

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОТКАЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ С ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫМ ВАКУУМНЫМ НАСОСОМ

Е. В. Свичкарь, Н. К. Никулин, К. Е. Демихов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Откачная характеристика высоковакуумной системы зависит от ряда факторов: откачной характеристики высоковакуумного турбомолекулярного насоса (ТМН), проводимости соединительных магистралей, откачной характеристики форвакуумной системы откачки, натекания газа в систему, а именно потоков газовой выделения, потоков газа из-за негерметичности элементов конструкции. В работе рассмотрено влияние этих факторов на откачную характеристику вакуумной системы с ТМН. В работе предложен метод определения параметров форвакуумного насоса, обеспечивающего улучшение откачной характеристики вакуумной системы с ТМН при повышенных давлениях всасывания.

Ключевые слова: вакуумная система, откачная характеристика, форвакуум, давление, турбомолекулярный насос, проводимость, быстрота действия, поток.

Введение

Вакуумные технологии нашли широкое применение в металлургии, химии, нефтехимии, химическом машиностроении, угледобывающей и горнорудной промышленности, энергетике, авиационной промышленности, научном приборостроении, космонавтике и в научных исследованиях. Важную роль вакуум получил в получении тонких плёнок для полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, тонкопленочных солнечных элементов, а также и в других наукоемких областях.

Практически все технологические процессы в различных отраслях промышленности, проходящие в условиях вакуума, характеризуются высокой чувствительностью к составу рабочего газа в откачиваемых объемах [1–5]. Рабочая среда в системе оказывает значительное влияние на качество изделия и возможность проведения самого процесса. Поэтому одной из актуальных задач развития и совершенствования вакуумных систем является обеспечение безмасляности технологического процесса. Данное требование достигается при отсутствии контакта газа с элементами, содержащими пары масла или загрязняющие элементы, на протяженности всего пути перемещения откачиваемого газа, от рабочей камеры до атмосферы.

Повышенные требования предъявляются не только к чистоте вакуума. Разработчики вакуумной техники решают задачи обеспечения и поддержания заданного состава среды в необходимом диапазоне давлений [2, 6–7].

В настоящее время используется ряд вакуумных насосов, позволяющих обеспечить безмасляную откачку, но все они имеют ограничение, прежде всего по диапазону рабочих давлений, требуют дополнительную предварительную откачку и обладают селективностью к различным газам [7]. В свою очередь, установка предварительной системы откачки форвакуумными насосами увеличивает габариты и стоимость системы, усложняет её эксплуатацию

при ухудшении откачной характеристики вакуумной системы в целом [8–10].

Высоковакуумные системы с турбомолекулярными высоковакуумными насосами (ТМН) находят всё большее применение в различных областях промышленности [6–16]. Расширение области их применения связано с наличием ряда положительных свойств ТМН. Среди них можно выделить безмасляность, пониженную селективность при откачке различных газов, экономичность при эксплуатации. Откачная характеристика вакуумной системы с такими насосами в основном определяется откачной характеристикой высоковакуумного насоса, который обладает наибольшей эффективностью работы в области молекулярного режима течения газа (при числе Кнудсена $Kn > 1$) [6]. Схема вакуумной системы с ТМН представлена на рис. 1. При нарушении молекулярного режима течения откачная характеристика насоса ухудшается. В этом случае снижается быстрота действия насоса S и отношение давлений τ , создаваемое им. Соответственно, ухудшаются параметры откачной характеристики вакуумной системы. Обеспечение эффективности работы ТМН достигается предварительной откачкой (форвакуумной откачкой). Форвакуумная откачка обеспечивает удаление газа, поступающего из ТМН, и необходимое давление на выходе из его проточной части.

Безмасляная откачка высоковакуумной системой с ТМН достигается при наличии безмасляной форвакуумной откачки. В связи с чем форвакуумные насосы также должны быть безмасляными. К таким насосам можно отнести спиральные, винтовые, мембранные вакуумные насосы [1–7, 17].

