

УДК 621.521

doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-38-45

# Исследование перетеканий в двухроторном вакуумном насосе типа Рутс с эллиптическим профилем роторов при молекулярном режиме течения газа

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

Казанский национальный исследовательский технологический университет

## Study of the backward flow in Roots-type vacuum pump with elliptical rotor profile in the gas flow molecular regime

A.A. Isaev, A.A. Raykov, A.V. Burmistrov, S.I. Salikeev

Kazan National Research Technological University

Разработан и изготовлен двухроторный вакуумный насос типа Рутс с эллиптическим профилем роторов. Выполнено экспериментальное измерение проводимости его щелевых каналов при различных значениях угла поворота роторов и давления газа. Определена экспериментальная проводимость каналов при молекулярном режиме течения газа. С помощью метода угловых коэффициентов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, получены расчетные значения проводимости щелевых каналов для двухроторного вакуумного насоса. Отклонения расчетных данных от экспериментальных не превышали 10 %. Верификация и валидация аналитических выражений для проводимости щелевых каналов бесконтактных насосов показали возможность их применения в математических моделях рабочего процесса двухроторных вакуумных насосов.

**Ключевые слова:** двухроторный вакуумный насос, эллиптический профиль, молекулярный режим течения, проводимость щелевых каналов

A Roots-type two-rotor vacuum pump with the rotors' elliptical profile was designed, developed and manufactured. Its channels conductivity was measured experimentally at various angles of the rotors' rotation and pressures. Experimental conductivity of the channels was determined in the flow molecular regime. Using the angle factor method implemented in the COMSOL Multiphysics package calculated values of the channel conductivity were obtained for a two-rotor vacuum pump. Deviations in calculated data from the experimental data were not exceeding 10%. Verification and validation of analytical expressions for conductivity of the non-contact pump slot channels demonstrated possibility of their application in mathematical models of the working process of the two-rotor vacuum pumps.

**Keywords:** two-rotor vacuum pump, elliptical profile, flow molecular regime, slot channel conductivity

Двухроторные вакуумные насосы (ДВН) типа Рутс, называемые также механическими бу-стерными насосами, занимают ведущее положение среди средств получения низкого и

среднего вакуума. В настоящее время сложно представить себе откачную систему, требующую высокой быстроты откачки в диапазоне давления 1...1000 Па, без таких насосов, суще-

ственно сокращающих время откачки и снижающих остаточное давление в рабочей камере.

Наиболее часто ДВН используют в установках ионно-плазменного травления, плавки, пайки, дистилляции и нанесения тонких пленок [1, 2]. ДВН большого размера находят широкое применение в металлургии.

ДВН известны более века, но продолжают развиваться и совершенствоваться. Примером могут служить многоступенчатые агрегаты, состоящие из последовательно соединенных ступеней Рутса на одном валу, разделенных перегородками [3]. Кроме того, ведутся исследования по поиску наиболее эффективного профиля ротора, обеспечивающего высокое отношение давлений на выходе и входе, а также быстроту действия [4, 5].

Цель работы — сравнение результатов расчета проводимости щелевых каналов (ЩК) ДВН типа Рутс, полученных разными методами, с данными экспериментальных продувок.

На откачную характеристику ДВН (рис. 1) — зависимость быстроты действия от давления газа — оказывают влияние такие параметры, как объем газа, отсекаемый роторами и переносимый за один оборот, обратные перетекания газа с выхода на вход (проводимость) через ЩК роторного механизма и подвижность стенок ЩК.

В работах [6, 7] отмечено, что каналы ДВН можно рассматривать как своеобразные скоростные (кинетические) насосы. Влияние этой скоростной составляющей приходится учитывать при низком давлении. Так, при молекулярном режиме течения газа проводимость ЩК с учетом подвижности стенок может в десятки раз отличаться от таковой при неподвижных роторах. В вязкостном режиме течения газа (при давлении более 100...1000 Па) движение стенок роторов оказывает слабое влияние на

проводимость ЩК, и им чаще всего пренебрегают [8].

В теории бесконтактных насосов опорным параметром, на котором основан расчет ДВН, является проводимость ЩК роторного механизма при неподвижных роторах. По ее значению судят о совершенстве профиля роторов, не забывая о коэффициенте использования объема.

