

УДК 623.454.255.2

Математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом в широком диапазоне давлений

Демихов К. Е.¹, Очков А. А.^{1,*}

[*aochkov@bmstu.ru](mailto:aochkov@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время актуальной и нерешенной проблемой является создание оптимальной конструкции высоковакуумных средств откачки (лидирующую позицию среди которых занимают турбомолекулярные вакуумные насосы (ТМН)), работающих в широком диапазоне давлений на стороне всасывания. Проанализировав современный рынок вакуумной техники, можно отметить, что одним из возможных вариантов решения данной проблемы является использование в ТМН составной проточной части, состоящих чаще всего осевых и молекулярных ступеней. В данной работе описывается разработанная в МГТУ им. Н. Э. Баумана математическая модель (ММ) процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом (МВН). Отмечены принятые допущения, получены результаты. Адекватность ММ проверена экспериментально. Проведена оценка значимости разработанной ММ для современной промышленности.

Ключевые слова: математическая модель, молекулярный вакуумный насос, оптимизация, быстрота

Введение

Молекулярные вакуумные насосы (МВН) представляют собой разновидности кинетических вакуумных насосов, принцип действия которых основан на передаче дополнительного импульса движения молекулам газа от вращающегося ротора в направлении откачки. МВН работают в области молекулярного режима течения газа и обеспечивают значительные отношения давлений (до 10^7) при относительно небольшой скорости действия ($10^{-4} \dots 10^{-1} \text{ м}^3/\text{с}$) [1,2].

С момента своего появления (60-е годы прошлого столетия) МВН быстро завоевали достойное место в ряду высоковакуумных средств откачки (в основном в качестве дополнительной ступени, входящей в состав составной проточной части турбомолекулярного вакуумного насоса (ТМН)). Обладая целым рядом существенных преимуществ, они серьезно потеснили безусловных до этого фаворитов по объему использования в высоковакуумных системах паромасляные диффузионные вакуумные насосы.

В современных условиях актуальным требованием, предъявляемых к МВН, является разработка их конструкции с оптимальными характеристиками и параметрами. Особое внимание при разработке МВН следует уделять расчету оптимальных геометрических характеристик МВН, работающего в широком диапазоне давлений на стороне всасывания, при этом должны быть обеспечены основные рабочие характеристики проектируемого насоса. [3]

