

РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ ПРОФИЛЬНЫХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛОВ БЕСКОНТАКТНЫХ БЕЗМАСЛЯНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ В ВЯЗКОСТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

С.И. Саликеев, А.А. Райков, А.В. Бурмистров

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

Получена полуэмпирическая формула для расчета проводимости канала, образованного выпуклой и вогнутой цилиндрическими стенками проточной части насоса, применительно к расчету профильных каналов бесконтактных безмасляных вакуумных насосов, в частности, спиральных, винтовых, двухроторных типа Рутс, плунжерных. Предлагаемое простое уравнение, позволяет с минимальными вычислительными затратами получить значения проводимости и массового расхода для сложных профильных каналов. Представлены математические зависимости для расчета геометрических параметров каналов различных профилей. Расчетные значения по формуле применительно к каналам спирального насоса были проверены численным расчетом в пакете Fluent на основании уравнений Навье–Стокса для вязкостного режима течения газа. Расчет проведен для всего диапазона геометрических параметров каналов известных спиральных вакуумных насосов. Результаты расчетов представлены в графическом виде и в форме таблиц. Проведено сравнение результатов расчета по предлагаемой формуле и численного решения уравнений Навье–Стокса. Среднее расхождение расчетов составляет всего 2,5%.

Ключевые слова: проводимость, щелевые каналы, вязкостный режим, спираль, геометрические параметры.

CALCULATION OF CONDUCTIVITY OF PROFILE SLOTTED CHANNELS OF CONTACTLESS OILFREE VACUUM PUMPS IN VISCOUS REGIME OF GAS FLOW

S.I. Salikeev, A.A. Raikov, A.V. Burmistrov

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation
e-mail: salikeev_s@mail.ru; ors@hitv.ru; burm@kstu.ru

A semi-empiric formula for calculating the conductivity of the channel formed by the convex and concave cylindrical walls of the pump flow path is derived as applied to the calculation of the profile channels of contactless oil-free vacuum pumps, in particular, spiral, helical, two-rotor (of Roots type), and plunger pumps. The proposed simple equation makes it possible to obtain the conductivity and mass rate values for complex profile channels with minimum computing time. Mathematical dependences are presented for calculating geometrical parameters of different-profile channels. The values calculated from the formula were verified by the numerical calculation using the FLUENT software package based on the Navier–Stokes equations for the viscous regime of gas flow. The calculation is performed for the entire range of geometrical parameters of channels for the known spiral vacuum pumps. The calculation results are presented graphically form and in the form of tables. The results obtained from the proposed formula are compared with the results of solving numerically the Navier–Stokes equations. The average discrepancy of the calculations is merely 2.5%.

Keywords: conductivity, slotted channels, viscous regime, spiral, geometric parameters.

Развитие различных высокотехнологичных приложений вакуумной техники, таких как индустрия наносистем и наноматериалов, микроэлектроника, медицина, фармацевтика, термоядерная энергетика, пищевое и упаковочное производства и другие, формирует новые требования к вакуумному оборудованию. Это, в первую очередь, касается обеспечения “чистоты” получаемого вакуума, т.е. отсутствия паров рабочих жидкостей в технологическом объеме.

Разнообразие механических насосов, способных обеспечить получение безмасляного вакуума, впечатляет. Наиболее известны: поршневые, мембранные, винтовые, спиральные, осевые, центробежные, пластинчатые, двухроторные типа Рутс, кулачково-зубчатые, молекулярные, турбомолекулярные. В этом перечне присутствуют насосы низкого, среднего и высокого вакуума.

Одной из наиболее актуальных задач, решаемых в связи с повсеместным переходом на безмасляные средства откачки, является замена вакуумных насосов с масляным уплотнением (пластинчато-роторных и плунжерных) на “сухие” машины. Очевидно, что безмасляные альтернативы насосов с масляным уплотнением должны обеспечивать схожие с последними характеристики как по остаточному давлению, так и по скорости действия. Из представленного ряда сухих насосов наиболее подходящими для этой цели являются три вида бесконтактных машин: винтовые, спиральные и кулачково-зубчатые. Именно с этим связан рост объемов их выпуска ведущими зарубежными производителями [1, 2]. К сожалению, в России ни одна из данных конструкций серийно в виде вакуумного насоса не производится.

