

DOI: 10.18721/JEST.24409  
УДК 81.29.14

*Н.К. Никулин, Е.В. Свичкар, В.С. Ключаров*

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОЙ СТУПЕНИ ВАКУУМНОГО НАСОСА**

В работе экспериментально исследованы откачные характеристики молекулярно-вязкостной ступени молекулярно-вязкостного и комбинированного турбомолекулярного насосов. Исследование проводилось при условии работы ступени с каналами трапецеидальной формы в вязкостном или переходном режимах течения газа. В статье приведено описание стенда, на базе которого получены экспериментальные данные, а именно измерение быстродействия насоса в широком диапазоне давлений. По полученным экспериментальным данным выполнен анализ влияния скоростных параметров на быстродействие ступени насоса. Определены способы увеличения быстродействия при сохранении габаритных размеров насоса в целом. Полученные результаты позволяют улучшить откачные параметры комбинированных турбомолекулярных вакуумных насосов и параметры высоковакуумной системы, в которой они установлены.

*Ключевые слова:* молекулярно-вязкостная ступень, МВВН, проточная часть, экспериментальное исследование, откачные параметры, вакуумный насос, быстродействие насоса

*Ссылка при цитировании:*

Н.К. Никулин, Е.В. Свичкар, В.С. Ключаров. Экспериментальное определение быстродействия молекулярно-вязкостной ступени вакуумного насоса // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 90–96. DOI: 10.18721/JEST.24409.

*N.K. Nikulin, E.V. Svichkar, V.S. Klyucharov<sup>1</sup>*

Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russia

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF OPERATIONAL SPEED OF A MOLECULAR VISCOUS STAGE OF A VACUUM PUMP**

We have experimentally investigated the evacuating characteristics of a molecular viscous stage of a combined turbomolecular pump. This study has been conducted for a stage with trapezoidal channels operating in viscous or transient regimes of gas flow. The paper describes the experimental stand used to obtain the experimental data, namely, measured speed of the pump in a wide range of pressures. The obtained experimental data have been used to analyze the influence of the velocity parameters of the pump stage on its operational speed. The ways of increasing the operational speed of the pump have been determined without changing the overall dimensions of the pump as a whole. The obtained results allow to improve the evacuating characteristics of combined turbomolecular vacuum pumps and the parameters of the high-vacuum system where they are installed.

*Keywords:* molecular viscous stage, MWN, hydraulics, experimental study evacuating parameters, vacuum pump, pump operational speed.

*Citation:*

N.K. Nikulin, E.V. Svichkar, V.S. Klyucharov, Experimental determination of operational speed of a molecular viscous stage of a vacuum pump, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 90–96, DOI: 10.18721/JEST.24409.

## Введение

Разработка вакуумных насосов, обеспечивающих разные уровни вакуума в откачиваемом объекте, — перспективное направление развития науки и техники. В настоящий момент для получения высокого уровня вакуума требуется согласованная работа нескольких последовательно установленных насосов, отличающихся принципом действия. Подобная многоступенчатость при проектировании и построении высоковакуумных систем откачки неизбежно приводит к ее усложнению и загромождению дополнительным, присоединяемым к ней оборудованием. При этом любое дополнительное оборудование является потенциальным источником негерметичности и источником газовой выделений.

Широкое применение в высоковакуумных системах в настоящее время находят машины кинетического действия, а именно турбомолекулярные [1–3], молекулярные [4–13] и молекулярно-вязкостные (МВВН) насосы [3]. Одна из разновидностей турбомолекулярных машин — комбинированные турбомолекулярные насосы [1–3], в которых устанавливают различные по принципу действия молекулярные ступени, работающие в диапазоне давлений от 1 до  $10^3$  Па. Исследованию рабочих процессов в этих ступенях посвящено достаточное количество работ с применением различных методов и математических моделей. В большинстве случаев их результаты носят теоретический характер и авторы исследований ссылаются на необходимость получения экспериментальных данных. Среди экспериментальных работ можно выделить публикации [3, 7, 11], в которых изложены результаты, описывающие параметры течения газа в молекулярных ступенях.