Предельное остаточное давление, создаваемое мембранными насосами, около 100 Па и выше, быстрота действия варьируется от 0,1 л/с до 10 л/с. Эти насосы могут применяться в качестве форвакуумных для комбинированных ТМН. Комбинированными турбомолекулярными насосами считаются насосы, в которых помимо турбомолекулярных рабочих

колес установлены молекулярные, вихревые, молекулярно-вязкостные ступени [7].

Винтовые вакуумные насосы считаются условно безмасляными. Так как полости, содержащие масло, отделены от рабочих полостей уплотнениями. Однако всегда есть определённый поток натеканий углеводородов через уплотнение. Предельное остаточное давление, создаваемое винтовыми вакуумными насосами около 0,1 Па. Быстрота действия варьируется от нескольких л/с до нескольких сотен л/с.

Спиральные вакуумные насосы обеспечивают предельное давление 0,1 Па и обладают быстротой действия до 100 л/с спиральных насосов. Спиральные насосы при определенном исполнении рабочих элементов можно считать безмасляными. Как правило, это достигается добавлением сильфонов, отсекающих рабочую полость от подшипниковых узлов.

В связи с чем основной целью данной работы является определение влияния основных факторов на откачную характеристику высоковакуумной системы и разработка методики выбора форвакуумного насоса с достаточной откачной характеристикой для обеспечения эффективной работы вакуумной системы во всём диапазоне рабочих давлений.

Методика расчета откачной характеристики насоса

На рис. 2 представлена типичная откачная характеристика ТМН, т. е. зависимость быстроты действия насоса по азоту от давления всасывания (кривая 1). На кривой 2 рис. 2 показана зависимость быстроты откачки вакуумной системы при откачке азота от давления всасывания высоковакуумного насоса. Снижение быстроты откачки системы $S_{отк}$ по сравнению с быстротой действия насоса S происходит из-за сопротивления присоединительной магистрали насоса к откачиваемому объёму и различных натеканий. Рассчитывается по основному уравнению вакуумной техники [17]:

$$\frac{1}{S_{отк}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{U},$$

где U — проводимость присоединительной магистрали насоса к откачиваемому объёму.

Расчет откачной характеристики ТМН и всей вакуумной системы в молекулярном режиме течения газа проводится для одного газа, например, для азота. Расчетные параметры, как правило, не зависят от других составляющих газов, если рассматривать не чистый газ, а смесь газов.

По геометрическим параметрам присоединительной магистрали можно определить её проводимость в зависимости от рода откачиваемого газа при рабочей температуре. Таким образом, определяется откачная характеристика $S(p_1)$ насоса и откачная характеристика вакуумной системы $S_{отк}(p)$. В данном случае p_1 — это давление газа, которое измеряется во входном фланце турбомолекулярного насоса либо вблизи от него, а p — это давление газа, измеренное непосредственно в откачиваемом объёме.

Увеличение предельного остаточного давления в основном вызвано газовыделением с поверхностей откачиваемого объёма и уменьшением быстроты откачки вакуумной системы.

В области низких давлений быстрота откачки камеры, быстрота действия насоса и давление всасывания p_1 практически полностью зависят от потока

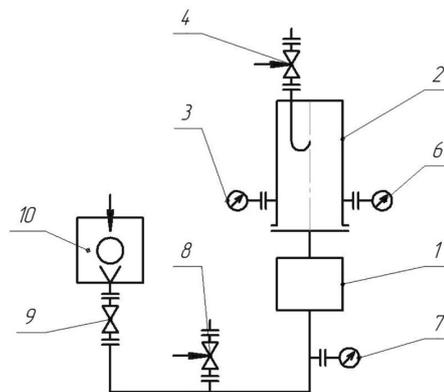


Рис. 1. Схема вакуумной установки:

- 1 — турбомолекулярный вакуумный насос;
 - 2 — вакуумная камера;
 - 3, 6 — манометрические преобразователи давления;
 - 4 — регулятор расхода газа; 5 — напускная трубка;
 - 7 — манометрический преобразователь давления на выходном трубопроводе;
 - 8 — натекатель на выходном трубопроводе;
 - 9 — клапан; 10 — форвакуумный насос
- Fig. 1. Scheme of a vacuum installation:
- 1 — turbomolecular vacuum pump; 2 — the vacuum chamber;
 - 3, 6 — manometric pressure converters;
 - 4 — gas flow regulator; 5 — an inlet tube;
 - 7 — manometric pressure converters on the outlet pipeline;
 - 8 — drain on the outlet pipeline; 9 — the valve;
 - 10 — forevacuum pump