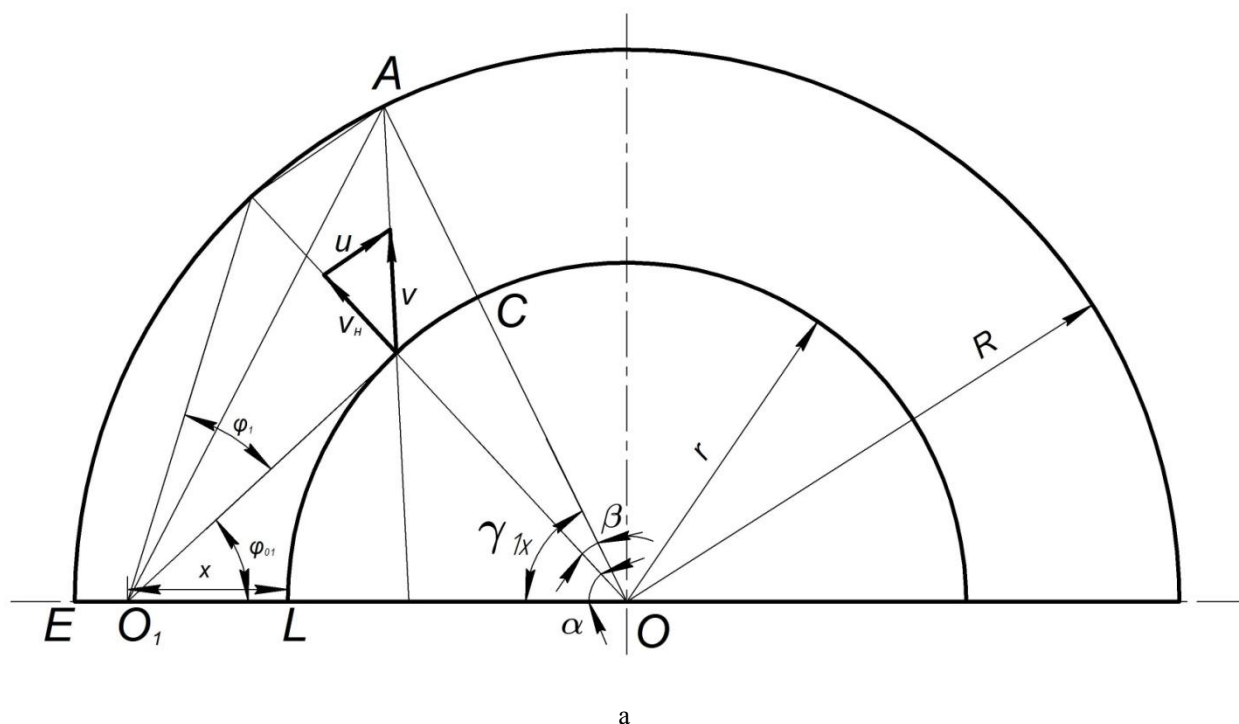
Созданные до настоящего времени математические модели процесса откачки газа цилиндрическим молекулярным вакуумным насосом [7,9] не позволяют рассчитать МВН с оптимальной геометрией, работающий в широком диапазоне давлений на стороне всасывания. В связи с этим была разработана новая математическая модель, на основании которой создано программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитать оптимальную конструкцию цилиндрического молекулярного вакуумного насоса для различных критериев оптимальности. Одним из таких критериев оптимальности может быть выбран минимальная величина условного объема проточной части насоса:

$$A_{\min} = \frac{\pi}{4} D^2 L, \quad (1)$$

где D – наружный диаметр молекулярного вакуумного насоса, L – его длина.

В качестве управляемых параметров были выбраны: λ – относительный диаметр МВН ($\lambda = r/R$, где r – радиус ротора, R – радиус статора), α – угол наклона спирали (рабочего канала МВН), n – число заходов спирали.

При создании математической модели использовалась двухмерная схема, на которой изображен поперечный разрез проектируемого МВН (Рис.1).



