

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СПИРАЛИ НА ПЕРЕТЕКАНИЯ В СПИРАЛЬНОМ ВАКУУМНОМ НАСОСЕ**А.А. Райков, М.Д. Бронштейн, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров**

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
e-mail: ors@hitv.ru bronmich@gmail.com; salikeev_s@mail.ru; burm@kstu.ru

Рассмотрено перетекание газа через щелевые каналы безмасляного спирально-го вакуумного насоса. Показано, что определяющий вклад в перетекание газа вносит профильный канал между спиральями. Рассмотрены два варианта течения газа через канал с подвижной стенкой. Первый, когда ротор вращается вокруг своей геометрической оси со скоростью, направленной с входа на выход, взаимодействие молекул с движущейся стенкой увеличивает проводимость в этом направлении. Данный принцип используется в молекулярных вакуумных насосах для откачки. Второй, когда ротор вращается вокруг центра, не совпадающего с геометрическим центром головки ротора, вращение оказывает противоположный эффект, а именно, перетекания с выхода на вход увеличиваются. Показано, что аналогичная картина наблюдается при орбитальном движении подвижной спирали относительно неподвижной спирали в спиральном вакуумном насосе. Соответственно перемещение точки контакта в профильном канале спирального насоса увеличивает обратные перетекания. Проведен расчет перетеканий через подвижный профильный канал спирального насоса в молекулярном и вязкостном режимах течения газа. При молекулярном режиме течения проводимость может увеличиться в 10–15 раз по сравнению с каналом с неподвижными стенками. В вязкостном режиме, даже при критических отношениях давлений, увеличение скорости стенок до 50 м/с приводит к росту на 15... 45% массовых перетеканий. При докритических режимах течения газа влияние скорости стенок еще существеннее.

Ключевые слова: спиральный вакуумный насос, проводимость, щелевой канал, подвижная стенка, зазор, обратные перетекания.

EFFECT OF THE ORBITAL MOVEMENT SPEED OF A SCROLL ON LEAKAGE IN A SCROLL VACUUM PUMP**A.A. Raykov, M.D. Bronstein, S.I. Salikeev, A.V. Burmistrov**

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
e-mail: ors@hitv.ru bronmich@gmail.com; salikeev_s@mail.ru; burm@kstu.ru

The gas leakage through slot channels in an oil-free scroll vacuum pump is considered. It is shown that a profile channel between scrolls makes the determining contribution to the gas leakage. Two variants of gas flow through channels with moving walls are considered. In the first case, when a rotor rotates about its geometrical axis at a speed directed from inlet to outlet, the interaction between gas molecules and a moving wall increases a conductance in this direction. It is the operating principle of molecular pumps. In the second case, when a rotor rotates around the center which does not coincide with geometrical center of the rotor head, rotation has an opposite effect: a leakage from outlet to inlet increases. It is shown that a similar situation is observed when a moving scroll executes an orbital movement relative to a fixed scroll in a scroll vacuum pump. Correspondingly,

a displacement of the contact point in a profile channel of the scroll pump increases the backward leakage. A leakage through the moving profile channel of the scroll pump is calculated for the molecular and viscous gas flow regimes. The conductance in the molecular flow regime may increase by a factor of 10–15 in comparison to the channel with fixed walls. In the viscous flow regime, even with critical pressure ratios, an increase in the wall speed up to 50 m/s results in the mass leakage growth by 15–45%. When gas flow regimes are subcritical, the effect of wall speed is more significant.

Keywords: scroll vacuum pump, conductance, slot channel, moving wall, clearance, backward leakage.

