбомолекулярного насоса с оптимальными параметрами рабочих колес. В настоящее время известны разнообразные конструкции рабочих колес, применяемых в турбомолекулярных вакуумных насосах. Они различаются не только параметрами, но и эксплуатационными характеристиками. Поэтому применение конкретных видов рабочих колес в создаваемых турбомолекулярных насосах — это важная задача, результаты решения которой скажутся на эффективности самого насоса. Рассмотрена методика выбора конструкций рабочих колес в проточной части турбомолекулярных вакуумных насосов, работающих в широком диапазоне давлений. Проанализировано влияние различных факторов на основные параметры турбомолекулярных насосов, что позволит повысить эффективность насоса. Приведены рекомендации по использованию лопаточных и дисковых колес при различных условиях эксплуатации насоса. Применение их на практике дает возможность улучшить основные характеристики турбомолекулярных вакуумных насосов.

Ключевые слова: рабочее колесо, проточная часть, лопаточные и дисковые колеса, параметры откачки, быстрота действия.

EFFICIENCY OF USING DIFFERENT DESIGNS OF WORKING WHEELS IN THE FLOW PATH OF A TURBOMOLECULAR VACUUM PUMP

K.Ye. Demikhov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: ked@bmstu.ru

The determination of optimal parameters of turbomolecular vacuum pumps is an urgent problem of the modern vacuum machine building. Since vacuum pumps are typically included in the most diverse facilities, it is necessary to estimate the influence of external conditions on the exhaust units, which undoubtedly affects the pump parameter optimization to be provided. One of the methods to resolve the problem is the reasonable formation of the flow path of a vacuum turbomolecular pump with optimal parameters of working wheels. Now the diversified designs of working wheels are known which are applied in turbomolecular vacuum pumps. They differ not only in parameters but also in operating characteristics. Therefore the application of particular types of working wheels in the created turbomolecular pumps is an important task, the results of fulfillment of which will have an effect upon the efficiency of the pump itself. A technique is considered for choosing designs of working wheels in the flow path of turbomolecular vacuum pumps operating in a broad pressure

range. The influence of different factors on basic parameters of turbomolecular pumps is analyzed, which will allow the pump efficiency to be increased. Recommendations on using the blade and disc wheels under various conditions of the pump operation are given. The application of the recommendations in practice will make it possible to improve main characteristics of turbomolecular vacuum pumps.

Keywords: working wheel, flow path, blade and disc wheels, exhaust parameters, operation rate.

Существенным преимуществом вакуумных турбомолекулярных насосов (ТМН) по сравнению с другими высоковакуумными средствами откачки является относительное постоянство создаваемой быстроты действия в широком диапазоне изменения давления газа на стороне всасывания. Причем протяженность откачной характеристики зависит от целого ряда факторов, в числе которых применение разных конструкций рабочих колес [1–7].

В настоящее время в насосах с осевым направлением потока газа широко распространены колеса лопаточного и дискового типа, различающиеся формой и параметрами рабочего канала [2] (проблемы технологического характера не затрагиваются).

Колеса лопаточного типа характеризуются переменной шириной канала по радиусу, что позволяет существенным образом увеличить торцевую площадь каналов и соответственно быстроту откачки, создаваемую колесом. При этом с ростом проводимости каналов в направлении откачки (для прямого потока газа) увеличивается обратный поток газа, что может привести к определенному снижению создаваемой каналами степени повышения давлений τ [1].

Колеса дискового типа характеризуются постоянной шириной канала по радиусу, что позволяет достичь в них более высокой степени повышения давлений τ . Здесь решающее значение имеет возможность изменения в широком диапазоне основных параметров каналов колес: угла наклона лопатки α и относительной ширины канала колеса a/b [1, 2, 8].

Таким образом, эффективность использования колес таких конструкций должна зависеть от требуемых параметров откачки проектируемого ТМН.

На рис. 1 приведены результаты расчетов минимальных значений наружного диаметра колес $D_{2\min}$, обеспечивающих различные значения быстроты откачки S при давлениях на стороне всасывания $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па (кривая 1) и $p = 6,67 \cdot 10^{-6}$ Па (кривая 2). Материал колес — дюралюминий марки Д-16; окружная скорость колеса на наружном диаметре $U_2 = 200$ м/с.