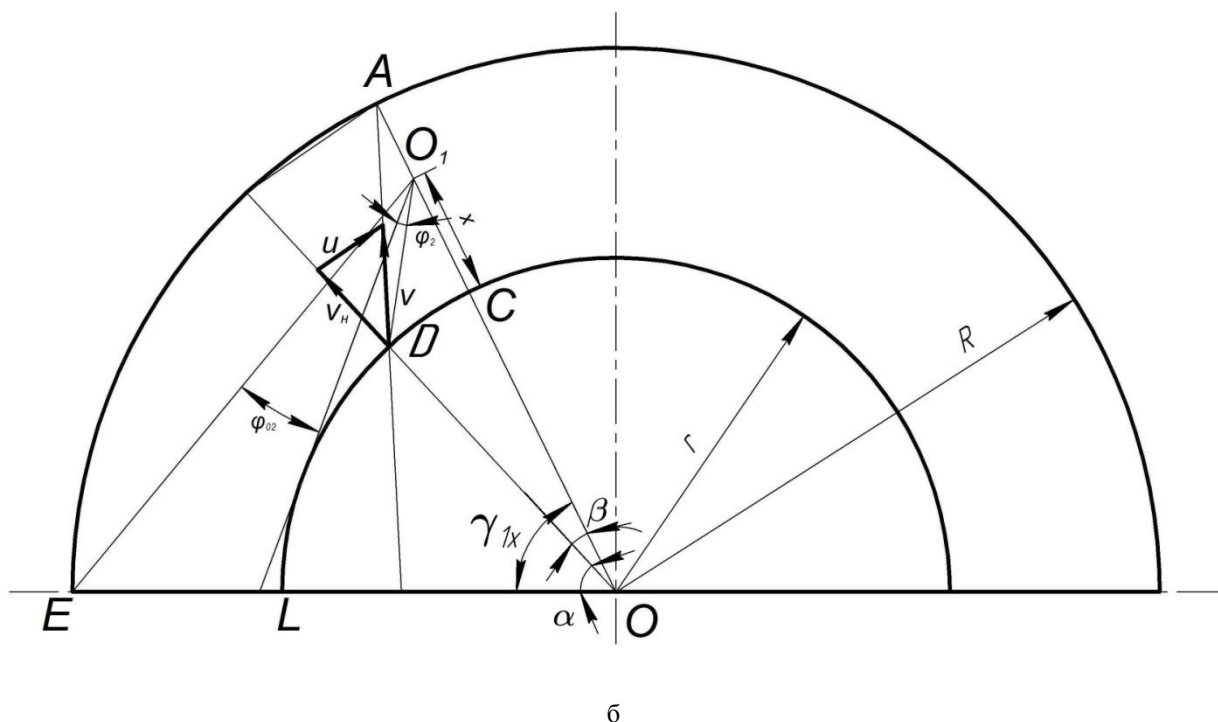


Рис.1. Расчетная схема переноса молекул газа каналом цилиндрического МВН в направлении откачки (а) и со стороны нагнетания (б).

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- режим течения газа – молекулярный;
- при переходе через соответствующую ступень считается, что молекула проходит на сторону нагнетания после не более чем двух соударений с поверхностями;
- высота рабочего канала постоянна;
- при взаимодействии с поверхностью молекулы отражаются по нормали.

С учетом принятых допущений можно заключить, что из общего числа молекул, попавших в канал через произвольный участок на стороне всасывания, в направлении откачки пройдут молекулы откачиваемого газа, не испытавшие соударений с ограничивающими объем канала стенками; взаимодействующие с поверхностью ротора, принадлежащей к рассматриваемому участку, и, наконец, испытавшие в пределах рассматриваемого участка соударения с частью стенки ротора, отразившись от которой, молекулы после единственного повторного отражения на роторе пройдут через выходное сечение данного участка (Рис. 1).

Таким образом, из общего числа молекул, прошедших через некоторое сечение канала EL (Рис. 1) в окрестности произвольной точки O_1 , не вернутся через него после взаимодействия со стенками, ограничивающими канал, те молекулы, направление движения которых заключено в пределах угла φ_{12} .

Тогда вероятность того, что молекулы пройдут через данную ступень в направлении откачки, определяется следующей зависимостью

$$K_{12} = \frac{\varphi_{12}}{\pi}, \quad (2)$$

где

$$\varphi_{12} = \varphi_1 + \varphi_{01}, \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \arccos \frac{x^2 + 2xr}{\sqrt{(x^2 + 2xr + R^2 - 2Rr + r^2)(x^2 + 2xr)}}, \quad (4)$$

$$\varphi_{01} = \arccos \frac{\sqrt{x^2 + 2xr}}{(x + r)}. \quad (5)$$

Протяженность участка ротора, с которым могут непосредственно взаимодействовать (с учетом принятых допущений) молекулы газа, вошедшие в канал в окрестности точки O_1 сечения EL , характеризуется углом γ_{1x} . Его величина определяется, исходя из геометрических соотношений канала МВН, следующим выражением

$$\gamma_{1x} = \alpha + \beta. \quad (6)$$

Расчетная схема процесса перехода молекул откачиваемого газа через ступень насоса в направлении, противоположном откачке, представлена на рис. 1 (б). Положение сечения EL то же, сечение AC характеризуется углом γ_{1x} .