Спиральная машина в безмасляном исполнении, будь то вакуумный насос или компрессор, является типичным представителем бесконтактных конструкций, в которых “сухой” процесс достигается за счет наличия зазоров между движущимися элементами (рис. 1). Причем именно отсутствие масла является одним из главных достоинств вакуумных спиральных насосов (НВСП), определяющих сферу их применения: установки получения конструкционных и биосовместимых материалов, нанокерамики, технологии создания чувствительных элементов миниатюрных датчиков на основе нанопленок, индустрия нанесения наноструктурированных покрытий в вакууме, включая ионно-плазменные, дуговые и электронно-лучевые методы, технологии изготовления фотоэлементной аппаратуры для солнечной энергии

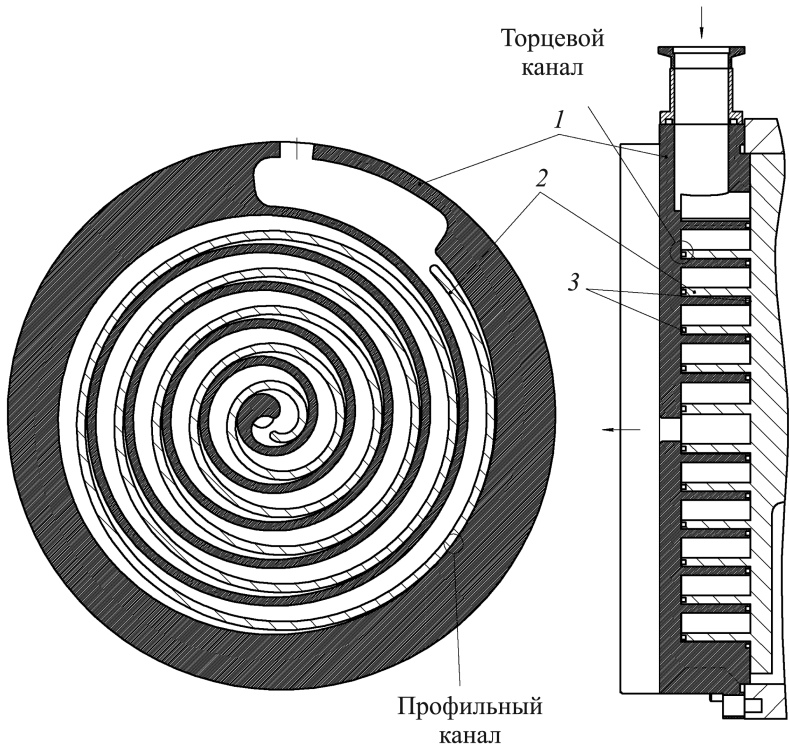


Рис. 1. Спиральный вакуумный насос:

1 — корпус, выполненный заодно с неподвижной спиралью, 2 — подвижная спираль, 3 — торцевая уплотнительная лента

тики, плоскопанельных дисплеев, элементов электронных схем субмикронных и нанометровых размеров, т.е. всюду, где присутствие даже малейшего количества паров масла в остаточной среде приводит к необратимым потерям качества продукции.

Как и в любом бесконтактном насосе, перетекания через гарантированные зазоры определяют характеристики НВСП. Поэтому для их определения необходим метод расчета обратных перетеканий через щелевые каналы.

Известно, что в НВСП существует два вида каналов (см. рис. 1): профильный — между профильными поверхностями подвижной и неподвижной спиралей; торцевой — между торцом пера одной спирали и торцевым диском второй.

С учетом того, что в канавке, выполненной в торце пера спирали, размещается уплотнительная лента из фторопластовой композиции, которая при движении спирали скользит по поверхности торцевого диска и уплотняет торцевой зазор, определяющее влияние на обратные перетекания в НВСП оказывает профильный канал.

Следует отметить, что выпускаемые ведущими производителями насосы позволяют получить предельное остаточное давление ниже 1 Па, работая с выхлопом в атмосферу [1–3]. Таким образом, режим течения газа в щелях НВСП может быть и молекулярным, и переходным, и вязкостным, и для каждого режима должны использоваться соответствующие уравнения.