Бесконтактные машины являются весьма наукоемким видом продукции. Для изготовления профильных элементов таких насосов (спиралей или роторов) требуется прецизионное дорогостоящее оборудование. Совершенствование бесконтактных машин возможно только на базе физически обоснованных и надежно апробированных математических моделей, позволяющих получать информацию о влиянии любого конструктивного параметра на откачные характеристики. Недаром, говоря, например, о спиральных машинах, отмечают, что наличие или отсутствие такого рода производства можно до определенной степени рассматривать как показатель уровня развития научно-технического потенциала страны [3].

В основе математической модели любого бесконтактного насоса лежат уравнения для расчета перетеканий газа через щелевые каналы роторного механизма. Геометрия щелевых каналов определяется профилем роторов и их взаиморасположением. Профиль роторов очерчивается самыми различными кривыми. Часто применяются сложные

профили, состоящие из нескольких кривых, переходящих одна в другую. Получить расчетные аналитические соотношения для каждой геометрии невозможно.

Найти массовый расход газа через канал произвольной геометрии можно с помощью численного решения кинетических уравнений, а именно уравнения Больцмана [4–6]. Однако применительно к бесконтактным насосам расчет проводимости щелевых каналов является лишь составляющей сложной математической модели процесса откачки, которая решается методом последовательных приближений. А решать систему дифференциальных уравнений для нахождения проводимости на каждом шаге вычислений — совершенно иррациональная задача.

Поэтому во многих случаях гораздо удобнее пользоваться простыми уравнениями, позволяющими оперативно получить искомое значение проводимости. Так, в работах [3, 7, 8], посвященных исследованию спиральных компрессоров и воздуходувок Рутса, используются выражения, полученные путем обобщения результатов экспериментальной продувки щелей при давлениях выше атмосферного. Однако необходимость использования графических зависимостей для определения коэффициентов, входящих в уравнения, создает неудобства при расчетах. Кроме того, представленные графические зависимости часто не охватывают необходимые для вакуумной техники диапазоны давлений.

В работах [9, 10] разработан универсальный метод расчета проводимости профильных щелевых каналов, характерных для бесконтактных вакуумных насосов. Метод использует тот факт, что большинство профильных каналов бесконтактных вакуумных насосов и компрессоров представляют собой щели переменного в направлении перетекания газа сечения, которые имеют в некотором месте минимальный зазор (например, рис. 1).

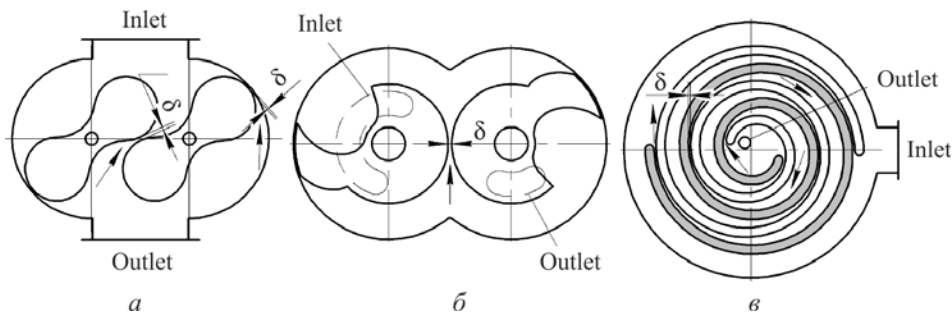
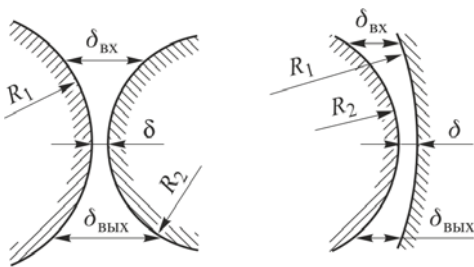


Рис. 1. Щелевые каналы некоторых бесконтактных насосов:

a — насос типа Рутса; *б* — кулачково-зубчатый вакуумный насос; *в* — спиральный вакуумный насос



Канал 1

Канал 2

Рис. 2. Геометрия щелевых каналов, образованных цилиндрическими поверхностями

Для таких каналов проводимость с достаточной точностью определяется участком в окрестности минимального зазора. В работах [7, 8] показано, что периферийные участки канала при $\delta_{\text{вх}}/\delta > 5$ и $\delta_{\text{вых}}/\delta > 5$ (где δ — минимальный зазор в канале, $\delta_{\text{вх}}$, $\delta_{\text{вых}}$ — ширина входного и выходного сечений канала) изменяют проводимость не более чем на 1 %.