На основании принятых допущений можно также заключить, что из числа молекул, попавших во внутренний объем ступени со стороны нагнетания в окрестности точки O_1 сечения AC , перейдут на сторону всасывания (отрезок EL) те молекулы, которые не испытывают столкновений с поверхностями, ограничивающими объем данной ступени, или соударяются с частью ротора и не могут вернуться обратно на сторону нагнетания. К ним можно отнести молекулы, направление движения которых заключено в пределах угла $\varphi_{21} = \varphi_2 + \varphi_{02}$. Угол φ_2 характеризует прохождение молекул со стороны нагнетания ступени МВН на сторону всасывания в зависимости от геометрии насоса, φ_{02} – в зависимости от составляющей u/v_n (отношение окружной скорости ротора к тепловой скорости движения молекул газа).

Тогда вероятность того, что молекулы пройдут со стороны нагнетания на сторону всасывания, определяется зависимостью

$$K_{21} = \frac{\varphi_{21}}{\pi}. \quad (7)$$

При расчете по разработанной модели угол φ_{21} определяется по формуле

$$\varphi_{21} = \angle EO_1O - \angle DO_1O. \quad (8)$$

Зная K_{12} и K_{21} , можно рассчитать основные характеристики рассматриваемой условной ступени молекулярного вакуумного насоса, протяженность которой характеризуется углом γ_{1x} .

К ним относятся: K_{max} – вероятность перехода молекул через ступень МВН, τ_{max} – степень повышения давления ступени МВН.

$$K_{max} = K_{12} - K_{21} , \quad (9)$$

$$\tau_{max} = \frac{K_{12}}{K_{21}} . \quad (10)$$

Для проверки разработанной математической модели было проведено сравнение полученных результатов с результатами эксперимента. Результаты эксперимента были взяты из научной работы [9].

В этой работе рассматривается молекулярный вакуумный насос, имеющий следующую геометрию: наружный диаметр – 180 мм, длина ротора – 90 мм, угол наклона спирали – 30° , относительный диаметр – 0.967, ширина канала – 16.2 мм, частота вращения ротора – 928 Гц. Максимальное отношение давлений, создаваемое насосом, полученное в результате эксперимента, равно 10. При расчете характеристик рассматриваемого насоса по разработанной ММ, максимальное отношение давлений составляет 10,541. Следовательно, погрешность расчета – 5,13 %.

На основании описанной математической модели было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать оптимальные параметры и характеристики цилиндрического молекулярного вакуумного насоса, работающего в широком диапазоне давлений на стороне всасывания, с использованием различных критериев оптимальности.

Блок-схема программы приведена на рис. 2.

На первом этапе осуществляется ввод исходных данных: быстрота действия МВН, диапазон рабочих давления и физические параметры откачиваемого газа, затем рассчитываются основные оптимальные для выбранного критерия оптимальности (например, минимальная величина условного объема проточной части насоса) геометрические характеристики насоса, такие как диаметры ротора и статора, ширина канала. Затем с использованием описанной выше математической модели определяется максимальная степень повышения давления одной ступени МВН. Зная общую степень повышения давления насоса и степень повышения давления одной ступени, с учетом, что все ступени насоса одинаковые, определяем количество ступеней молекулярного вакуумного насоса. На конечном этапе происходит расчет длины ротора МВН.

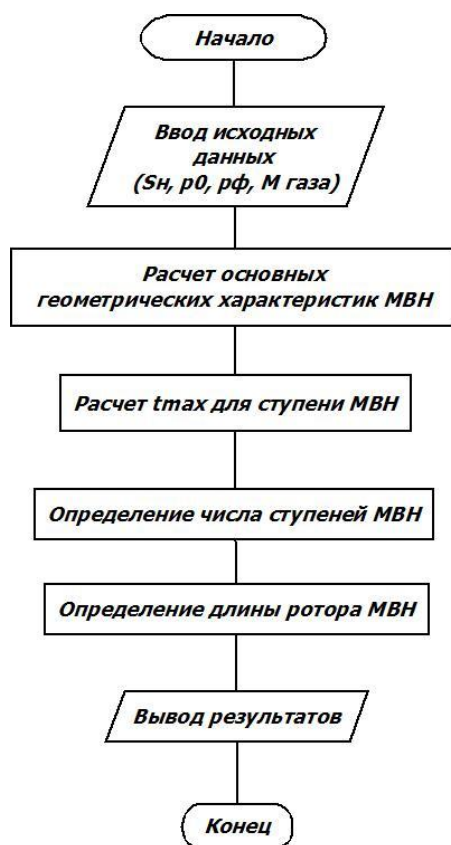


Рис.2. Блок-схема программного обеспечения расчета основных параметров молекулярного вакуумного насоса.