Таким образом, при выборе профиля ротора стремятся к снижению проводимости ЩК и к увеличению отсеченного объема, переносимого роторами, т. е. к повышению геометрической быстроты действия

$$S_r = 2\pi R^2 L n \chi.$$

Здесь  $R$  и  $L$  — радиус и длина ротора;  $n$  — частота вращения роторов;  $\chi$  — коэффициент использования рабочего объема,

$$\chi = 1 - f_p / \pi R^2,$$

где  $f_p$  — площадь поперечного сечения ротора.

**Расчет проводимости ЩК.** Обратные перетекания газа с выхода на вход в ДВН (см. рис. 1) происходят через параллельно включенные каналы: межроторный с зазором  $\delta_{p,p}$ ; первый и второй радиальные, расположенные между цилиндрическим корпусом и головкой соответственно ведущего ротора с зазором  $\delta_{p,k1}$  и ведомого с зазором  $\delta_{p,k2}$ ; торцевые с зазорами  $\delta_{t1}$ ,  $\delta_{t2}$ .

Суммарная проводимость ЩК определяется выражением [9, 10]

$$U_{\Sigma} = U_{p,k1} + U_{p,k2} + U_{p,p} + U_{t1} + U_{t2} + U_{вх} + U_{вых},$$

где  $U_{p,k1}$  и  $U_{p,k2}$  — проводимость первого и второго радиального ЩК;  $U_{p,p}$  — проводимость межроторного ЩК;  $U_{t1}$  и  $U_{t2}$  — проводимость

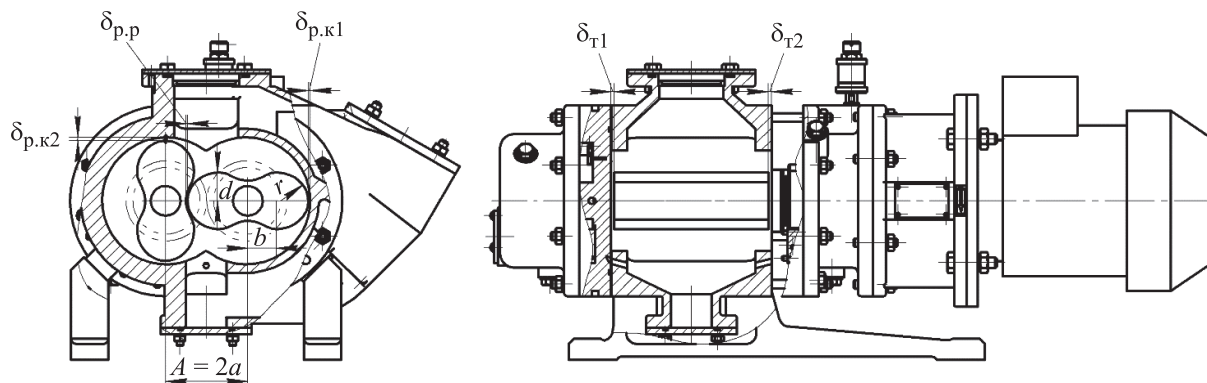


Рис. 1. Схема роторного механизма ДВН

первого и второго торцевого ЩК;  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  — проводимость входного и выходного тракта.

С точки зрения снижения перетеканий газа оптимальным для ДВН является молекулярный режим его течения в ЩК, так как проводимость ЩК минимальна.

Проводимость ЩК произвольной формы при молекулярном режиме течения газа определяется выражением [7, 9]

$$U = \frac{C}{4} L \delta K_3,$$

где  $C$  — среднеарифметическая скорость молекул газа;  $\delta$  — зазор между стенками ЩК;  $K_3$  — коэффициент проводимости ЩК или вероятность прохождения молекул через канал, который чаще всего определяют методом Монте-Карло или методом угловых коэффициентов (МУК).