Тогда стенки канала практически с любым профилем на данном участке могут быть аппроксимированы выпуклыми или вогнутыми дугами окружности с радиусами R_1 и R_2 (рис. 2). Метод работает даже в случае, если радиусы кривизны стенок со стороны входа в канал и выхода существенно отличаются друг от друга.

Таким образом, для нахождения проводимости профильных каналов бесконтактных насосов достаточно иметь формулы для расчета проводимости каналов 1 и 2 и знать радиусы кривизны в точке контакта. Для расчета проводимости каналов 1 и 2 в работе [11] получена формула

$$U = \frac{\sqrt{2R_r T_1} \xi (1 + \tau) \delta L}{9\pi(1 + \sqrt{1 + \alpha(1 - \tau^2)\xi^2})},$$

где R_r — газовая постоянная; T_1 — температура газа на входе в канал; $\xi = \frac{\delta^2 p_1}{\eta \sqrt{R_r T_1} l_3}$; $l_3 = \sqrt{\frac{\delta R_1 R_2}{R_1 \pm R_2}}$ — эффективная длина канала; η — динамическая вязкость газа; $\tau = p_2/p_1$ — отношение давлений на выходе из канала p_2 и входе p_1 ; L — длина канала в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка (для насоса — длина ротора);

$$\alpha = c_0 + c_1 x_k + c_2 x_k^2 + c_3 x_k^3 - 0,00129 \tau^{0,397 \xi}; \quad x_k = \frac{\ln \tau}{\ln \tau - 1};$$

$$c_0 = \frac{0,0008}{1 + 0,00013 \xi^3} + \frac{775}{10^6 + 0,202 \xi^3} + \frac{0,00088 \xi^3}{10^6 + 0,362 \xi^3};$$

$$c_1 = -0,00153 + \frac{0,0103 \xi^2}{2544 + \xi^2 + 0,0000275 \xi^4};$$

$$c_2 = \frac{284,6}{9086 + \xi^2} + \frac{0,0105 \xi^2}{58153 + \xi^2} + \frac{0,0137 \xi^3}{1,11 \cdot 10^7 + \xi^3};$$

$$c_3 = - \left(\frac{0,00805 \xi^2}{36345 + \xi^2} + \frac{39823}{1,646 \cdot 10^6 + \xi^3} + \frac{0,0129 \xi^3}{6,93 \cdot 10^6 + \xi^3} \right).$$

При определении эффективной длины канала знак “+” выбирается для канала 1, “-” — для канала 2.

Формула для расчета проводимости каналов получена путем аппроксимации результатов численного решения уравнений гидродинамики. Расчеты проводились при варьировании относительных геометрических размеров каналов в следующих диапазонах: $R_2/R_1 = 0,05 \dots 0,66$; $\delta/R_1 = 0,00056 \dots 0,0167$, что практически полностью охватывает размеры профильных каналов роторного механизма двухроторных и кулачково-зубчатых насосов. Выражение (1) успешно использовано в соответствующих математических моделях [12, 13].

Наибольший интерес с точки зрения получения безмасляного вакуума представляют сухие спиральные вакуумные насосы (СПВН). Здесь приходится рассматривать течение газа через профильный канал между двумя спиралями — канал 2 (см. рис. 2). Для СПВН отношения радиусов кривизны в точке контакта (в месте минимального зазора) отличаются, как правило, от приведенных, $R_2/R_1 > 0,66$. Для больших СПВН оно может достигать значения 0,97.

В целях проверки работоспособности выражения (1) применительно к профильным каналам спиральных насосов в пакете Fluent проведен численный расчет массового расхода и проводимости канала 2 (см. рис. 2).

Геометрические параметры канала изменялись в следующих диапазонах $R_2/R_1 = 0,6 \dots 0,98$ и $\delta/R_1 = 0,020921 \dots 0,000417$. Радиусы образующих канал окружностей $R_1 = 23,9 \dots 120$ мм; $R_2 = 20,3 \dots \dots 93$ мм. Значение зазора δ варьировалось от 0,05 до 0,5 мм. Исключение составил канал с $R_2/R_1 = 0,98$, для которого зазор изменялся от 0,05 до 0,2 мм. Для данного отношения R_2/R_1 при больших зазорах расширение $\delta_{\text{вх}}/\delta = 5$ не достигается.