Значительный интерес представляют работы, посвященные изучению молекулярно-вязкостных ступеней комбинированных турбомолекулярных насосов. В сравнении с моле-

кулярными ступенями они обеспечивают большее быстродействие за счет существенного увеличения количества рабочих каналов и уменьшения потерь в виде перетекания газа со стороны нагнетания на сторону всасывания. Еще одним преимуществом молекулярно-вязкостных ступеней является возможность их работы в диапазоне давлений от  $10^{-3}$  до  $10^5$  Па, соответствующего всем режимам течения газа, в то время как молекулярные ступени эффективны лишь в области давлений от 1 до  $10^3$  Па и полностью прекращают работу при давлении выше  $10^3$  Па.

Целью нашей работы было экспериментальное определение откачных параметров молекулярно-вязкостных ступеней, работающих при давлении от  $10^3$  до  $10^5$  Па.

### Описание экспериментального стенда для определения характеристик молекулярно-вязкостной ступени

Молекулярно-вязкостная ступень, представленная на рис. 1, образована каналами на совместных поверхностях неподвижного и подвижного цилиндров.

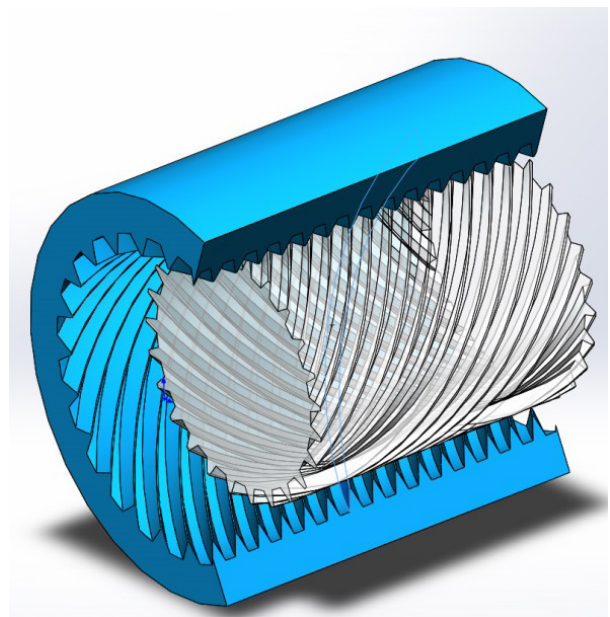


Рис. 1. Молекулярно-вязкостная ступень  
Fig. 1. Molecular viscosity stage

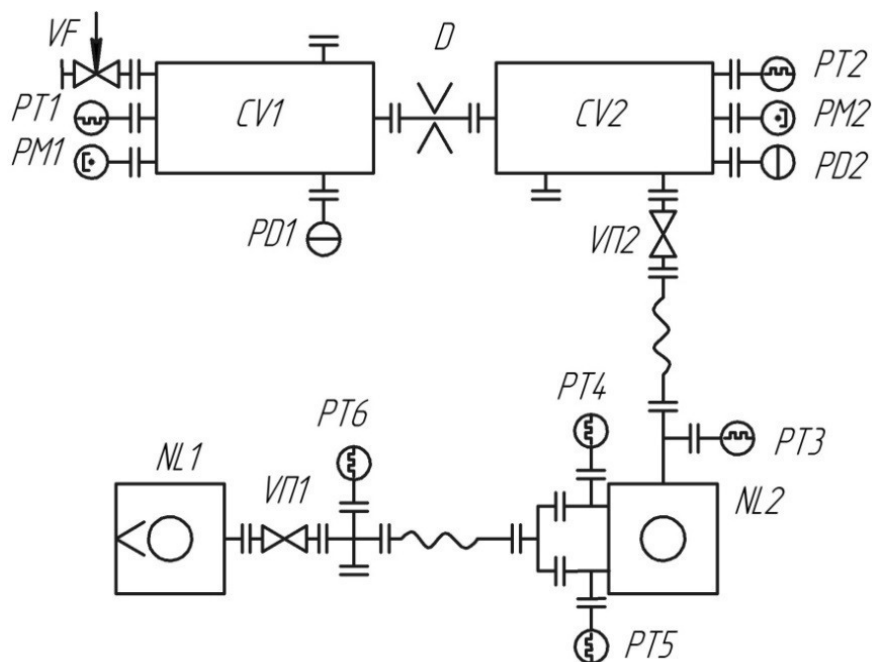


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда  
 Fig. 2. Schematic diagram of the experimental stand