**Методика проведения эксперимента.** Известно большое количество профилей роторов, различающихся формой кривых, образующих головку и сопряженную с ней ножку. Одним из вариантов является ротор с эллиптическим профилем на головке (рис. 2). Такой ротор [10]

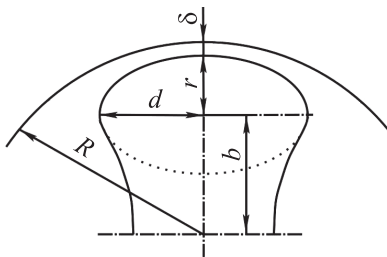


Рис. 2. Схема радиального канала с эллиптическим профилем на головке ротора

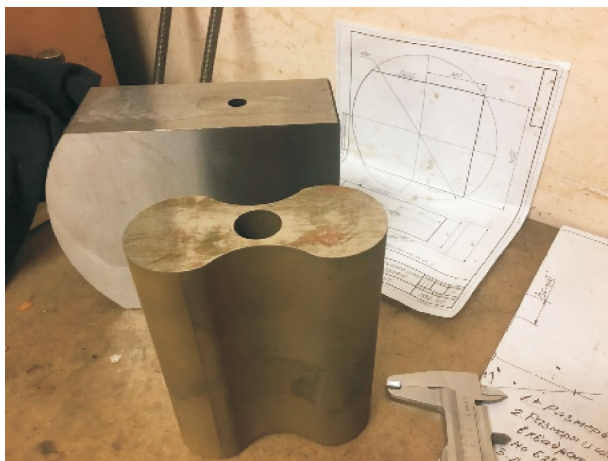


Рис. 3. Внешний вид роторов с эллиптическим профилем

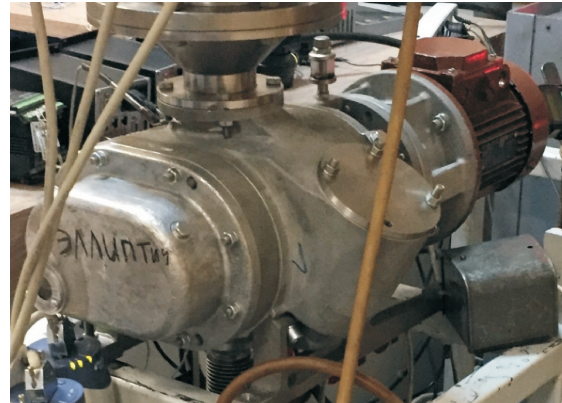


Рис. 4. Внешний вид опытного образца ДВН с роторами, имеющими эллиптический профиль

характеризуется четырьмя параметрами  $A$ ,  $b$ ,  $r$  и  $d$  (см. рис. 1), из которых три можно задать свободно, что обеспечивает очень широкие возможности выбора формы профиля.

В патенте [11] показано, что минимум обратных перетеканий газа через межроторный ЩК роторов с эллиптическим профилем достигается при следующих отношениях параметров  $b/a \approx 0,84 \dots 0,85$  и  $r/a = 0,610 \dots 0,617$ . В связи с этим исследование проводимости ЩК выполняли для ДВН, роторы которого имели указанный профиль.

По аналогии с работой [12] рассматривали проводимость ЩК двухроторного насоса, сохранив размеры роторной пары насоса НВД-200:  $A = 75$  мм и  $R = 60$  мм. Это позволило использовать при проведении натурного эксперимента основные кинематические узлы насоса НВД-200.

Внешний вид роторов с эллиптическим профилем показан на рис. 3, а опытный образец ДВН в сборке с такими роторами — на рис. 4.

Экспериментальные продувки опытного образца ДВН проводили на стенде, вакуумная схема которого для измерения откачных характеристик ДВН приведена на рис. 5. На входе и выходе стенда устанавливали вакуумные камеры с датчиками для измерения давления. Поток газа измеряли с помощью тепловых расходомеров и ротационного счетчика. Роторы фиксировали в определенном положении, соответствующем углу поворота  $\varphi = 0^\circ$ , как показано на рис. 1.