Штриховыми линиями показаны зависимости $S = f(2_{\min})$ при использовании лопаточных колес в проточной части, сплошными линиями — зависимости для дисковых колес. Как видно на графиках, взятых в качестве примеров параметров насосов, применение лопаточных рабочих колес в проточной части является предпочтительным перед

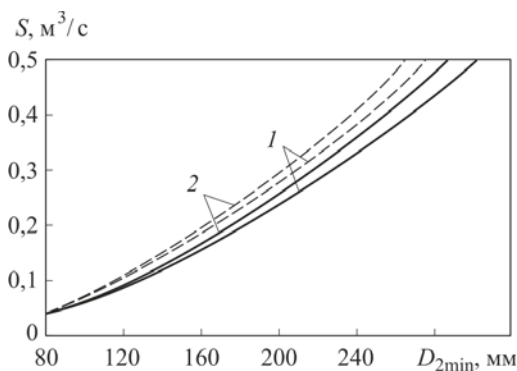


Рис. 1. Результаты расчетов минимальных диаметров колеса

оказывает существенное влияние рост газовыделений с внутренних поверхностей насоса, что является важным фактором при проектировании и эксплуатации ТМН.

Как известно, вакуумные ТМН характеризуются широким рабочим диапазоном изменения давлений газа на стороне всасывания [9–11]. Поэтому при определении параметров проточной части ТМН, предназначенного для работы в заданном диапазоне давлений, возникает проблема выбора конструкции и размеров рабочих колес.

На основе известного метода расчета геометрических размеров рабочих колес [1, 2] для заданной быстроты откачки S_n рассчитывается ее максимальное значение S_{max} при определенном коэффициенте $K_s = S_n/S_{max}$. Значение этого коэффициента зависит от целого ряда факторов, в том числе от конструкции колес и давления газа p на стороне всасывания [2].

На рис. 2 графически приведены результаты расчета коэффициента K_s по условиям на стороне всасывания в зависимости от давления p и конструкции колес (сплошная линия — в случае применения дисковых колес, штриховая — лопаточных колес).

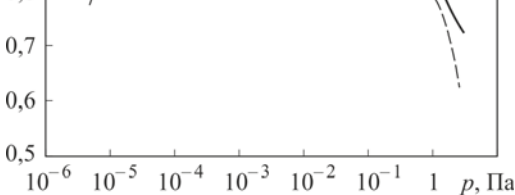


Рис. 2. Результаты расчета коэффициента $K_s = S_n/S_{max}$ для различных давлений газа p

применением дисковых колес, так как при одном и том же значении D_{2min} создаваемое значение быстроты откачки становится больше. Причем для более производительных насосов эффективность применения лопаточных колес возрастает. Уменьшение давления газа на стороне всасывания для конкретного D_{2min} приводит к снижению обеспечиваемой быстроты откачки, так как на это

оказывает существенное влияние рост газовыделений с внутренних поверхностей насоса, что является важным фактором при проектировании и эксплуатации ТМН.

Как известно, вакуумные ТМН характеризуются широким рабочим диапазоном изменения давлений газа на стороне всасывания [9–11]. Поэтому при определении параметров проточной части ТМН, предназначенного для работы в заданном диапазоне давлений, возникает проблема выбора конструкции и размеров рабочих колес.

На основе известного метода расчета геометрических размеров рабочих колес [1, 2] для заданной быстроты откачки S_n рассчитывается ее максимальное значение S_{max} при определенном коэффициенте $K_s = S_n/S_{max}$. Значение этого коэффициента зависит от целого ряда факторов, в том числе от конструкции колес и давления газа p на стороне всасывания [2].

На рис. 2 графически приведены результаты расчета коэффициента K_s по условиям на стороне всасывания в зависимости от давления p и конструкции колес (сплошная линия — в случае применения дисковых колес, штриховая — лопаточных колес).

Расчеты выполнены для осевого ТМН с номинальной быстротой откачки $S_n = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ по азоту; окружная скорость $U_2 = 150 \text{ м/с}$, давление на стороне нагнетания $p_{cp} = 0,1 \text{ Па}$.

Как следует из рис. 2, при уменьшении давления всасывания от $p = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ значение

отношения S_n/S_{\max} уменьшается, это связано с ростом объемов внутренних газовыделений, что, в свою очередь, приводит к уменьшению результирующей быстроты откачки насоса S_n .