Исследование быстродействия молекулярно-вязкостных ступеней, реализованных в виде молекулярно-вязкостного вакуумного насоса, проведено на стенде, схема которого приведена на рис. 2.

Экспериментальный стенд состоит из измерительной вакуумной камеры CV2 и напускной вакуумной камеры CV1. Внутренние поверхности камеры, выполненной из нержавеющей стали, полируют. Полировка уменьшает возможную пористость поверхности камер, что благоприятно влияет на уменьшение уровня газовыделения. Регулирование величины потока газа, напускаемого в систему, обеспечивается клапаном VF. Дополнительно в систему устанавливается система напуска, отвечающая за равномерное распределение напускаемого потока по входному сечению, разработанная и исследованная на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» МГУ имени Н.Э. Баумана. Такая система осуществляет подачу газовых потоков одновременно в нескольких точках поперечного сечения камеры. Потоки напускаемого газа

измеряются бюреткой закрытого типа либо регулятором расхода газа.

В экспериментальном стенде используются преобразователи давления, изменяющие давление с точностью в пределах 5%. Количество преобразователей и их диапазон рабочих давлений создает возможность проводить исследование начиная с атмосферного давления и заканчивая условиями высокого вакуума. Такое решение позволяет исследовать характеристики молекулярно-вязкостных ступеней при различных уровнях вакуума.

### Результаты экспериментального исследования быстродействия молекулярно-вязкостной проточной части

На рис. 3 представлены экспериментальные и теоретические данные для молекулярно-вязкостных ступеней при разном давлении нагнетания, а именно зависимости быстродействия ступени от отношения давлений

$$\tau = \frac{p_H}{p_{BC}}$$

где  $p_n$  – давление нагнетания насоса, Па;  $p_{вс}$  – давление всасывания насоса, Па. Экспериментальные данные представлены символами, а сплошными линиями – теоретические данные, которые определены полуэмпирической зависимостью, описанной в работе [3]:

$$p_n - p_{вс} = \frac{2LN\eta}{\psi h} \times \left( \frac{8S - 3\zeta_1 u \psi h^2 + \zeta_1 \zeta_2 u \psi h \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right|}{\frac{8h^3}{3 \cos^2 \alpha} - \frac{h^3}{3} - \psi h^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{2\psi^2 h^3}{3} - \frac{\zeta_2 h^2}{2} + \zeta_2^2 h - 3\zeta_2^3 \ln \left| \frac{\zeta_2}{h + \zeta_2} \right|} \right),$$

где  $L$  – длина канала, м;  $N$  – число каналов;  $\zeta_1$  – коэффициент обмена количеством движения между газом и подвижной поверхностью;  $\eta$  –

вязкость газа, Па·с;  $u$  – окружная скорость газа на периферии подвижного цилиндра, м/с;  $\zeta_2$  – коэффициент скольжения, определяющий взаимодействие газа с неподвижной поверхностью, м;  $h$  – высота канала, м;  $\alpha$  – угол наклона боковой поверхности канала к его высоте, град;  $\psi$  – коэффициент отношения высоты канала к его ширине.

Расхождение между полученными теоретическими и экспериментальными данными не превышает 4%. При увеличении давления нагнетания с  $10^4$  до  $10^5$  Па при равных величинах отношения давлений наблюдается снижение быстродействия молекулярно-вязкостной ступени вплоть до прекращения эффекта откачки (при  $\tau \geq 1,5$ ).