Проводимость ЩК роторного механизма ДВН определяли по формуле

$$U = \frac{Q}{(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})}, \quad (5)$$

где  $Q$  — поток воздуха, поступающего в вакуумную камеру CV1 через натекаТЕЛЬ;  $p_{\text{вх}}$  и

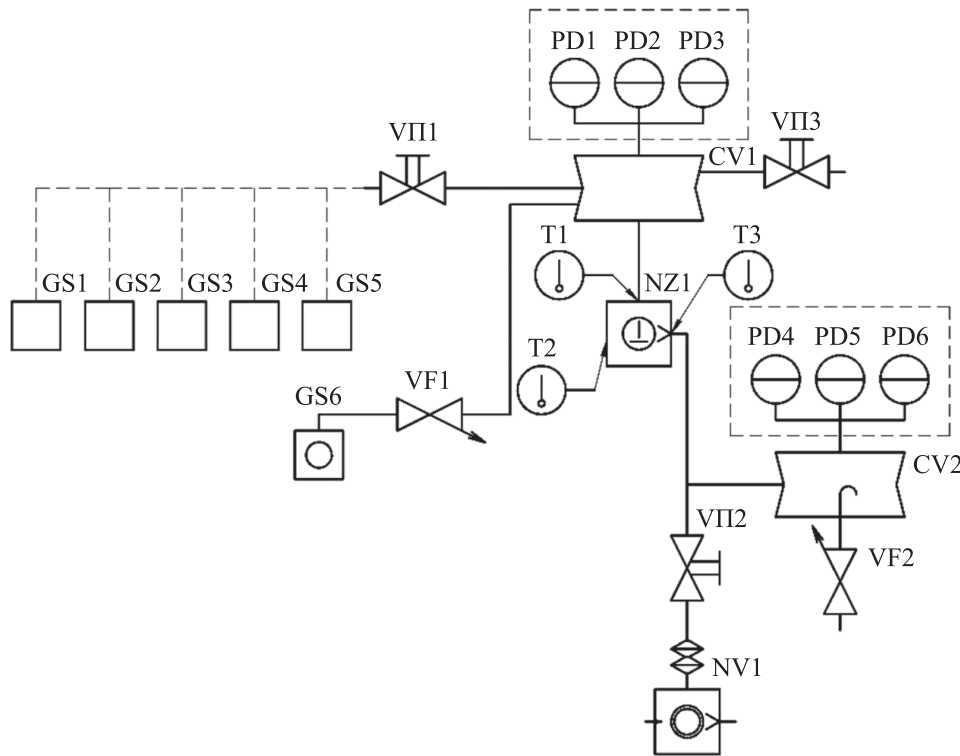


Рис. 5. Вакуумная схема стенда для измерения откачных характеристик ДВН: NZ1 — двухроторный вакуумный насос НВД-200 (с эвольвентными роторами); NV1 — спиральный вакуумный насос НВСп-35; CV1, CV2 — вакуумные камеры; VF1, VF2 — натекатели; VII1...VII3 — ручные клапаны; PD1...PD6 — мембранно-емкостные вакуумметры компании INFICON; GS1...GS5 — тепловые расходомеры компании Bronkhorst; GS6 — ротационный счетчик газа ЭМИС-РСГ

$p_{\text{вых}}$  — давление воздуха на входе в ДВН и на выходе из ДВН.

Типичные зависимости проводимости ЩК  $U$  роторного механизма от среднего давления  $p_{\text{ср}}$  воздуха на входе в ДВН и выходе из ДВН приведены на рис. 6.

Измерения охватывают молекулярный, переходный и вязкостный режимы течения газа в ЩК. Участки, на которых проводимость ЩК не изменяется, отвечают молекулярному режиму течения газа в каналах ДВН. Усреднение значений проводимости ЩК на этих участках позволяет получить для каждого угла поворота роторов суммарную проводимость роторного механизма ДВН при молекулярном режиме течения газа.

Экспериментальные значения суммарной проводимости ЩК для всех восьми положений роторов при молекулярном режиме течения газа приведены в таблице. Там же указаны измеренные с помощью щупов значения всех зазоров роторного механизма и экспериментальные значения суммарной проводимости.

Как следует из таблицы, межроторный зазор  $\delta_{\text{р.р}}$  в зависимости от угла поворота роторов  $\varphi$

изменяется от 0,13 до 0,24 мм, а радиальный зазор от 0,03 до 0,16 мм, что в первую очередь связано с погрешностью изготовления их профилей. Торцевые зазоры ЩК практически не зависят от угла поворота роторов: со стороны электродвигателя они составили 0,15 мм, со стороны шестерен — 0,10 мм.