Давление на входе в канал изменялось от $3 \cdot 10^3$ до 10^5 Па. Для некоторых каналов максимальное давление на входе составляло $3 \cdot 10^5$ Па. Отношение давлений на выходе и входе $\tau = p_2/p_1$ изменялось от 0,9999 до 0,1.

Приведенные размеры охватывают все существующие на сегодняшний день СПВН. Всего было проведено более 1000 численных экспериментов.

Некоторые из полученных значений в сопоставлении с расчетом представлены в таблице. Здесь $U_{\text{числ}}$ — проводимость, полученная численным расчетом, $U_{(1)}$ — расчетом по формуле (1).

Зависимость проводимости от среднего давления на концах канала также приведена на рис. 3.

Проводимость канала 2

| $p_1, \text{Па}$ | $\tau = p_2/p_1$ | $U_{\text{числ}}, \text{м}^3/\text{с}$ | $U_{(1)}, \text{м}^3/\text{с}$ | $\frac{(U_{\text{числ}} - U_{(1)})}{U_{(1)}}, \%$ | $p_1, \text{Па}$ | $\tau = p_2/p_1$ | $U_{\text{числ}}, \text{м}^3/\text{с}$ | $U_{(1)}, \text{м}^3/\text{с}$ | $\frac{(U_{\text{числ}} - U_{(1)})}{U_{(1)}}, \%$ |
|------------------|------------------|---|--------------------------------|---|------------------|------------------|---|--------------------------------|---|
| | | $R_1 = 120 \text{ мм}, R_2 = 90 \text{ мм}, \delta = 0,05 \text{ мм}$ | | | | | $R_1 = 50 \text{ мм}, R_2 = 49 \text{ мм}, \delta = 0,1 \text{ мм}$ | | |
| 5000 | 0,1 | 0,000287 | 0,000029 | 1,15 | 5000 | 0,1 | 0,000060 | 0,000063 | 4,54 |
| | 0,2 | 0,000313 | 0,000032 | 1,15 | | 0,2 | 0,000066 | 0,000069 | 4,53 |
| | 0,5 | 0,000392 | 0,000040 | 1,15 | | 0,5 | 0,000082 | 0,000086 | 4,53 |
| | 0,9 | 0,000497 | 0,000050 | 1,11 | | 0,9 | 0,000104 | 0,000109 | 4,54 |
| | 0,99 | 0,000521 | 0,000053 | 0,92 | | 0,99 | 0,000109 | 0,000114 | 4,54 |
| 10000 | 0,1 | 0,000573 | 0,000058 | 1,20 | 10000 | 0,1 | 0,000120 | 0,000126 | 4,51 |
| | 0,2 | 0,000626 | 0,000063 | 1,18 | | 0,2 | 0,000131 | 0,000137 | 4,50 |
| | 0,5 | 0,000783 | 0,000079 | 1,15 | | 0,5 | 0,000164 | 0,000172 | 4,52 |
| | 0,9 | 0,000993 | 0,000100 | 1,14 | | 0,9 | 0,000208 | 0,000218 | 4,54 |
| | 0,99 | 0,001042 | 0,000105 | 0,98 | | 0,99 | 0,000218 | 0,000228 | 4,54 |
| 50000 | 0,1 | 0,0002743 | 0,000276 | 0,49 | 50000 | 0,1 | 0,000572 | 0,000593 | 3,56 |
| | 0,2 | 0,0003016 | 0,000303 | 0,30 | | 0,2 | 0,000629 | 0,000651 | 3,38 |
| | 0,5 | 0,000388 | 0,000387 | -0,23 | | 0,5 | 0,000805 | 0,000836 | 3,65 |
| | 0,9 | 0,0004959 | 0,000502 | 1,16 | | 0,9 | 0,001038 | 0,001088 | 4,54 |
| | 0,99 | 0,0005199 | 0,000526 | 1,15 | | 0,99 | 0,001089 | 0,001141 | 4,54 |
| 90000 | 0,1 | 0,0004588 | 0,000451 | -1,77 | 90000 | 0,1 | 0,000936 | 0,000958 | 2,22 |
| | 0,2 | 0,0005088 | 0,000499 | -1,98 | | 0,2 | 0,001042 | 0,001061 | 1,84 |
| | 0,5 | 0,0006738 | 0,000662 | -1,75 | | 0,5 | 0,001392 | 0,001419 | 1,88 |
| | 0,9 | 0,0008910 | 0,000901 | 1,07 | | 0,9 | 0,001864 | 0,001951 | 4,49 |
| | 0,99 | 0,0009358 | 0,000947 | 1,15 | | 0,99 | 0,001959 | 0,002053 | 4,54 |