На основании расчетов, проведенных с помощью разработанного ПО получены зависимости условного объема МВН от угла наклона спирали и относительного диаметра ротора при степени повышения давлений МВН – 10^4 , быстроте действия – $0.0058 \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты представлены в табл.1 и табл.2.

Таблица 1. Зависимость условного объема МВН от относительного диаметра ротора ($\alpha=60^\circ$).

$A, \text{ см}^3$	λ
44.561	0.6
40.645	0.65
34.048	0.7
71.710	0.75
62.326	0.8
94.318	0.85
86.624	0.87
78.545	0.89
74.324	0.9
113.033	0.92
138.000	0.95
304.574	0.97

Таблица 2. Зависимость условного объема МВН от угла наклона спирали ($\lambda=0.8$).

A, см³	α
521	30
408	35
322	40
254	45
200	50
97	55
74	60
60	65
47	70
32	75
21	80

Как видно из приведенных результатов расчета, при определенных значениях управляемых параметров можно обеспечить абсолютные минимальные значения выбранного критерия оптимальности.

Заключение

Разработанные математическая модель процесса откачки газа цилиндрическим МВН и программное обеспечение расчета оптимальных параметров МВН позволяют решить проблему оптимизации молекулярных и турбомолекулярных вакуумных насосов при работе их в широком диапазоне давлений на стороне всасывания [3-5].

Кроме того, если обратиться к тенденциям современного рынка вакуумной техники, то можно увидеть, что такие крупнейшие мировые фирмы-производители турбомолекулярных вакуумных насосов, как Pfeiffer Vacuum, Agilent Technologies, Alcatel и др., при работе турбомолекулярных вакуумных насосов при давлениях выше 100 Па используют составную проточную часть, включающую в себя осевые и молекулярные ступени (МВН) [6,8,10-12].

Произведено сравнение полученных по разработанной математической модели результатов с экспериментом. Погрешность вычислений составляет порядка 5%.

На основании результатов расчета с помощью разработанного ПО получены следующие рекомендации по выбору основных параметров проектируемого молекулярного вакуумного насоса. Для обеспечения минимального объема проточной части МВН относительный диаметр ротора следует выбирать в диапазоне 0.6.....0.7, угол наклона спирали – в диапазоне 70.....80 градусов, число заходов спирали – 3.

Список литературы

1. Хоффман Д., Сингх Б., Томас Дж. Справочник по вакуумной технике и технологиям: пер. с англ. / под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова. М.: Техносфера, 2011. 736 с. [Hoffman D., Singh B., Thomas J. Handbook of Vacuum Science and Technology. Burlington: Academic Press, 1998. 736 p.]
2. 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.
3. Демихов К.Е., Никулин Н.К. Оптимизация высоковакуумных механических насосов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 255 с.
4. Демихов К.Е., Очков А.А. Метод расчета оптимальной откачной характеристики турбомолекулярного вакуумного насоса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 7. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/275.html> (дата обращения 01.11.2014).
5. Демихов К.Е., Очков А.А. Программное обеспечение оптимизации основных параметров турбомолекулярных вакуумных насосов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 5. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/750.html> (дата обращения 01.11.2014).
6. Фролов Е.С., Автономова И.В., Васильев В.И., Пластинин П.И., Никулин Н.К. Механические вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
7. The Vacuum Technology Book. Volume II. GmbH: Pfeiffer Vacuum, 2013.
8. Hybrid Turbomolecular Pumps ATH series. Adixen Alcatel GmbH, 2013.
9. Giors S., Colombo E., Inzoli F., Subba F., Zanino R. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance // Journal of Vacuum Science and Technology. Part A. 2006. Vol. 24, no. 4. P. 1584-1591. DOI: [10.1116/1.2178362](https://doi.org/10.1116/1.2178362)
10. Umrath W. Fundamentals of vacuum technology. Cologne, Oerlicon Leybold Vacuum GmbH, 2007. 199 p.
11. Pfeiffer Vacuum Catalogue. Pfeiffer Vacuum GmbH, April 2013.
12. Agilent Turbo-V pumps. Agilent Technologies GmbH, May 2013.