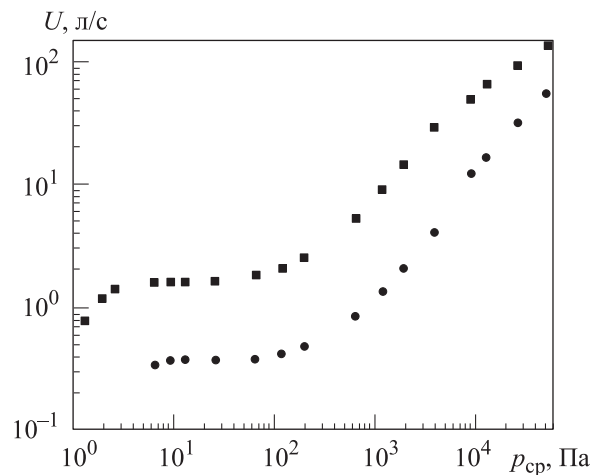


Рис. 6. Зависимости проводимости ЩК  $U$  роторного механизма от среднего давления воздуха  $p_{\text{ср}}$  при угле поворота роторов  $\varphi = 135$  (■) и  $0^\circ$  (●)

**Значения суммарной проводимости каналов ДВН типа Рутс,  
полученные экспериментальным и расчетным путем**

φ, град	δ <sub>р,р</sub>	δ <sub>р,к1</sub>	δ <sub>р,к2</sub>	U <sub>экс</sub>	U <sub>МУК</sub>	U <sub>м.з</sub>	U <sub>м.м.з</sub>	Δ <sub>U<sub>МУК</sub></sub>	Δ <sub>U<sub>м.з</sub></sub>	Δ <sub>U<sub>м.м.з</sub></sub>
	мм			л/с				%		
0	0,22	0,09	0,06	0,36	0,37	0,33	0,32	2,82	9,02	8,60
45	0,15	0,07	0,03	0,75	0,77	0,69	0,7	2,48	7,58	7,56
90	0,15	0,12	0,05	0,37	0,36	0,37	0,37	4,59	1,79	1,57
135	0,24	0,13	0,16	1,53	1,64	1,58	1,58	7,30	3,69	3,71
180	0,14	0,14	0,15	0,41	0,44	0,41	0,41	6,73	0,29	0,10
225	0,13	0,03	0,12	0,82	0,90	0,74	0,74	9,67	9,63	9,94
270	0,22	0,05	0,13	0,34	0,32	0,31	0,31	4,50	8,29	8,49
315	0,19	0,06	0,08	1,01	1,08	1,00	0,97	6,83	1,25	3,93
360	0,22	0,09	0,06	0,35	0,36	0,32	0,32	2,82	9,02	8,66

**Определение проводимости численным методом.** Для вычисления проводимости ЩК при молекулярном режиме течения газа все чаще применяют численные методы. Значения проводимости ЩК, полученные с помощью МУК в программном пакете COMSOL Multiphysics [13], обозначенные как  $U_{МУК}$ , также приведены в таблице. Расчет по МУК основан на определении угловых коэффициентов, используемых для определения теплообмена излучением.

Для расчета угловых коэффициентов на входной и выходной поверхностях стенок ЩК строилась сетка, состоящая из треугольных элементов (в трехмерной постановке), каждый из которых представлял собой элементарную площадку площадью  $dF$ . На эту площадку падал поток молекул со всех видимых из ее центра поверхностей, плотность которого зависела от закона отражения/испускания.

При расчете принято диффузное отражение молекул, нашедшее надежное подтверждение в ходе многолетних исследований. В этом случае вероятность попадания молекулы газа с поверхности  $i$  на поверхность  $j$  определяется выражением

$$\varphi_{F_j-F_i} = \frac{1}{F_j} \int_{F_j} dF_j \int_{F_i} \frac{\cos \psi_j \cos \psi_i}{\pi r^2} dF_i,$$

где  $F_j$  и  $F_i$  — площадь поверхности  $j$  и  $i$ ;  $\psi_j$  и  $\psi_i$  — угол между нормалью и линией, соединяющей центры элементарных площадок, на которые разбиты поверхности  $j$  и  $i$ ;  $r$  — расстояние между центрами площадок.