| $R_1 = 113 \text{ мм}, R_2 = 93 \text{ мм}, \delta = 0,3 \text{ мм}$ | | $R_1 = 100 \text{ мм}, R_2 = 65 \text{ мм}, \delta = 0,1 \text{ мм}$ | | | | | | |
|--|--------|--|---------|-------|------|----------|----------|-------|
| 5000 | 0,01 | 0,00169 | 0,00178 | -5,15 | 0,1 | 0,000224 | 0,000227 | 1,38 |
| | 0,2 | 0,00206 | 0,00214 | -3,74 | 0,2 | 0,000245 | 0,000248 | 1,36 |
| | 0,5 | 0,00266 | 0,00276 | -3,62 | 0,5 | 0,000307 | 0,000311 | 1,40 |
| | 0,9 | 0,00340 | 0,00360 | -5,56 | 0,9 | 0,00039 | 0,000395 | 1,49 |
| | 0,99 | 0,00372 | 0,00377 | -1,33 | 0,99 | 0,000408 | 0,000414 | 1,48 |
| | 0,9999 | 0,00399 | 0,00379 | 5,01 | | | | |
| | 0,01 | 0,00555 | 0,00574 | -3,44 | 0,1 | 0,000441 | 0,000443 | 0,50 |
| | 0,2 | 0,00769 | 0,00712 | 8,01 | 0,2 | 0,00048 | 0,000485 | 0,93 |
| | 0,5 | 0,01097 | 0,01121 | -2,14 | 0,5 | 0,000609 | 0,000615 | 1,05 |
| 50000 | 0,9 | 0,02831 | 0,02915 | -2,88 | 0,9 | 0,000779 | 0,000791 | 1,48 |
| | 0,99 | 0,03580 | 0,03774 | -5,14 | 0,99 | 0,000816 | 0,000829 | 1,48 |
| | 0,9999 | 0,03722 | 0,03794 | -1,94 | | | | |
| | 0,01 | 0,00634 | 0,00634 | -0,04 | 0,1 | 0,00147 | 0,001461 | -0,56 |
| | 0,2 | 0,00783 | 0,00787 | -0,51 | 0,2 | 0,001653 | 0,001645 | -0,50 |
| | 0,5 | 0,01208 | 0,01244 | -2,89 | 0,5 | 0,002446 | 0,002387 | -2,50 |
| | 0,9 | 0,03567 | 0,03702 | -3,65 | 0,9 | 0,003839 | 0,003881 | 1,08 |
| | 0,99 | 0,06433 | 0,06503 | -1,08 | 0,99 | 0,004079 | 0,004143 | 1,55 |
| | 0,9999 | 0,07058 | 0,06828 | 3,26 | | | | |
| 90000 | 0,01 | 0,00727 | 0,00716 | 1,45 | 0,1 | 0,00183 | 0,001806 | -1,34 |
| | 0,2 | 0,00881 | 0,00886 | -0,61 | 0,2 | 0,002059 | 0,002048 | -0,54 |
| | 0,5 | 0,01426 | 0,01415 | 0,76 | 0,5 | 0,003209 | 0,003162 | -1,49 |
| | 0,9 | 0,04397 | 0,04492 | -2,17 | 0,9 | 0,006622 | 0,00662 | -0,03 |
| | 0,99 | 0,12133 | 0,12272 | -1,15 | 0,99 | 0,007333 | 0,007467 | 1,79 |
| | 0,9999 | 0,21430 | 0,22578 | -5,36 | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 300000 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