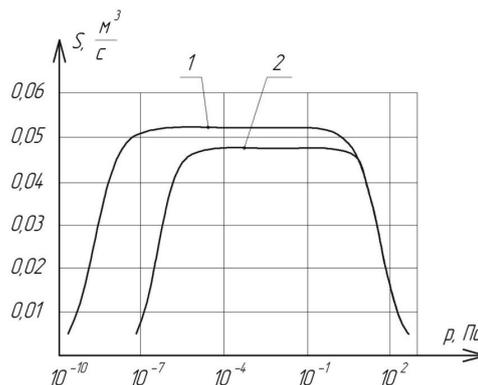


Рис. 2. Откачные характеристики вакуумных насосов:

- 1 — турбомолекулярного насоса;
 - 2 — вакуумной системы с турбомолекулярным насосом
- Fig. 2. Pumping characteristics of vacuum pumps:
- 1 — turbomolecular pump;
 - 2 — a vacuum system with a turbomolecular pump

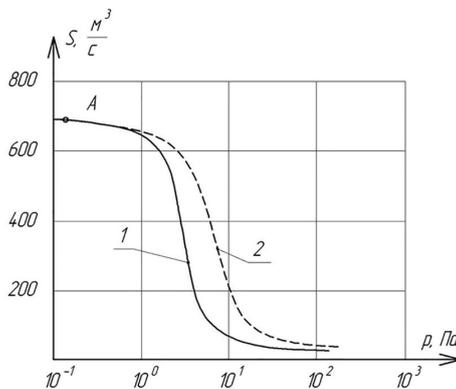


Рис. 3. Зависимость быстроты действия насоса от давления всасывания

Fig. 3. Dependence of the speed of the pump action on the suction pressure

газовыделения $Q_{гв}$ с поверхностей полости всасывания и проточной части насоса

$$p_1 = \frac{Q_{гв}}{S}.$$

Данное условие выполняется в том случае, если число рабочих колёс ТМН достаточно, чтобы обеспечить такое давление. В области молекулярного режима течения по мере возрастания давления всасывания быстрота действия насоса остаётся практически постоянной и приблизительно равна своей максимальной величине $S \approx S_{max}$. В этом случае S_{max} является величиной быстроты действия рассматриваемого насоса при отношении давлений $\tau = 1$. При дальнейшем повышении давлений на всасывании, когда практически вся проточная часть насоса работает в области переходного режима течения газа ($Kл < 1$), снижаются и быстрота действия насоса, и отношение давлений.

Для обеспечения эффективной работы ТМН необходима форвакуумная откачка потока газа, поступающего из ТМН, при форвакуумном давлении p_{ϕ} , обеспечивающая эффективную работу рабочих элементов ТМН. Соответственно, для определения откачной характеристики ТМН необходимо подобрать необходимую откачную характеристику форвакуумного насоса.

Очевидно форвакуумный насос должен обеспечивать откачку газа, поступающего из ТМН при его работе, не вызывая снижения быстроты действия ТМН, а максимальная величина потока соответствует резкому снижению S и τ . Этим параметрам откачной характеристики ТМН соответствуют параметры форвакуумной откачки (наибольшее допустимое форвакуумное давление и быстрота действия форвакуумного насоса). Соответствие выбора форвакуумного насоса для обеспечения работы ТМН проверяется из расчёта откачной характеристики ТМН с данным форвакуумным насосом.

На откачную характеристику ТМН при его работе в области низких давлений быстрота действия форвакуумного насоса практически не влияет. Насос работает в области своего минимального давления, например, для работы ТМН «Turbo-V 701 Navigator» фирмы «Varian» в диапазоне давлений от предельного остаточного до 0,3 Па рекомендуется сухой спиральный вакуумный насос «Varian TS 300», обеспечивающий предельное остаточное давление ~ 1 Па и быстроту действия 2–3 л/с в диапазоне давлений выше 5 Па [18], а для работы в области давлений от предельного остаточного до 0,03 Па достаточно быстроты действия 0,3 л/с. Таким образом, необходимо определить совместную работу ТМН и форвакуумного насоса в области высоких давлений при нарушении молекулярного режима течения газа в проточной части ТМН.