В настоящее время существует множество методик расчета перетеканий через щели компрессоров и вакуумных насосов [4–7]. Практически во всех методиках не рассматривается влияние скорости движения стенок спирали, ссылаясь на малый радиус орбитального движения и, соответственно, малую линейную скорость стенок подвижной спирали. Для компрессоров в условиях сплошной среды в спиральном механизме пренебрежение влиянием движения возможно оправдано. Но, как известно, в условиях разреженной среды влияние скорости стенок гораздо существеннее и получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных без учета движения стенок каналов невозможно. Поэтому, например в работе [7], указывается, что изменение скорости орбитального движения вызывает изменение разности температур между подвижной и неподвижной спиралью, что приводит к изменению зазора между ними. Таким способом здесь учитывается изменение перетеканий при варьировании скорости. Однако объяснить изменение характеристик НВСП только отклонениями зазоров за счет тепловых деформаций не удастся.

Рассмотрим два варианта течения газа через канал с подвижной стенкой (рис. 2). В первом случае (рис. 2, а) ротор вращается вокруг

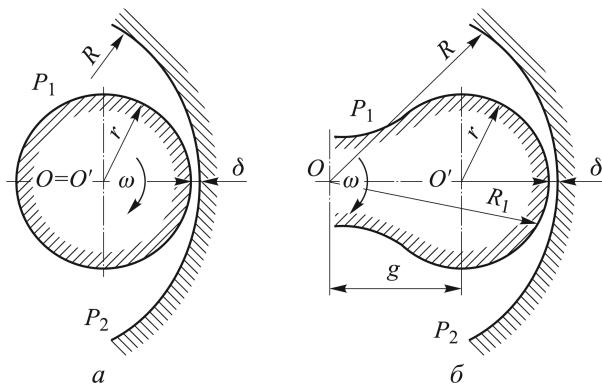


Рис. 2. Различные варианты каналов, образованных выпуклой и вогнутой цилиндрическими стенками

своей геометрической оси O с угловой скоростью ω . В этой ситуации линейная скорость на роторе в каждой точке при заданной частоте вращения постоянна и равна $V = \omega r$, а взаимодействие молекул с движущейся стенкой увеличивает проводимость в направлении со входа на выход (со стороны с давлением P_1 на сторону с P_2). Именно этот принцип используется для откачки в молекулярных вакуумных насосах.

Теперь рассмотрим случай, когда вращение ротора осуществляется вокруг центра O , не совпадающего с геометрическим центром головки ротора O' (рис. 2, б). Такой вариант имеет место в радиальном канале двухроторного вакуумного насоса (ДВН) типа Рутс, причем здесь $V_i = \omega R_i$, а $\delta \ll (R - r)$.

На примере ДВН [8] показано, что эффект от вращения ротора модели (см. рис. 2, б) полностью противоположен модели, приведенной на рис. 2, а. А именно, перетекания с выхода на вход увеличиваются. Такой характер течения может быть объяснен тем, что большая часть газа, попадающего в канал со стороны выхода, проходит через зазор не за счет взаимодействия со стенками, а за счет встречного движения (проворачивания) ротора. Соответственно, молекулы испытывают меньшее число столкновений с движущейся навстречу стенкой, и их шансы на прохождение с выхода на вход увеличиваются. Причем эффект усиливается при уменьшении зазора и наиболее сильно проявляется при молекулярном режиме течения газа.

Аналогичная картина наблюдается при орбитальном движении подвижной спирали 2 относительно неподвижной спирали 1 в НВСп (рис. 3). При этом каждая точка подвижной спирали имеет мгновенную скорость $V_e = e\omega$, где e — эксцентриситет.