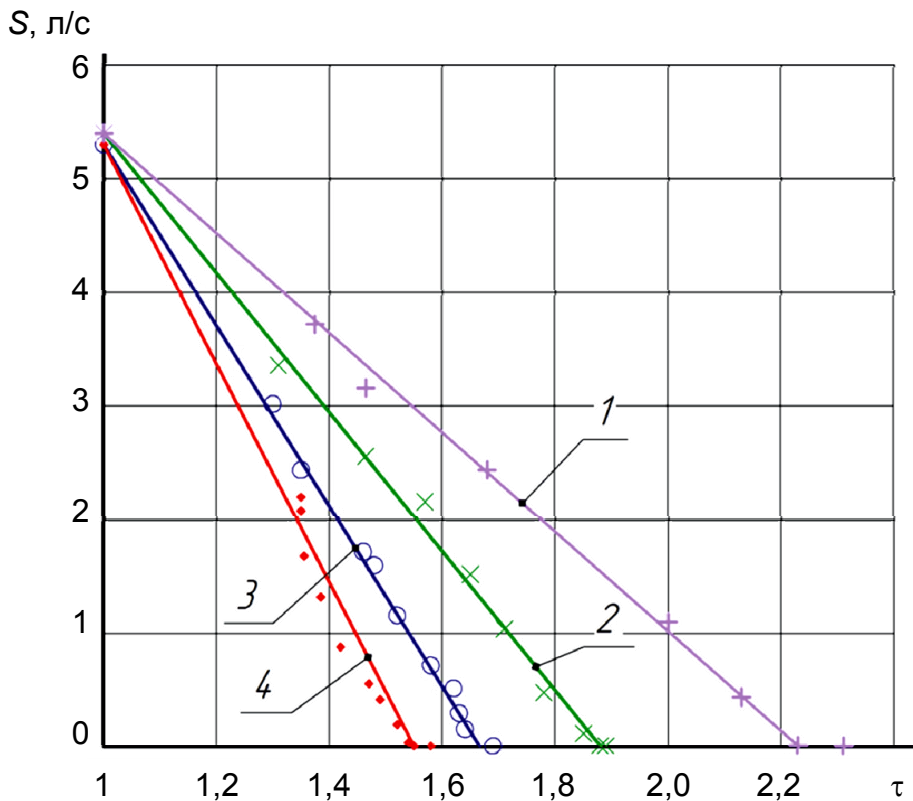


Рис. 3. Откачная характеристика МВВН при разных значениях давления нагнетания:

1 –  $p_n = 10^4$  Па; 2 –  $p_n = 2,6 \cdot 10^4$  Па; 3 –  $p_n = 3,8 \cdot 10^4$  Па; 4 –  $p_n = 10^5$  Па

Fig. 3. Pumping characteristics of MVVN at different values of discharge pressure:

1 –  $p_n = 10^4$  Pa; 2 –  $p_n = 2,6 \cdot 10^4$  Pa; 3 –  $p_n = 3,8 \cdot 10^4$  Pa; 4 –  $p_n = 10^5$  Pa

### Вывод

В результате проведения экспериментального исследования параметров молекулярно-вязкостной ступени получены ее откачные зависимости. Полученные данные говорят о возможности использования молекулярно-вязкостных ступеней комбинированных насосов при повышенных давлениях (более  $10^3$  Па) с сохранением откачивающей способности ступени. При повышении давления наблюдается снижение откачных параметров, однако ступень продолжает работу, в отличие от существующих молекулярных ступеней, откачивающая способность которых практически прекращается при давлении  $10^3$  Па. Полученные результаты показывают, что при использовании молекулярно-вязкостных ступеней в комбинированных турбомолекулярных насосах последний сможет работать с повышенными давлениями нагнетания при сохранении откачных параметров на стороне всасывания. Возможность повышения давления нагнетания насоса позволяет снизить требования к

форвакуумным насосам, работающим с турбомолекулярными насосами. В результате появляется возможность установки в качестве форвакуумных насосов, помимо спиральных вакуумных насосов, еще и сухих мембранных и ротационно-пластинчатых, что значительно упрощает систему и делает ее дешевле за счет возможности использования более дешевых насосов.