При известных зависимостях S_{max} и τ_{max} ТМН от давления (числа Кнудсена) по откачной характеристике форвакуумного насоса $S_{\phi}(p_{\phi})$ определяется откачная характеристика ТМН $S(p)$.

При откачке форвакуумным насосом потока газа Q форвакуумный насос обеспечивает быстроту действия S_{ϕ} при давлении p_{ϕ} , т. е.

$$Q = S_{\phi} \cdot p_{\phi}.$$

В общем случае поток Q образуется из потока газа, поступающего из ТМН Q_0 , потока газа из-за

негерметичности соединительных магистралей $Q_{нр}$, потока газовыделения с поверхностей форвакуумной полости $Q_{гв}$

$$Q = Q_0 + Q_{нр} + Q_{гв}.$$

Последние две составляющие потока, $Q_{нр}$ и $Q_{гв}$, в области высоких давлений пренебрежимо малы по сравнению с Q_0 . Поэтому в дальнейшем принимается:

$$Q = Q_0.$$

Также принимается, что проточная часть ТМН достаточно герметична, т. е. $Q_{нр}$ полости ТМН также равна нулю, а объёмная скорость газовыделения проточной части ТМН пренебрежимо мала по сравнению с быстротой действия $Q_{гв}/p \approx 0$. В этих условиях ТМН откачивает тот же поток Q , что и форвакуумный насос с быстротой действия S_1 , при давлении на всасывании p_1 . Тогда

$$Q = S_1 \cdot p_1.$$

Быстрота действия ТМН S_1 определяется из соотношения:

$$S_1 = S_{\phi} \cdot \tau,$$

где τ — отношение давлений, создаваемое ТМН при быстроте действия S_1 и форвакуумном давлении p_{ϕ} , [6–7, 17]

$$\tau = \tau_{max} - \frac{S_1}{S_{max}} \cdot (\tau_{max} - 1),$$

или

$$\tau = \frac{\tau_{max}}{1 + \frac{S_1}{S_{max}} \cdot (\tau_{max} - 1)}.$$

При этом обеспечивается давление p_1 , которое можно определить следующим образом:

$$p_1 = p_{\phi} \cdot \tau.$$

На примере экспериментального ТМН-700, аналогичного по характеристикам насосу «Turbo-V 701 Navigator» [17, 18], рассматривается изменение откачной характеристики ТМН 700 при использовании различных форвакуумных насосов «Varian TS300» и «Varian TS600».

При расчёте откачной характеристики ТМН-700 откачные характеристики форвакуумных насосов в диапазоне давлений от 5 до 10^5 Па представлялись в виде аналитических зависимостей:

$$p_{\phi} = 11,211 + 0,333Q, \text{ для «Varian TS 300»,}$$

$$p_{\phi} = 15,136 + 0,15Q, \text{ для «Varian TS 600»,}$$

где размерность величины потока — л/Па/с.

По рассчитанной величине p_{ϕ} вычислялись S_{ϕ} , S_{max} и τ_{max} ТМН. S_{max} и τ_{max} ТМН вычислялись по эмпирическим зависимостям, полученным для экспериментального ТМН-700 в диапазоне форвакуумных давлений от 5 Па до 10^3 Па:

$$S_{max} = -225 \arctg(7 \log(p) - 3,3) + 360,$$

$$\tau_{max} = -5 \cdot 10^4 \arctg(7 \log(p) - 3,3) + 15145.$$

Известные величины S_{max} и τ_{max} позволяют вычислить отношение давлений ТМН, а затем его быстроту действия S и давление всасывания p :

$$S = S_{\phi} \cdot \tau,$$
$$p = \frac{P_{\phi}}{\tau}.$$

Результаты расчёта быстроты действия насоса от давления всасывания при работе с форвакуумным насосом «Varian TS300» (кривая 1) и «Varian TS600» (кривая 2) представлены на рис. 3. Расчёт откачной характеристики в области молекулярного режима течения проводится по известным методикам [1–6, 8, 9, 17].