При увеличении давления более $p = 10^{-5}$ Па значения коэффициента K_s также снижаются, что связано уже со все более возрастающим влиянием нарушения молекулярного режима течения газа в проточной части ТМН, вызывающего снижение значений параметров откачки межлопаточными каналами колеса насоса. При давлении $p > 1$ Па нарушение молекулярного режима течения имеет место практически во всех колесах ТМН.

Отметим и тот факт, что при необходимости обеспечения насосом заданной быстроты откачки S_n при определенном давлении газа на стороне всасывания отношение S_n/S_{\max} при использовании в проточной части ТМН лопаточных колес меньше, чем в случае применения дисковых колес. Это связано с учетом особенностей откачных характеристик лопаточных и дисковых колес – достижение требуемого отношения давлений пакетом колес в случае дисковых рабочих колес возможно при более высоких значениях быстроты откачки в каждом колесе пакета, в том числе и первом колесе, расположенном на стороне всасывания ТМН. Именно это и определяет значение коэффициента $K_s = S_n/S_{\max}$.

Таким образом, при такой постановке проблемы предпочтительным является использование дисковых колес.

При проектировании современных ТМН необходимо оптимизировать основные параметры. Одним из возможных критериев оптимальности может быть значение условного объема проточной части ТМН:

$$A = \frac{\pi}{4} D_2^2 N,$$

где D_2 – наружный диаметр колес, N – число колес в пакете проточной части. Результатом оптимизации является минимальное значение условного объема A [1].

С использованием разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана программ были рассчитаны оптимальные значения условного объема A_{\min} для различных насосов [1]. Результаты представлены на рис. 3. Расчеты проводились для насосов с быстротой откачки $S_n = 0,05 \dots 0,5$ м³/с по азоту для значений давления газа на стороне всасывания $p = 2,67 \times 10^{-6}$ Па и $p = 6,67 \cdot 10^{-6}$ Па.

Как следует из графиков, в рассмотренном диапазоне S_n оптимальные значения условного объема проточной части насоса A_{\min} в случае применения лопаточных колес меньше, чем для вариантов использования дисковых рабочих колес. Это связано, прежде всего, с меньшими значениями наружного диаметра колес $D_{2\min}$ для лопаточного варианта конструкции.

Таким образом, выбор конструкции рабочих колес в проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса должен осуществлять-

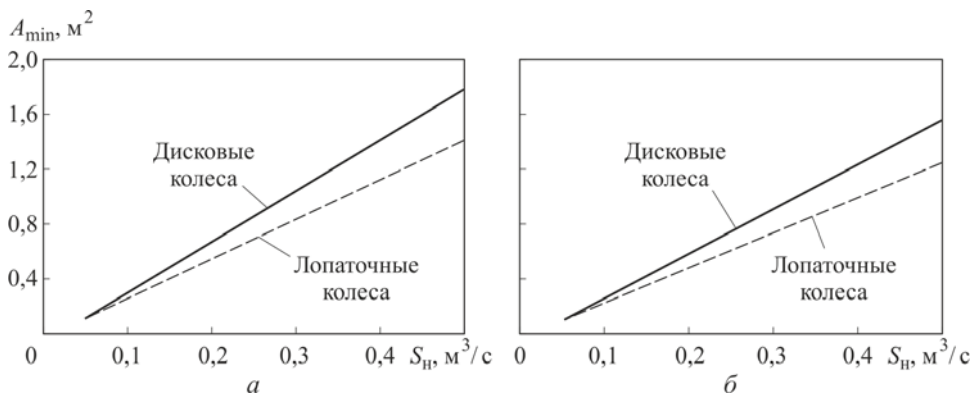


Рис. 3. Определение оптимального значения условного объема проточной части A_{\min} при давлении газа $p = 2,67 \cdot 10^{-6}$ Па (а) и $p = 6,67 \cdot 10^{-6}$ Па (б)

ся на основе анализа требований, предъявляемых к проектируемому ТМН и основным параметрам откачки.