Интегрируя вероятность попадания молекул для всех элементарных площадок, можно опре-

делить итоговую вероятность прохождения молекулы от входной до выходной поверхности, которая и является коэффициентом проводимости.

Точность нахождения проводимости ЩК с помощью МУК зависит от качества разбиения поверхностей на элементарные площадки. Расчетная сетка показана на рис. 7. В местах с меньшей кривизной стенки для наиболее точного описания поверхности использовано сгущение сетки. Итоговая сетка имеет в среднем 42 428 элементов. Также на конечный результат влияет метод численного интегрирования. Наилучшую сходимость экспериментальных и расчетных результатов показал метод интегрирования Nemicube с разрешением 1024.

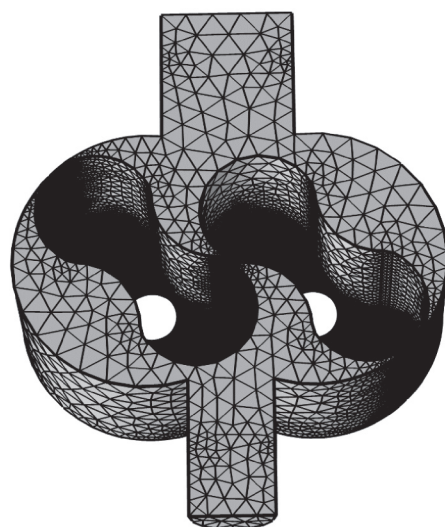


Рис. 7. Расчетная область с построенной сеткой

Отклонение суммарной проводимости ЩК, рассчитанной с помощью МУК, от экспериментального значения  $\Delta_{U_{\text{МУК}}} \leq 9,67\%$ , что находится в пределах погрешности эксперимента. Таким образом, можно считать, что геометрические параметры ДВН (в первую очередь зазоры) определены с достаточной точностью.

В математических моделях при расчете объемного расхода бесконтактных вакуумных насосов [14] практически всегда применяют метод последовательных приближений, поэтому значительно удобнее использовать аналитические выражения для определения проводимости ЩК, не прибегая к ее длительному численному пересчету на каждом шаге вычислений.

Метод расчета суммарной проводимости для ЩК, имеющих в некотором сечении минимальный зазор, предложен в работах [15, 16]. Он базируется на предположении, что сопротивление всего ЩК определяется участком в месте минимального зазора, и стенки можно заменить дугами окружности радиусами  $R$  и  $R$ . Тогда достаточно определить радиусы кривизны стенок ЩК и воспользоваться формулами, приведенными в работах [15, 16]. Найденные с помощью такого метода значения суммарной проводимости ЩК опытного ДВН с эллиптическим профилем также приведены в таблице и обозначены как  $U_{\text{м.з}}$ . Там же указаны их откло-

нения от экспериментальной проводимости ЩК  $\Delta_{U_{\text{м.з}}}$ .

Однако кривизны стенок на входе в ДВН и на выходе из ДВН могут существенно различаться. Для этого случая в работах [15, 16] предложен модифицированный метод, позволяющий отдельно учесть кривизну стенки ЩК на входе в ДВН и на выходе из ДВН, повысив тем самым точность вычислений. Значения суммарной проводимости ЩК, вычисленные с помощью модифицированного метода,  $U_{\text{м.м.з}}$  также приведены в таблице. Там же указаны их отклонения от экспериментальной проводимости ЩК  $\Delta_{U_{\text{м.м.з}}}$ .

Расхождение результатов расчета проводимости ЩК по методам, предложенным в работах [15, 16], с экспериментальными данными составляет не более 9,94 %.

## Выводы

1. Применение МУК для определения проводимости ЩК насоса типа Рутс показало хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных, однако вычисления занимают много времени.

2. На основании полученных результатов можно рекомендовать МУК для использования в математических моделях рабочих процессов бесконтактных насосов.