Заключение

Результаты расчёта показывают, что увеличение быстроты действия форвакуумного насоса больше, чем необходимо для удаления потока газа в момент нарушения молекулярного режима течения газа в проточной части ТМН, повышает быстроту действия ТМН на правой части откачной характеристики, когда насос работает при относительно высоком давлении всасывания, но на практике это диапазон неустойчивой работы насоса.

Таким образом, для определения откачной характеристики высоковакуумной системы с ТМН по известным зависимостям [17] вычисляется проводимость присоединительной магистрали. Из экспериментальных исследований или по паспортным данным вычисляются основные откачные параметры ТМН при его работе в переходном и вязкостном режимах течения газа. По приведенным выше аналитическим зависимостям для максимального откачиваемого потока выбирается форвакуумный насос. Результаты расчётов и обзор существующих вакуумных систем на базе ТМН [6–16] позволяют сделать вывод, что для ТМН необходимо выбирать форвакуумный насос по потоку откачиваемого газа, соответствующего рабочей точке А откачной характеристики ТМН для режима течения, характеризующегося числом $Kл$, равным 2...3. Создаваемое ТМН отношение давлений в этом режиме обычно лежит в диапазоне от 300 до 1000, а быстрота действия начинает уменьшаться. Для комбинированных ТМН с молекулярными ступенями это отношение может быть увеличено до 10^6 , и в этом случае необходимое форвакуумное давление может быть увеличено и могут применяться насосы с меньшей быстротой и большим предельным остаточным давлением, например, мембранные. Применение форвакуумных насосов с быстротой действия большей, чем достаточная для удаления потока газа, соответствующего рабочей точке А, уменьшает скорость снижения быстроты действия ТМН при давлении больше, чем давление в точке А. При этом практически не меняется основная откачная характеристика ТМН при более низких давлениях. В то же время уменьшение быстроты действия форвакуумного насоса уменьшает наибольшее рабочее давление ТМН и, соответственно, величину максимального откачиваемого потока.

Список источников

1. Hoffman D. M., Singh B., Thomas J. H. (Eds). Handbook of Vacuum Science and Technology // Academic Press, 1997. San Diego, London, New York, Tokyo, Toronto. XXII, 839 p. ISBN 0-12-352065-7.

2. Хаблянян М. Х., Саксаганский Г. Л., Бурмистров А. В. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 1. Инженерно-физические основы. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 232 с. ISBN 978-5-7882-1447-4.

3. Lafferty J. M. Foundations of Vacuum Science and Technology. Wiley, NY, 1998. 1121 p. ISBN 0-471-17593-5.

4. Yoshimura N. Vacuum Technology. Practice for Scientific Instruments. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. X, 350 p. ISBN 978-3-540-74432-0.

5. Chambers A. Modern Vacuum Physics // Masters Series in Physics and astronomy. CRC Press, 2004. 360 p. ISBN 0-8493-2438-6.

6. Демихов К. Е., Никулин Н. К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. LAP Lambert Academic Publishing. 2013, 312 с. ISBN 978-3-8383-2274-2; 383832274-6.

7. Свичкарь Е. В. Разработка математической модели процесса откачки газа и метода расчета откачных параметров молекулярно-вязкостного вакуумного насоса в молекулярно-вязкостном режиме течения газа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 169 с.

8. Giors S. Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–26.

9. Dolcino L. TwisTorr molecular drag pumping technology. A new Technology for high performance Turbomolecular Drag Pumps. Agilent Technologies GmbH, 2010. P. 1–26.

10. Giors S., Campagna L., Emelli E. New spiral molecular drag stage design for high compression ratio, compact turbomolecular-drag pumps // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2010. Vol. 28, no 4. P. 931–936. DOI:10.1116/1.3386591.

11. Cheng H. P., Jou R. Y., Chen F. Z. [et al.]. Three-dimensional flow analysis of spiral-grooved turbo booster pump in slip and continuum flow // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2000. Vol. 18, Issue 2. P. 543–551.

12. Audi M., Giors S., Gotta R. The state of the art in Molecular-Drag Turbo-pump Technology // Agilent Technologies Vacuum Products Division. Agilent Technologies GmbH, 2011. P. 1–26.