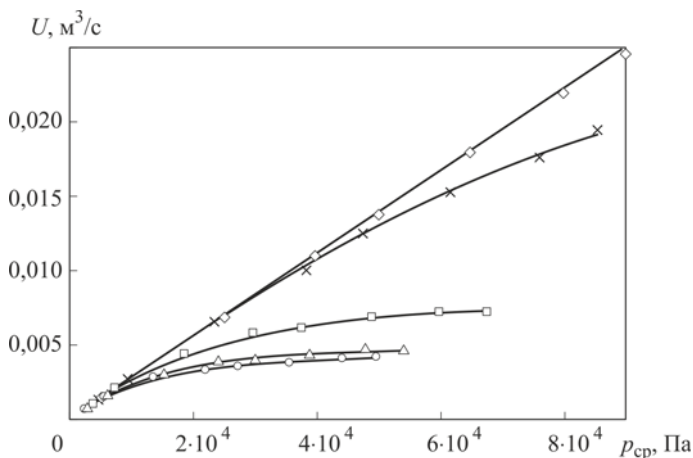


Рис. 3. Зависимость проводимости от среднего давления для канала 2 при $R_1 = 113$ мм, $R_2 = 93$ мм, $\delta = 0,2$ мм; линии – расчет по формуле (1); маркеры – численный расчет:

○ – $\tau = 0,1$; △ – $\tau = 0,2$; □ – $\tau = 0,5$; × – $\tau = 0,9$; ◇ – $\tau = 0,99$

Выявлено, что во всем исследованном диапазоне максимальное отклонение результатов расчета от данных численного эксперимента не превышает 10 %, а среднее отклонение составляет 2,5 %.

Это позволяет расширить диапазон предложенного метода расчета проводимости щелевых каналов в вязкостном режиме и, в частности, использовать его в математических моделях СПВН.

Статья подготовлена в рамках проекта “Создание высокотехнологичного производства безмаслянных спиральных вакуумных насосов для индустрии наносистем и наноматериалов” открытого публичного конкурса по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного 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 высокотехнологичного производства”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева Т.С., Васильев Ю.К., Нестеров С.Б. Анализ современного рынка оборудования систем создания и поддержания вакуума // Материалы XI науч.-техн. конф. Вакуумная наука и техника. М.: МИЭМ, 2005. С. 79–86.
2. Ануфриева И.В., Васильев Ю.К., Кеменов В.Н., Нестеров С.Б. Современное состояние рынка безмаслянных форвакуумных средств откачки // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13, № 2. С. 93–99.
3. Повышение эффективности спирального компрессора сухого сжатия: Дисс... канд. техн. наук: 05.04.06 / Е.Р. Ибрагимов; [Место защиты: Казан. гос. технол. ун-т]. Казань, 2009.

4. Берд Г.А. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. 320 с.
5. Sharipov F., Bertoldo G. Rarefied gas flow through a long tube of variable radius // J. Vac. Sci. Technol. 2005. Vol. A, no. 23. P. 531–533.
6. Sharipov F., Fahrenbach P., Zipp A. Numerical modeling of Holweck pump // J. Vac. Sci. Technol. 2005. Vol. A, no. 23. P. 1331–1339.
7. Совершенствование метода расчета рабочего процесса спирального компрессора сухого сжатия с использованием результатов экспериментальных исследований: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.04.06 / Ю.А. Паранин; [Место защиты: Казан. нац. исслед. технол. ун-т]. Казань, 2011.
8. Повышение эффективности работы роторных нагнетателей внешнего сжатия на основе анализа влияния геометрических параметров на их характеристики: дисс... канд. техн. наук / А.М. Ибраев; КХТИ. Казань, 1987.
9. Бурмистров А.В., Шарафеев Л.З., Саликеев С.И., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Метод экспресс-расчета проводимости щелевых каналов, образованных криволинейными стенками произвольной геометрии // Материалы XII науч.-техн. конф. “Вакуумная наука и техника”. М.: МИЭМ. 2005. С. 37–41.
10. Бурмистров А.В., Шарафеев Л.З., Бронштейн М.Д., Саликеев С.И., Караблинов Д.Г. Расчет проводимости профильных каналов роторных бесконтактных вакуумных насосов // Вакуумная техника и технология. 2006. Т. 16, № 1. С. 45–54.
11. Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Бронштейн М.Д. Исследование протечек газа через щелевые каналы в вязкостном // Компрессорная техника и пневматика. 2005. № 7. С. 19–23.
12. Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Экспериментально-теоретическое исследование индикаторных диаграмм кулачково-зубчатого вакуумного насоса // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. № 15. С. 210–214.
13. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.04.06 / А.В. Бурмистров. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2006.