Частота вращения в НВСп, как правило, не выше 2000 об/мин. Значение эксцентриситета даже для больших насосов обычно не превышает 10 мм, т.е. V_e не достигает даже 2...3 м/с. Опираясь именно

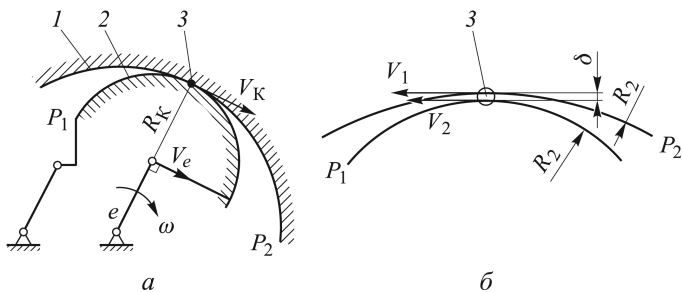


Рис. 3. Схема движения спиралей в НВСП:

a — в системе координат неподвижной спирали, *б* — в системе координат точки контакта; 1 и 2 — неподвижная и подвижная спирали, 3 — точка контакта, V_K — скорость точки контакта, V_1 , V_2 — скорость неподвижной и подвижной спиралей в системе координат точки контакта соответственно

на этот факт исследователи НВСП пренебрегали влиянием скорости стенки на перетекания.

Однако, как уже отмечалось, точка “контакта” движется со скоростью $V_K = R_K \omega$, где R_K — радиус неподвижной спирали в точке контакта. Максимальный радиус R_K для средних НВСП с быстротой действия около 5...10 л/с составляет порядка 150 мм, а для больших насосов вполне может достигать уже 250 мм, что соответствует скорости около 50 м/с, т.е. для воздуха $V_K/c \approx 0,1$ (c — средняя тепловая скорость молекул газа).

Для расчета проводимости канала рассмотрим движение спиралей в системе координат, связанной с точкой контакта. В этом случае неподвижная спираль будет иметь скорость $V_1 = V_K$, а подвижная — $V_2 = V_K - V_e$. При достаточно больших габаритных размерах насоса $R_K \geq e$ скорость V_2 можно принять равной V_1 .

Проведем численную оценку влияния движения спирали на течение газа через профильный канал. Как известно, для расчета проводимости произвольного канала с неподвижными стенками в молекулярном режиме течения газа используется формула [9]

$$U = \frac{A}{4} F_{\text{вх}} K, \quad (1)$$

где $F_{\text{вх}}$ — площадь поперечного сечения входа в канал, K — коэффициент проводимости (вероятность прохождения молекул через щелевой канал).

Формула (1) для каналов переменного сечения, каковыми являются профильные каналы НВСП, записывается в виде [10]

$$U = \frac{A}{4} F_3 K_3, \quad (2)$$

где F_3 — площадь поперечного сечения канала в месте минимального зазора δ , K_3 — коэффициент проводимости, приведенный к минимальному зазору.

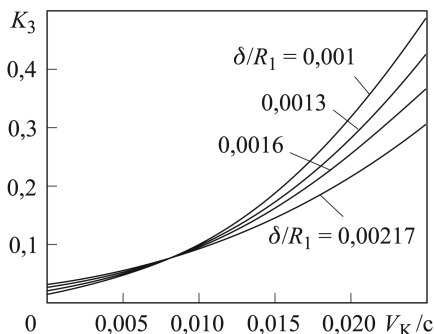


Рис. 4. Зависимость коэффициента проводимости от относительной скорости спирали для различных относительных зазоров при $R_2/R_1 = 0,9$:

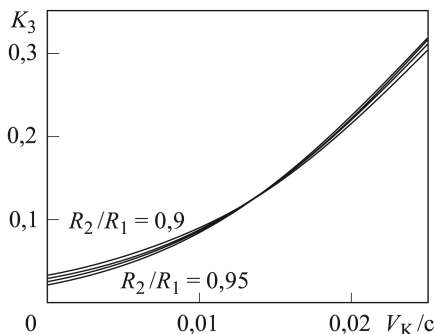


Рис. 5. Зависимость коэффициента проводимости от относительной скорости спирали для различных относительных радиусов при $\delta/R_1 = 0,00217$

Для нахождения коэффициентов проводимости использовался метод Монте-Карло (ММК), и в пакете Mathematica [11] разработана программа, моделирующая движение молекул газа в криволинейных каналах. Расчет ММК проводился при следующих традиционных допущениях: режим течения в канале молекулярный ($Kn > 1$), соответственно молекулы сталкиваются только со стенками и не сталкиваются друг с другом; поток газа через канал стационарный; отражение молекул от стенок канала происходит по закону косинусов; коэффициент аккомодации равен единице; температура газа за время прохождения молекул через канал не меняется.