13. Arpa R., Telib H., Cozza I. F. [et al.]. A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–21.

14. Nanbu K., Igarashi S. Tree-dimensional low-density flows in the spiral grooves of a Turbo-molecular pump // Computers Fluids. 1992. Vol. 21, Issue 2. P. 221–228. DOI: 10.1016/0045-7930(92)90021-M.

15. Igarashi S. 3D Flow simulation of a Spiral-Grooved Turbo-Molecular Pump. // AIP Conference Proceedings. 2001. Vol. 585. P. 933–939. DOI: 10.1063/1.1407659.

16. Kloss Yu. Yu., Martynov D. V., Cheremisin F. G. Computer simulation and analysis of the Holweck pump in the transient regime // Technical Physics. 2012. Vol. 57, Issue 4. P. 451–456. DOI: 10.1134/S1063784212040159.

17. Демихов К. Е., Панфилов Ю. В., Никулин Н. К. [и др.]. Вакуумная техника. Справочник / под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с. ISBN 978-5-94275-436-5.

18. Agilent Turbo pumps: каталог фирмы Agilent Technologies // Inc. Agilent Technologies. URL: <https://www.agilent.com> (дата обращения: 10.10.2017).

СВИЧКАРЬ Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 4532-7592

AuthorID (РИНЦ): 579811

НИКУЛИН Николай Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 6857-8773; AuthorID (РИНЦ): 244267

ДЕМИХОВ Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника».

SPIN-код: 8411-3458

AuthorID (РИНЦ): 494874

Адрес для переписки: svic@bk.ru

Для цитирования

Свичкарь Е. В., Никулин Н. К., Демихов К. Е. Методика расчёта откачной характеристики высоковакуумной системы с турбомолекулярным вакуумным насосом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 2. С. 65–71. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-65-71.

Статья поступила в редакцию 26.03.2018 г.

© Е. В. Свичкарь, Н. К. Никулин, К. Е. Демихов

METHOD FOR CALCULATING PUMPING CHARACTERISTIC OF HIGH-VACUUM SYSTEM WITH TURBOMOLECULAR VACUUM PUMP

E. V. Svichkar, N. K. Nikulin, K. E. Demihov

Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, 2-nd Baumanskaya st., 5/1, 105005

The pumping characteristic of a high-vacuum system depends on a number of factors: the pumping characteristics of a high-vacuum turbomolecular pump (TMN), the conductivity of connecting lines, the pumping characteristics of a for vacuum pumping system, the leakage of gas into the system, namely gas release streams, gas flows due to leakage of structural elements. The influence of these factors on the pumping characteristic of the vacuum system with TMN is considered in the work. A method for determining the parameters of a fore-vacuum pump providing an improvement in the vacuum characteristics of a vacuum system with TMN at elevated suction pressures is proposed.

Keywords: vacuum system, pumping characteristic, forvacuum, pressure, turbomolecular pump, conductivity, speed of action, flow.