Mathematical Model of Pumping Gas Process by the Cylindrical Molecular Vacuum Pump in the Wide Range of Pressures

K.E. Demikhov¹, A.A. Ochkov^{1,*}

aochkov@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: mathematical model, molecular vacuum pump, optimization, pumping speed, software, flowchart

Now the molecular vacuum pumps (MVP) are widely used in the modern industry. Upon analysis of vacuum engineering at the modern market it is possible to draw a conclusion that this equipment is one of the leaders among the high-vacuum pumping means, especially when using in combination with the axial steps of turbo-molecular vacuum pumps (TMP) containing compound flowing part.

This work describes a developed mathematical model (MM) of gas pumping process produced by cylindrical MVP operating in the wide range of pressures at the inlet. On the basis of developed MM the experimentally checked results are received. The error of calculation makes 5-6% that proves the adequacy of MM.

Based on the described MM the software is developed allowing us to calculate a construction of MVP working in the wide range of pressures. The flowchart for software is provided.

The developed software allows us to solve the relevant and, at the moment, yet unsolved to the end the problem of optimization of high-vacuum pumping means operating in the wide range of pressures at the inlet. After all, one of versions to solve this problem is to use the pumps with compound flowing part in which the molecular step (MVP) is mostly used.

References

1. Hoffman D., Singh B., Thomas J. *Handbook of Vacuum Science and Technology*. Burlington, Academic Press, 1998. 736 p. (Russ. ed.: Hoffman D., Singh B., Thomas J. *Spravochnik po vakuumnoy tekhnike i tekhnologiyam*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 736 p.).
2. Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K., et al. *Vakuumnaya tekhnika: spravochnik* [Vacuum technology: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p. (in Russian).
3. Demikhov K.E., Nikulin N.K. *Optimizatsiya vysokovakuumnykh mekhanicheskikh nasosov* [Optimization of high-vacuum mechanical pumps]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 255 p. (in Russian).

4. Demikhov K.E., Ochkov A.A. Method of Optimal Evacuation Data Analysis for Turbomolecular Vacuum Pump. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 7. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/275.html> , accessed 01.11.2014. (in Russian).
5. 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. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/750.html> , accessed 01.11.2014. (in Russian).
6. Frolov E.S., Avtonomova I.V., Vasil'ev V.I., Plastinin P.I., Nikulin N.K. *Mekhanicheskie vakuumnye nasosy* [Mechanical vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 288 p. (in Russian).
7. The Vacuum Technology Book. Volume II. GmbH: Pfeiffer Vacuum, 2013.
8. Hybrid Turbomolecular Pumps ATH series. Adixen Alcatel GmbH, 2013.
9. Giors S., Colombo E., Inzoli F., Subba F., Zanino R. Computational fluid dynamic model of a tapered Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance. *Journal of Vacuum Science and Technology. Part A*, 2006. Vol. 24, no. 4. P. 1584-1591. DOI: [10.1116/1.2178362](https://doi.org/10.1116/1.2178362)
10. Umrath W. *Fundamentals of Vacuum Technology*. Cologne, Oerlicon Leybold Vacuum GmbH, 2007. 199 p.
11. Pfeiffer Vacuum Catalogue. Pfeiffer Vacuum GmbH, April 2013.
12. Agilent Turbo-V pumps. Agilent Technologies GmbH, May 2013.