Результаты расчета приведены на рис. 4 и 5 в виде зависимости коэффициента Клаузинга от V_K/c для различных относительных зазоров и относительных радиусов стенок канала. Отметим, что проводимость канала в молекулярном режиме за счет перемещения подвижной спирали увеличивается до 10...15 раз. При этом в НВСП отношение радиусов каналов изменяется достаточно в узких пределах и поэтому не оказывает значительного влияния на K_3 (см. рис. 5).

Также проведены численные расчеты движения газа в каналах с движущимися стенками в вязкостном режиме. Расчеты проводились в пакете вычислительной гидрогазодинамики Fluent [12] при различных значениях зазора, радиусах кривизны, давления на входе и выходе из канала, скоростях стенок канала. Решение выполнено в двухмерной стационарной постановке методом контрольного объема. На стенках каналов задавалось условие прилипания, а скорость стенок – через тангенциальные составляющие скорости вращательного движения. Использовалась неравномерная сетка со сгущением в области минимального зазора и у стенок канала, т.е. в области максимальных градиентов давлений и скоростей. Для расчета полей скорости и давления использовался алгоритм Simple.

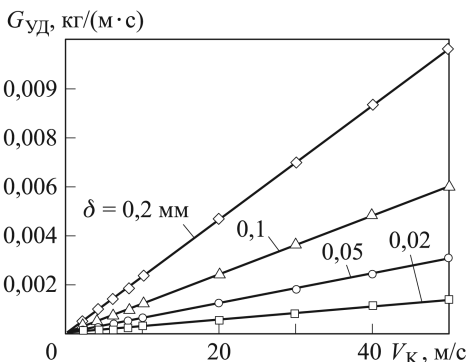


Рис. 6. Зависимость удельного массового расхода при $R_1 = 104$ мм, $R_2 = 100$ мм от скорости движения стенки для различных зазоров при нулевом перепаде давления

Влияние скорости движения спирали можно проследить на рис. 6, где показано изменение массового расхода через канал при нулевом перепаде давлений на выходе и входе. Графики зависимости массового расхода от скорости движения стенок представляют собой практически прямые линии, лишь при высоких скоростях наблюдается незначительное отклонение от прямых.

При работе НВСп отношение давлений на входе и выходе для профильного канала практически всегда является закритическим ($P_1/P_2 < 0,528$), поэтому поток газа за счет перепада давлений преобладает над кинетической составляющей. Это демонстрирует рис. 7. Однако даже при критических отношениях давлений увеличение скорости стенок до 50 м/с для рассмотренных каналов приводит к росту массовых перетеканий на 15...45%. При докритических режимах течения газа влияние скорости стенок еще существеннее.

Следует также отметить, что влияние подвижности стенок в вязкостном режиме увеличивается по мере снижения давления в канале. Так, для критического течения при $P_2 = 50000$ Па приращение массовых перетеканий почти в 2 раза больше по сравнению с $P_2 = 10^5$ Па (рис. 8).

Статья подготовлена в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов

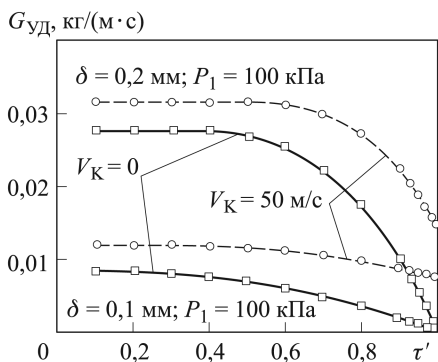


Рис. 7. Зависимость удельного массового расхода при $R_1 = 104$ мм, $R_2 = 100$ мм от отношения давлений в канале при разных зазорах