References

1. Hoffman D. M., Singh B., Thomas J. H. (Eds.). Handbook of Vacuum Science and Technology // Academic Press, 1997. San Diego, London, New York, Tokyo, Toronto. XXII, 839 p. ISBN 0-12-352065-7. (In Engl.).
2. Khablanyan M. Kh., Saksaganskiy G. L., Burmistrov A. V. Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 1. Inzhenerno-fizicheskiye osnovy [Vacuum technology. Equipment, design, technology, operation. Part 1. Engineering physical bases]. Kazan: KNRTU Publ., 2013. 232 p. ISBN 978-5-7882-1447-4. (In Russ.).
3. Lafferty J. M. Foundations of Vacuum Science and Technology. Wiley, NY, 1998. 1121 p. ISBN 0-471-17593-5. (In Engl.).
4. Yoshimura N. Vacuum Technology. Practice for Scientific Instruments. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. X, 350 p. ISBN 978-3-540-74432-0. (In Engl.).
5. Chambers A. Modern Vacuum Physics // Masters Series in Physics and Astronomy. CRC Press, 2004. 360 p. ISBN 0-8493-2438-6. (In Engl.).
6. Demihov K. E., Nikulin N. K. Optimizatsiya vysokovakuumnnykh mekhanicheskikh nasosov [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 312 p. ISBN 978-3-8383-2274-2; 3838322746. (In Russ.).
7. Svichkar E. V. Razrabotka matematicheskoy modeli protsessy otkachki gaza i metoda rascheta otkachnykh parametrov molekulyarno-vyazkostnogo vakuumnogo nasosa v molekulyarno-vyazkostnom rezhime techeniya gaza [Development of a mathematical model of the gas pumping process and a method for calculating the pumping parameters of a molecular-viscous vacuum pump in the molecular-viscous regime of gas flow]. Moscow, 2017. 169 p. (In Russ.).
8. Giors S. Solved and unsolved gas dynamics problems for turbomolecular drag pumps: an industrial overview // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–26. (In Engl.).
9. Dolcino L. TwisTorr molecular drag pumping technology. A new Technology for high performance Turbomolecular Drag Pumps. Agilent Technologies GmbH, 2010. P. 1–26. (In Engl.).
10. Giors S., Campagna L., Emelli E. New spiral molecular drag stage design for high compression ratio, compact turbomolecular-drag pumps // Journal of Vacuum Science & Technology B. 2010. Vol. 28, no 4. P. 931–936. DOI:10.1116/1.3386591. (In Engl.).
11. Cheng H. P., Jou R. Y., Chen F. Z. [et al.]. Three-dimensional flow analysis of spiral-grooved turbo booster pump in slip and continuum flow // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2000. Vol. 18, Issue 2. P. 543–551. (In Engl.).
12. Audi M., Giors S., Gotta R. The state of the art in Molecular- Drag Turbo – pump Technology // Agilent Technologies Vacuum Products Division. Agilent Technologies GmbH, 2011. P. 1–26. (In Engl.).
13. Arpa R., Telib H., Cozza I. F. [et al.]. A kinetic approach in modeling compact Siegbahn molecular stages: physical and numerical aspects // 64th IUVSTA Workshop on Practical Applications and Methods of Gas Dynamics for Vacuum Science and Technology. 2011. P. 1–21. (In Engl.).
14. Nanbu K., Igarashi S. Tree-dimensional low-density flows in the spiral grooves of a Turbo-molecular pump // Computers Fluids. 1992. Vol. 21, Issue 2. P. 221–228. DOI: 10.1016/0045-7930(92)90021-M. (In Engl.).
15. Igarashi S. 3D Flow simulation of a Spiral-Grooved Turbo-Molecular Pump. // AIP Conference Proceedings. 2001. Vol. 585. P. 933–939. DOI: 10.1063/1.1407659. (In Engl.).
16. Kloss Yu. Yu., Martynov D. V., Cheremisin F. G. Computer simulation and analysis of the Holweck pump in the transient regime // Technical Physics. 2012. Vol. 57, Issue 4. P. 451–456. DOI: 10.1134/S1063784212040159. (In Engl.).
17. Demihov K. E., Panfilov Yu. V., Nikulin N. K. [et al.]. Vakuumnaya tekhnika. Spravochnik [Vacuum technology. Handbook] / Ed. K. E. Demihov, Yu. V. Panfilov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2009. 590 p. ISBN 978-5-94275-436-5. (In Russ.).
18. Agilent Turbo pumps: catalog of Agilent Technologies // Inc. Agilent Technologies. URL: <https://www.agilent.com> (accessed: 10.10.2017). (In Engl.).

SVICHKAR Elena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department.
SPIN-code: 4532-7592
AuthorID (RSCI): 579811

NIKULIN Nikolai Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department.

SPIN-code: 6857-8773; AuthorID (RSCI): 244267

DEMIHOV Konstantin Evgen'yevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Vacuum and Compressor Equipment Department.

SPIN-code: 8411-3458; AuthorID (RSCI): 494874

Address for correspondence: svic@bk.ru

For citations

Svichkar E. V., Nikulin N. K., Demihov K. E. Method for calculating pumping characteristic of high-vacuum system with turbomolecular vacuum pump // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, № 1. P. 65 – 71. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-65-71.

Received 26 March 2018.

© E. V. Svichkar, N. K. Nikulin, K. E. Demihov