## Литература

- [1] Хаблянян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. *Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация*. Ч. 2. Вакуумные насосы. Казань, Изд-во КНИТУ, 2016. 300 с.
- [2] Hoffman D.M., Singh B., Thomas J.H., eds. *Handbook of vacuum science and technology*. Academic Press, 1998. 835 p.
- [3] In S.R., Kang S.P. Analysis of pumping characteristics of a multistage roots pump. *Sci. Converg. Technol.*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 9–15, doi: <https://doi.org/10.5757/ASCT.2015.24.1.9>
- [4] Zhou S., Jia X., Yan H. et al. A novel profile with high efficiency for hydrogen-circulating Roots pumps used in FCVs. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2021, vol. 46, no. 42, pp. 22122–22133, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.038>
- [5] Wu Y.R., Trana V.T. Generation method for a novel Roots rotor profile to improve performance of dry multi-stage vacuum pumps. *Mech. Mach. Theory*, 2018, vol. 128, pp. 475–491, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.06.009>
- [6] Бурмистров А.В., Саликеев С.И. *Бесконтактные вакуумные насосы*. Казань, КГТУ, 2010. 101 с.
- [7] Бурмистров А.В. *Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов*. Дисс. ... док. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 363 с.
- [8] Райков А.А., Бронштейн М.Д., Бурмистров А.В. и др. Влияние скорости орбитального движения спирали на перетекания в спиральном вакуумном насосе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 4, с. 73–82.
- [9] Кузнецов В.И. Объемный КПД двухроторных вакуумных насосов. В: *Физика и техника вакуума*. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 1974, с. 177–185.

- [10] Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс. *Компрессорная техника и пневматика*, 2004, № 6, с. 38–40.
- [11] Исаев А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. и др. Двухроторная машина. Патент РФ 2730769. Заявл. 19.02.2020, опублик. 25.08.2020.
- [12] Исаев А.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. и др. Проводимость каналов роторного механизма двухроторного вакуумного насоса типа Рутс при молекулярном режиме течения газа. *Наноиндустрия*, 2022, т. 15, № 1, с. 58–63, doi: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.58.63>
- [13] COMSOL *Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University*. C/n 9601045.
- [14] Raykov A., Salikeev S., Burmistrov A. et al. The working process of an oil-free claw vacuum pump. A mathematical model for analysis of the pumping characteristics. *Vak. Forsch. Prax.*, 2017, vol. 29, no. 2, pp. 45–49, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201700643>
- [15] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M. et al. Non-contact vacuum pumps. A general-purpose method for conductance calculation of profile slot channels. *Vak. Forsch. Prax.*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 40–44, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201400542>
- [16] Burmistrov A., Salikeev S., Bronshtein M. et al. Conductance calculation of slot channels with variable cross section. From molecular to viscous flow regime. *Vak. Forsch. Prax.*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 36–40, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201500571>

## References

- [1] Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. *Vakuumnaya tekhnika. Oborudovanie, proektirovanie, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 2. Vakuumnnye nasosy* [Vacuum technique. Equipment, technology, exploitation. P. 2. Vacuum pumps]. Kazan, Izd-vo KNITU Publ., 2016. 300 p. (In Russ.).
- [2] Hoffman D.M., Singh B., Thomas J.H., eds. *Handbook of vacuum science and technology*. Academic Press, 1998. 835 p.
- [3] In S.R., Kang S.P. Analysis of pumping characteristics of a multistage roots pump. *Sci. Converg. Technol.*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 9–15, doi: <https://doi.org/10.5757/ASCT.2015.24.1.9>
- [4] Zhou S., Jia X., Yan H. et al. A novel profile with high efficiency for hydrogen-circulating Roots pumps used in FCVs. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2021, vol. 46, no. 42, pp. 22122–22133, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.038>
- [5] Wu Y.R., Trana V.T. Generation method for a novel Roots rotor profile to improve performance of dry multi-stage vacuum pumps. *Mech. Mach. Theory*, 2018, vol. 128, pp. 475–491, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.06.009>
- [6] Burmistrov A.V., Salikeev S.I. *Beskontaktnye vakuumnyye nasosy* [Non-contact vacuum pumps]. Kazan, KGTU Publ., 2010. 101 p. (In Russ.).
- [7] Burmistrov A.V. *Sozdanie i issledovanie beskontaktnykh vakuumnykh nasosov*. Diss. ... dok. tekhn. nauk [Development and study on a noncontact vacuum pump. Doc. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 363 p. (In Russ.).
- [8] Raykov A.A., Bronshteyn M.D., Burmistrov A.V. et al. Effect of the orbital movement speed of a scroll on leakage in a scroll vacuum pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2014, no. 4, pp. 73–82. (In Russ.).
- [9] Kuznetsov V.I. Obemnyy KPD dvukhrotornykh vakuumnykh nasosov [Volume efficiency of bi-rotor vacuum pumps]. V: *Fizika i tekhnika vakuuma* [In: Physics and technique of vacuum]. Kazan, Izd-vo Kazanskogo un-ta Publ., 1974, pp. 177–185. (In Russ.).
- [10] Burmistrov A.V., Karablinov D.G., Bronshteyn M.D. Influence of geometrical parameters of the elliptical profile on the characteristics of two-rotor Roots-type vacuum pumps. *Компрессорная техника и пневматика* [Compressors & Pneumatics], 2004, no. 6, pp. 38–40. (In Russ.).
- [11] Isaev A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V. et al. *Dvukhrotornaya mashina* [Double rotor machine]. Patent RU 2730769. Appl. 19.02.2020, publ. 25.08.2020. (In Russ.).
- [12] Isaev A.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. et al. Conductivity of the roots type double rotor vacuum pump channels in the molecular gas flow mode. *Nanoindustriya* [Nanoindustry],