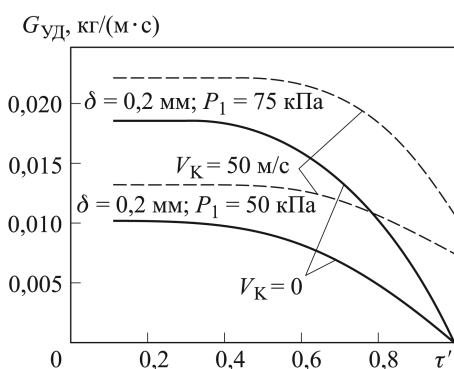


Рис. 8. Зависимость удельного массового расхода при $R_1 = 104$ мм, $R_2 = 100$ мм от отношения давлений в канале при разных давлениях на входе в канал (см. подпись к рис. 7)

для индустрии наносистем и наноматериалов” открытого публично-го конкурса по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологического производства согласно постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 года № 218 “О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства”.

ЛИТЕРАТУРА

1. SCROLLVAC Scroll Vacuum Pumps [Электронный ресурс] / Oerlikon Corporate Switzerland. – Switzerland.: Oerlikon Corporate Switzerland, 2013. Режим доступа: https://leyboldproducts.oerlikon.com/products/produktkatalog_03.aspx?cid=20_3, свободный.
2. Dry Scroll Vacuum Pumps [Электронный ресурс] / Anest Iwata. –USA.: Anest Iwata, 2013. – Режим доступа: <http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/>, свободный.
3. Edwards nXDS – the great new shape of dry vacuum pumping [Электронный ресурс] / Edwards Ltd. – United Kingdom.: Edwards Ltd, 2013. Режим доступа: http://www.edwardsvacuum.com/nxds/en/index.html?cmpid=Homepage-Link_nXDS0412, свободный.
4. Li Z. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump / Z. Li, L. Li, Y. Zhao, G. Bu, P. Shu // Vacuum. 2010. Vol. 84. No. 3. P. 415–421.
5. Li Z. Test and analysis on the working process of dry scroll vacuum pump / Z. Li, L. Li, Y. Zhao, G. Bu, P. Shu, J. Liu // Vacuum. 2010. Vol. 85. P. 95–100.
6. Su Y., Sawada T., Takemoto J., Haga S. Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll vacuum pump // Vacuum. 1996. Vol. 47. P. 815–818.
7. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump / T. Sawada, S. Kamada, W. Sugiyama, J. Takemoto, S. Haga, M. Tsuchiya // Vacuum. 1999. Vol. 53. Is. 1–2. P. 233–237.
8. Бурмистров А.В., Карблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Моделирование течения разреженного газа в каналах с движущейся стенкой // Сб. трудов Междунар. науч. конф. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-17: В 10 т. Т. 5. Секция 5. Кострома, 2004. С. 105–108.
9. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
10. Бурмистров А.В., Ушко А.В. Проводимость радиальных каналов двухроторных вакуумных насосов в молекулярном режиме // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13. № 2. С. 83–87.
11. Wolfram Mathematica license file for Kazan National Research Technology University # L3543–5535.
12. ANSYS Academic Research CFD license file for Kazan State Technological University, Customer Number: 607451 created 01.01.2011.

REFERENCES

- [1] SCROLLVAC Scroll Vacuum Pumps. Online catalogue. Headquarter, Production Site. Oerlikon Corporate Switzerland, Pf?ffikon, 2013. Available at: https://leyboldproducts.oerlikon.com/products/produktkatalog_03.aspx?cid=20_3 (accessed 04.04.2014).