REFERENCES

- [1] Vasil'eva T.S., Vasil'ev Y.K., Nesterov S.B. Analysis of the current state of the equipment market for creating and maintaining vacuum. *Mater. 12 Nauchno-Tekhn. Konf. "Vakuumnaya nauka i tekhnika"* [Proc. 12 Sci. Tech. Conf. "Vacuum science and technology"], Moscow, 2005, pp. 79–86 (in Russ.).
- [2] Anufrieva I.V., Vasil'ev Y.K., Kemenov V.N., Nesterov S.B. Current state of the market of fore-vacuum oil-free pumping equipment. *Vak. Tekh. Tekhnol.* [Vac. Tech. Technol.], 2003, vol. 13, no. 2, pp. 93–99 (in Russ.).
- [3] Ibragimov E.R. Povyshenie effektivnosti spiral'nogo kompressora sukhogo szhatiya. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of a dry running scroll compressor. Cand. tehn. sci. diss.]. Kazan, 2009.
- [4] Bird G.A. Molecular gas dynamics. Oxford, Clarendon Press, 1976. (Russ. ed.: Berd G.A. Molekulyarnaya gazovaya dinamika. Moscow, Mir Publ., 1981. 320 p.).
- [5] Sharipov F., Bertoldo G. Rarefied gas flow through a long tube of variable radius. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, vol. A, no. 23, pp. 531–533.
- [6] Sharipov F., Fahrenbach P., Zipp A. Numerical modeling of Holweck pump. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2005, vol. A, no. 23, pp. 1331–1339.
- [7] Paraniin Yu.A. Sovershenstvovanie metoda rascheta rabochego protsessa spiral'nogo kompressora sukhogo szhatiya s ispol'zovaniem rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of the method of calculation of dry running scroll compressor using the results of experimental studies. Cand. tehn. sci. diss. abstr.]. Kazan, 2011.

- [8] Ibraev A.M. Povyshenie effektivnosti raboty rotornykh nagnetateley vneshnego szhatiya na osnove analiza vliyaniya geometricheskikh parametrov na ikh kharakteristiki. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of rotary blowers with external compression by analyzing the influence of geometrical parameters on their performance. Cand. tehn. sci. diss.]. Kazan, 1987.
- [9] Burmistrov A.V., Sharafeev L.Z., Salikeev S.I., Karablinov D.G., Bronshteyn M.D. A method for the rapid calculation of conductivity of slot channels formed by curvilinear walls of arbitrary geometry. *Mater. 12 Nauchno-Tekhn. Konf. "Vakuumnaya nauka i tekhnika"* [Proc. 12 Sci. Tech. Conf. "Vacuum science and technology"], Moscow, 2005, pp. 37–41 (in Russ.).
- [10] Burmistrov A.V., Sharafeev L.Z., Bronshteyn M.D., Salikeev S.I., Karablinov D.G. Calculation of the conductivity of profile channels of non-contacting rotary vacuum pumps. *Vak. Tekh. Tekhnol.* [Vac. Eng. Technol.], 2006, vol. 16, no. 1, pp. 45–54 (in Russ.).
- [11] Salikeev S.I., Burmistrov A.V., Bronshteyn M.D. Investigation of gas leakage through slot channels. *Kompressorная Tekh. Pnevм.* [Compressor Tech. Pneumatics], 2005, no. 7, pp. 19–23 (in Russ.).
- [12] Raykov A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V. Experimental and theoretical study of indicator diagrams of a claw vacuum pump. *Vestn. Kazan Tekhnol. Univ.* [Herald of the Kazan Technol. Univ.], 2011, no. 15, pp. 210–214 (in Russ.).
- [13] Burmistrov A.V. Sozdanie i issledovanie beskontaktnykh vakuumnykh nasosov. Avtoreferat diss. doct. tekhn. nauk [Development and study of non-contacting vacuum pumps. Dr. tehn. sci. diss. abstr.]. Moscow, 2006.

Статья поступила в редакцию 21.03.2013

Сергей Иванович Саликеев — 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. К. Маркса, 68.

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

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015 Russian Federation.

Алексей Александрович Райков — ассистент кафедры “Вакуумная техника” Казанского национального исследовательского технологического университета.

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

A.A. Raikov — assistant lecturer of “Vacuum Technology of Electrophysical Plants” department of the Kazan National Research Technological University.

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015 Russian Federation.

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

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

A.V. Burmistrov — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Vacuum Technology of Electrophysical Plants” department of the Kazan National Research Technological University, dean of Mechanical Faculty.

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015 Russian Federation.