В соответствии с полученными экспериментальными данными можно сказать, что для сохранения эффективности работы молекулярно-вязкостной ступени необходимо поддерживать окружную скорость подвижного цилиндра больше 80 м/с. Это легко реализуется в любом из турбомолекулярных насосов, окружная скорость которых, как правило, превышает 200 м/с.

Улучшение откачных параметров МВВН в переходном режиме течения газа по сравнению с вязкостным связано со снижением влияния вязкостного трения и межмолекулярного взаимодействия молекул газа, преобладанием взаимодействия молекул газа с поверхностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology // Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1. P. 1–13. Режим доступа: <http://fisic.a.ufpr.br/> (дата обращения: 25.09.2018).
2. **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. Режим доступа: <http://www.itep.kit.edu> (дата обращения: 25.09.2018).
3. **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.
4. **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 / Москва, 2017, 169 с.
5. **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 // J. Vac. Sci. Technol. A. 2006. Vol. 24. № 4. P. 1584–1591.
6. **Хаблянян М.Х., Сакаганский Г.Л., Бурмистров А.В. [и др.]** Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 2: Вакуумные насосы. Казань: КНИТУ, 2016. 300 с.
7. **Kwon M.K., Hwang Y.K.** An experimental study on the pumping performance of molecular drag pumps // Journal of Mechanical Science and Technology. 2006. Vol. 20. № 9. P. 1483–1491.
8. **Демихов К.Е.** Современные направления развития высоковакуумных механических насосов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2014. № 5. С. 3–11.





9. **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения: 10.10.2015).

10. **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump / Institute of Thermophysics. Режим доступа: <http://arxiv.org> (дата обращения 10.10.2015).

11. **Nanbu K., Igarashi S.** Tree–dimensional low–density flows in the spiral grooves of a Turbo–molecular pump // *Computers Fluids*. 1992. Vol. 21. P. 221–228.

12. **Jou R.Y.** Geometrical design of turbo pump’s rotor by the power law methodology / Department of Mechanical Design Engineering, 64 Wen-Wha Rd., Huwei. Yunlin. P. 632. Режим доступа: <http://sparc.nfu.edu.tw> (дата обращения: 25.09.2018).

13. **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology // Prepared for Vacuum

in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1. P. 1–13. Режим доступа: <http://fisica.ufpr.br/> (дата обращения: 25.09.2018).

14. **Дудко В.В.** Скольжение разреженного газа вдоль неподвижных и колеблющихся поверхностей: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва, 2010. 107 с.

15. **Colin S.** Gas microflows in the slip flow regime: a critical review on convective heat transfer // *Journal of heat transfer*. 2012. Vol. 134. P. 1–13.

16. **Wen-Ming Zhang, Guang Meng, Xueyong Wei.** A review on slip models for gas microflows // *Microfluid Nanofluid*. Springer–Verlag. 2012. Vol. 13. P. 845–882.

17. **Sattler R., Wachutka G.** Compact Models for Squeeze–Film Damping in the Slip Flow Regime // *NSTI–Nanotech*. 2004. Vol. 2. P. 243–246.

18. **Pitakarnnop J., Geoffroy S., Colin S., Baldas L.** Slip flow in triangular and trapezoidal microchannels // *Heat and Technology*. 2008. Vol. 26. № 1. P. 167–174.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НИКУЛИН Николай Константинович** – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

E-mail: [nikulinnk@gmail.com](mailto:nikulinnk@gmail.com)

**СВИЧКАРЬ Елена Владимировна** – кандидат технических наук доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

E-mail: [svic@bk.ru](mailto:svic@bk.ru)

**КЛЮЧАРОВ Владимир Сергеевич** – инженер Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

E-mail: [klyucharov@gmail.com](mailto:klyucharov@gmail.com)

Статья поступила в редакцию: 21.09.2018

#### REFERENCES

[1] **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology. *Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1.* P. 1–13. Rezhim dostupa: <http://fisica.ufpr.br/> (data obrashcheniya: 25.09.2018).