2022, vol. 15, no. 1, pp. 58–63, doi: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.1.58.63> (in Russ.).

- [13] COMSOL *Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University*. C/n 9601045.
- [14] Raykov A., Salikeev S., Burmistrov A. et al. The working process of an oil-free claw vacuum pump. A mathematical model for analysis of the pumping characteristics. *Vak. Forsch. Prax.*, 2017, vol. 29, no. 2, pp. 45–49, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201700643>
- [15] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M. et al. Non-contact vacuum pumps. A general-purpose method for conductance calculation of profile slot channels. *Vak. Forsch. Prax.*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 40–44, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201400542>
- [16] Burmistrov A., Salikeev S., Bronshtein M. et al. Conductance calculation of slot channels with variable cross section. From molecular to viscous flow regime. *Vak. Forsch. Prax.*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 36–40, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201500571>

Статья поступила в редакцию 27.10.2022

## Информация об авторах

**ИСАЕВ Александр Анатольевич** — аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: [isaevaa050391@yandex.ru](mailto:isaevaa050391@yandex.ru)).

**РАЙКОВ Алексей Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: [alraykov@kstu.ru](mailto:alraykov@kstu.ru)).

**БУРМИСТРОВ Алексей Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: [burm@kstu.ru](mailto:burm@kstu.ru)).

**САЛИКЕЕВ Сергей Иванович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: [salikeev\\_s@mail.ru](mailto:salikeev_s@mail.ru)).

## Information about the authors

**ISAEV Alexandr Anatolevich** — Postgraduate, Department of Vacuum Equipment for Electro-Physical Installations. Kazan National Research Technological University (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 68, e-mail: [isaevaa050391@yandex.ru](mailto:isaevaa050391@yandex.ru)).

**RAYKOV Alexey Alexandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum Equipment for Electro-Physical Installations. Kazan National Research Technological University (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 68, e-mail: [alraykov@kstu.ru](mailto:alraykov@kstu.ru)).

**BURMISTROV Alexey Vasilevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Vacuum Equipment for Electro-Physical Installations. Kazan National Research Technological University (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 68, e-mail: [burm@kstu.ru](mailto:burm@kstu.ru)).

**SALIKEEV Sergey Ivanovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum Equipment for Electro-Physical Installations. Kazan National Research Technological University (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 68, e-mail: [salikeev\\_s@mail.ru](mailto:salikeev_s@mail.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исаев А.А., Райков А.А., Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Исследование перетеканий в двухроторном вакуумном насосе типа Рутс с эллиптическим профилем роторов при молекулярном режиме течения газа. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 4, с. 38–45, doi: [10.18698/0536-1044-2023-4-38-45](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-4-38-45)

### Please cite this article in English as:

Isaev A.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V., Salikeev S.I. Study of the backward flow in Roots-type vacuum pump with elliptical rotor profile in the gas flow molecular regime. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 4, pp. 38–45, doi: [10.18698/0536-1044-2023-4-38-45](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-4-38-45)