Например, при необходимости обеспечения повышенных значений быстроты действия при определенном давлении газа целесообразно применять лопаточные колеса. Для насоса, который должен поддерживать относительно высокие значения S_n в широком диапазоне давлений предпочтительным может быть вариант с использованием дисковых рабочих колес. В случае оптимизации габаритных геометрических параметров насоса целесообразно использовать лопаточные колеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 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. 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.
4. Демихов К.Е., Куликова Т.В. Исследование параметров откачных характеристик молекулярного вакуумного насоса // Конверсия в машиностроении. 2007. № 4-5. С. 81-84.
5. Bernhard K. Calculation of pumping speed of turbo-molecular vacuum pump by means of simple mechanical data // Vacuum Science and Technology. 1983. Vol. 1 (2). P. 136-139.
6. Chu Y., Hua Z. The statistical theory of turbo-molecular pumps// Adv.YVST. 1982. Vol. 20 (4). P. 1101-1104.
7. Fustoss L. Monte-Carlo calculation for free molecular and near-free molecular flow thought axially symmetric tubes// Vacuum 1981. Vol. 31, no. 6. P. 243-246.
8. Henning H., Knorr G. New series of air-cooled turbo-molecular pumps for industry and research to be mounted in any position //Vacuum Technik. 1981. Bd. 30. Y. N.Y. P. 98-101.
9. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Высоковакуумная откачка направленных потоков газа // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2011. № 11. С. 28-32.
10. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкарь Е.В. Расчет параметров течения газа в тонких каналах с подвижной стенкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 4. С. 19-27.

11. Демихов К.Е., Никулин Н.К., Свичкаръ Е.В. Молекулярные потоки в высоковакуумных системах. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. 105 с.

REFERENCES

- [1] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 255 p.
- [2] Demikhov K.E., Panfilov Y.V., Nikulin N.K., Avtonomova I.V., Aleksandrova A.T., Androsov A.V., Burmistrov V.A., Bykov D.V., Deulin E.A., Ivanovskiy G.F., Isaev A.V., Kalinkin D.A., Kapustin E.N., Kemenov V.N., Kupriyanov V.I., Kurbatov O.K., Minaychev V.E., Mikhaylov V.P., Nesterov S.B., Odinkov V.V., Petrov B.C., Pustovoyt Y.M., Saksaganskiy G.L., Sazhnev S.V., Salikeev S.I., Tvorogov I.V., Frolov E.S., Tseytlin A.B. Vakuumnaya tekhnika. Spravochnik. [Vacuum technology. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p.
- [3] Demikhov K.E. Optimization of flow in mechanical high-vacuum pumps in a wide range of pressures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2012, no. 3, pp. 80–86 (in Russ.).
- [4] Demikhov K.E., Kulikova T.V. Investigation of pumping characteristics of a molecular vacuum pump. *Konvers. Mashinotr.* [Convers. Mech. Eng.], 2007, nos. 4–5, pp. 81–84 (in Russ.).
- [5] Bernhard K. Calculation of pumping speed of turbo-molecular vacuum pump by means of simple mechanical data. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1983, vol. 1(2), pp. 136–139.
- [6] Chu Y., Hua Z. The statistical theory of turbo-molecular pumps. *Adv. YVST*, 1982, vol. 20, no. 4, pp. 1101–1104.
- [7] Fustoss L. Monte-Carlo calculation for free molecular and near-free molecular flow thought axially symmetric tubes. *Vacuum*, 1981, vol. 31, no. 6, pp. 243–246.
- [8] Henning H., Knorr G. New series of air-cooled turbo-molecular pumps for industry and research to be mounted in any position. *Vacuum Technik*, 1981, no. 4, pp. 98–101.
- [9] Demikhov K.E., Nikulin N.K. High-vacuum pumping of directed gas flows. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinotr.* [Proc. Univ. Mech. Eng.], 2011, no. 11, pp. 28–32 (in Russ.).
- [10] Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Calculation of gas flow parameters in narrow channels with a movable wall. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2009, no. 4, pp. 19–27 (in Russ.).
- [11] Demikhov K.E., Nikulin N.K., Svichkar' E.V. Molekulyarnye potoki v vysokovakuumnykh sistemakh [Molecular flows in high-pressure systems]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2013. 105 p.

Статья поступила в редакцию 20.05.2013

Константин Евгеньевич Демихов — заведующий кафедрой “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Автор более 170 научных работ в области вакуумного машиностроения.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

K.Ye. Demikhov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Vacuum and Compressor Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University, Honored Science Worker of RF. Author of more than 170 publications in the field of vacuum machine building.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.