[2] **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. Rezhim dostupa: <http://www.itep.kit.edu> (data obrashcheniya: 25.09.2018).

[3] **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.

[4] **Svichkar E.V.** Development of a mathematical model of the gas pumping process and a method for calculating the pumping parameters of a molecular–viscosity vacuum pump in the molecular–viscous regime of gas flow: The dissertation of a Cand.Tech.Sci. / Moscow. 2017. 169 p. (rus.)

[5] **Giors S., Colombo E., Inzoli F., Subba F., Zani-no R.** Computational fluid dynamic model of a tapered

Holweck vacuum pump operating in the viscous and transition regimes. I. Vacuum performance. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2006. Vol. 24. № 4. P. 1584–1591.

[6] **Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. [i dr.]**. Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 2: Vakuumnnyye nasosy. Kazan: KNITU, 2016. 300 s. (rus.)

[7] **Kwon M.K., Hwang Y.K.** An experimental study on the pumping performance of molecular drag pumps. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2006. Vol. 20. № 9. P. 1483–1491.

[8] **Demikhov K.E.** Current trends of high-vacuum mechanical pump. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical Engineering*. 2014. № 5. P. 3–11. (rus.)

[9] **Skovorodko P.A.** Some features of the flow in the Holweck pump / Institute of Thermophysics. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya: 10.10.2015).

[10] **Skovorodko P.A.** Continuum model for Couette–Poiseuille flow in a drag molecular pump / Institute of Thermophysics. Rezhim dostupa: <http://arxiv.org> (data obrashcheniya 10.10.2015).

[11] **Nanbu K., Igarashi S.** Tree–dimensional low–density flows in the spiral grooves of a Turbo–molecular pump. *Computers Fluids*. 1992. Vol. 21. P. 221–228.

[12] **Jou R.Y.** Geometrical design of turbo pump’s rotor by the power law methodology / Department of Mechanical Design Engineering, 64 Wen–Wha Rd., Huwei. Yunlin. P. 632. Rezhim dostupa: <http://sparc.nf.edu.tw> (data obrashcheniya: 25.09.2018).

[13] **Sharipov F.** Rarefied gas dynamics and its applications to vacuum technology. *Prepared for Vacuum in Accelerators: Specialized Course of Conference: C06–05–16.1*. P. 1–13. Rezhim dostupa: <http://fisica.ufpr.br/> (data obrashcheniya: 25.09.2018).

[14] **Dudko V.V.** The slip of a rarefied gas along a stationary and oscillating surfaces: The dissertation of a Doc. physical and mathematical Sciences Moscow. 2010. 107 s. (rus.)

[15] **Colin S.** Gas microflows in the slip flow regime: a critical review on convective heat transfer. *Journal of heat transfer*. 2012. Vol. 134. P. 1–13.

[16] **Wen-Ming Zhang, Guang Meng, Xueyong Wei.** A review on slip models for gas microflows. *Microfluid Nanofluid*. Springer–Verlag. 2012. Vol. 13, P. 845– 882.

[17] **Sattler R., Wachutka G.** Compact Models for Squeeze–Film Damping in the Slip Flow Regime. *NSTI–Nanotech*. 2004. Vol. 2. P. 243–246.

[18] **Pitakarnnop J., Geoffroy S., Colin S., Baldas L.** Slip flow in triangular and trapezoidal microchannels. *Heat and Technology*. 2008. Vol. 26. № 1. P. 167–174.

#### THE AUTHORS

**NIKULIN Nikolai K.** – *Bauman Moscow state technical university*

E-mail: [nikulinnk@gmail.com](mailto:nikulinnk@gmail.com)

**SVICHKAR Elena V.** – *Bauman Moscow state technical university*

E-mail: [svic@bk.ru](mailto:svic@bk.ru)

**KLYUCHAROV Vladimir S.** – *Bauman Moscow state technical university*

E-mail: [klyucharov@gmail.com](mailto:klyucharov@gmail.com)

Received: 21.09.2018