- [2] Dry Scroll Vacuum Pumps. Online catalogue. ANEST IWATA USA, Ohio, Anest Iwata Corporation, 2013. Available at: <http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/> (accessed 04.04.2014).
- [3] Edwards nXDS – the great new shape of dry vacuum pumping. Online catalogue. Edwards Ltd, Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 9LW, UK, 2013. Available at: http://www.edwardsvacuum.com/nxds/en/index.html?cmpid=Homepage-Link_nXDS0412 (accessed 04.04.2014).
- [4] Li Z., Li L., Zhao Y., Bu G., Shu P. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2010, vol. 84, no. 3, pp. 415–421.
- [5] Li Z., Li L., Zhao Y., Bu G., Shu P., Liu J. Test and analysis on the working process of dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2010, vol. 85, no. 1, pp. 95–100.
- [6] Su Y., Sawada T., Takemoto J., Haga S. Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1996, vol. 47, pp. 815–818.
- [7] Sawada T., Kamada S., Sugiyama W., Takemoto J., Haga S., Tsuchiya M. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1999, vol. 53, iss. 1–2, pp. 233–237.
- [8] Burmistrov A.V., Karablinov D.G., Bronshtejn M.D. Simulation of rarefied gas flow in channels with a moving wall. *Sb. Tr. Mezhdunar. Nauch. Konf. "Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah – MMTT-17"*. Vol. 10t. Vol. 5 [Proc. Int. Sci. Conf. "Math. Meth. in Engineering and Technology". In 10 vol. Vol. 5], Kostroma, 2004, sect. 5, pp. 105–108 (in Russ.).
- [9] Demihov K.E., Panfilov Ju.V., Nikulin N.K. Avtonomova I.V., Aleksandrova A.T., Androsov A.V., Burmistrov V.A., Bykov D.V., Deulin E.A., Ivanovskij G.F., Isaev A.V., Kalinkin D.A., Kapustin E.N., Kemenov V.N., Kuprijanov V.I., eds. *Vakuumnaja tehnika: Spravochnik [Handbook of vacuum technology]*. 3rd Ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p.
- [10] Burmistrov A.V., Ushko A.V. Conductivity of radial channels of dual rotor vacuum pumps in the molecular mode. *Vak. Tekh. Tekhnol.* [Vac. Eng. Technol.], 2003, vol. 13, no. 2, pp. 83–87 (in Russ.).
- [11] Software "Wolfram Mathematica". Champaign, United States – Corporate Headquarters. License file for Kazan State Technology University # L3543–5535.
- [12] Software Automation System of Engineering Evaluation "ANSYS Academic Research CFD". University of Illinois. License file for Kazan State Technological University, Customer Number: 607451 created 01.01.2011.

Статья поступила в редакцию 25.11.2013

Райков Алексей Александрович — канд. техн. наук, ассистент кафедры "Вакуумная техника" Казанского национального исследовательского технологического университета.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68.

A.A. Raykov — Cand. Sci. (Eng.), assistant lecturer of "Vacuum Equipment of Electrophysical Plants" department of the Kazan National Research Technological University. Kazan National Research Technological University, ul. Karla Marksa 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015 Russian Federation.

Саликеев Сергей Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры "Вакуумная техника электрофизических установок" Казанского национального исследовательского технологического университета.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68.

S.I. Salikeev — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Vacuum Equipment of Electrophysical Plants” department of the Kazan National Research Technological University.

Kazan National Research Technological University, ul. Karla Marksa 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015 Russian Federation.

Бронштейн Михаил Давидович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Математика” Казанского национального исследовательского технологического университета. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68.

M.D. Bronstein — Cand. Sci. (Phys.–Math.), assoc. professor of “Mathematics” department of the Kazan National Research Technological University.

Kazan National Research Technological University, ul. Karla Marksa 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015 Russian Federation.

Бурмистров Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Вакуумная техника электрофизических установок”, декан механического факультета Казанского национального исследовательского технологического университета.

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68.

A.V. Burmistrov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Vacuum Equipment of Electrophysical Plants” department, dean of Mechanical Faculty of the Kazan National Research Technological University. Kazan National Research Technological University, ul. Karla Marksa 68, Kazan, Republic of Tatarstan, 420015 Russian Federation.