

УДК 621.521

# Повышение эффективности двухроторной машины внешнего сжатия с трехлопастным профилем роторов

**И.А. Малин, А.А. Райков, А.В. Бурмистров**

Казанский национальный исследовательский технологический университет

## Increasing efficiency of a two-rotor external compression machine with the three-blade rotor profile

**I.A. Malin, A.A. Raykov, A.V. Burmistrov**

Kazan National Research Technological University

Двухроторные вакуумные насосы типа Рутс широко применяют для получения среднего вакуума. Чтобы снизить остаточное давление и уменьшить пульсации газа на выходе, увеличивают количество лопастей в роторах таких насосов. Рассмотрены профили роторов, образованные различными кривыми, а также с разным числом лопастей. Описана методика построения трехлопастного профиля с эллиптической головкой ротора. Исследована возможность построения профиля при различных значениях отношения радиуса расточки корпуса к межосевому расстоянию. Проведены расчеты коэффициента проводимости межроторного канала и коэффициента использования рабочего объема при различных соотношениях полуосей эллипса, радиуса расточки корпуса и межосевого расстояния для эллиптического и эвольвентного двух- и трехлопастных профилей. Полученный профиль обеспечивает лучшие откачные характеристики и, соответственно, более высокую эффективность, чем двух- и трехлопастной эвольвентные профили.

EDN: KUJZWI, <https://elibrary/kujzwi>**Ключевые слова:** двухроторный вакуумный насос, средний вакуум, проводимость каналов, быстрота действия, обратные перетекания, трехлопастной профиль

The Roots-type two-rotor vacuum pumps are widely used to obtain the oil-free medium vacuum. The number of blades in rotors of such pumps is being increased to reduce residual pressure and the exhaust gas pulsations. The paper considers rotor profiles formed by various curves, as well as with a different number of blades. It describes a technique in constructing a three-blade profile with the elliptical rotor head. The paper investigates a possibility in constructing a profile with different values of the casing bore radius ratio to the interaxial distance. Interrotor channel conductivity and volume utilization coefficients are computed for different ratios of the ellipse semi-axes, casing bore radius and interaxial distance for elliptical and involute two- and three-blade profiles. The resulting profile provides better pumping characteristics and, accordingly, higher efficiency compared to the two-blade and three-blade involute profiles.

EDN: KUJZWI, <https://elibrary/kujzwi>**Keywords:** roots vacuum pump, medium vacuum, slot conductivity, pumping speed, back-flow, three-lobe profile

Двухроторные вакуумные насосы внешнего сжатия типа Рутс (далее НВД) широко применяются для достижения низкого и среднего вакуума [1, 2]. Главным достоинством насосов такого типа является высокая быстрота действия. Однако отсутствие внутреннего сжатия приводит к большим затратам мощности, а наличие гарантированных зазоров (как и у всех бесконтактных насосов) — к значительным обратным перетеканиям газа в роторном механизме.

Существует большое количество классических форм профилей роторов: окружной, эвольвентный, эллиптический, с удлиненной эпициклоидой и гипоциклоидой [3–6]. Помимо различия в кривых для построения профилей используют разные формы роторов — циклоидально-окружной [7] и параболический окружной [8]. Самым распространенным профилем роторов является двухлопастной эвольвентный профиль.

В России НВД производятся только с двухлопастным окружным профилем. Стремление снизить обратные перетекания и пульсации газа на выходе привело к появлению трех- и четырехлопастных профилей. Некоторые варианты таких профилей исследованы в работах [9, 10].

Рассмотрим трехлопастной профиль ротора с эллиптической головкой. Такой тип роторов позволяет варьировать полноту профиля в широком диапазоне, вследствие чего можно создать НВД, сочетающий высокую быстроту действия с низкими обратными перетеканиями газа [11]. Кроме того, как показано в работе [12], использование в одном многоступенчатом агрегате роторов с профилем различной формы позволяет улучшить его откачные характеристики.

Цель работы — исследование влияния формы роторов двухроторного насоса на его откачные характеристики.

**Методика построения профилей роторов.** Конструктивная схема НВД с трехлопастным профилем роторов приведена на рис. 1. Основу профиля составляет выпуклый участок эллипса ABC, описываемый в системе координат XOY с центром в точке O, системой уравнений

$$\begin{cases} x = b + r \cos s; \\ y = d \sin s, \end{cases} \quad (1)$$

где  $b$  — расстояние от центра эллипса до оси ротора,  $b = R - r$  ( $R$  — радиус расточки корпу-

са;  $r$  — меньшая полуось эллипса);  $s$  — параметр профиля;  $d$  — большая полуось эллипса.

Получение сопряженного профиля вогнутого участка CDE происходит перестроением уравнений (1), заданных в системе подвижных координат одного ротора, в таковую другого ротора с помощью следующих уравнений связи координат:

$$x_1 = A \cos \alpha - \cos 2\alpha x - \sin 2\alpha y;$$

$$y_1 = A \sin \alpha + \cos 2\alpha y - \sin 2\alpha x,$$

где  $A$  — межроторное расстояние;

$$\alpha = \gamma - \arccos \frac{dR_s}{AtV}.$$

В этом выражении:

$$\gamma = \arcsin \frac{A \cos s \sin \frac{\pi}{2nh}}{\sqrt{A^2 \cos^2 s \sin^2 \frac{\pi}{2nh} + \Phi \sin^2 s}};$$

$$dR_s = -r(2b \sin s + r \sin 2s) + \frac{A^2 r^2 \sin^2 \frac{\pi}{2nh} \sin 2s}{\Phi};$$

$$tV = r \sqrt{\frac{A^2 \sin^2 \frac{\pi}{2nh} \cos s}{\Phi} + \sin^2 s},$$

где  $nh$  — число лопастей ротора;

$$\Phi = -4b^2 + 4r^2 + 4Ab \cos \frac{\pi}{2nh} - A^2 \cos^2 \frac{\pi}{2nh}.$$

Качество профиля НВД зависит от коэффициента использования рабочего объема  $\chi$  и ко-

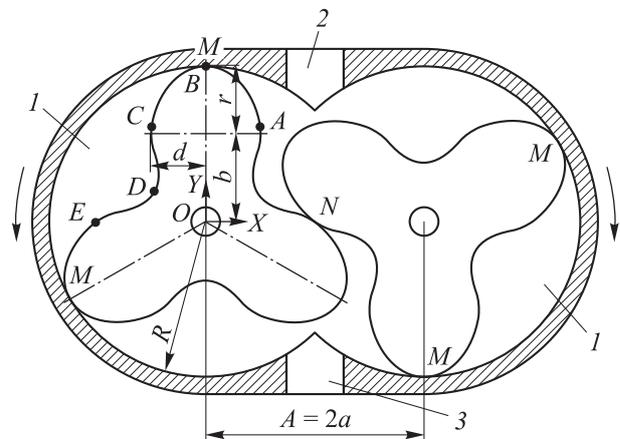


Рис. 1. Конструктивная схема НВД с трехлопастным эллиптическим профилем роторов:

- 1 — отсеченный объем;
- 2 и 3 — входной и выходной тракты;
- N — межроторный зазор; M — зазор ротор — корпус

эфициента проводимости каналов роторного механизма  $K_z$ .

На геометрическую быстроту действия влияет коэффициент использования рабочего объема: чем выше  $\chi$ , тем больше быстрота действия НВД при тех же габаритных размерах.

Быстрота действия и предельное остаточное давление газа ДВН определяются обратными перетеканиями газа [13], причем наибольший вклад в обратные перетекания вносит межроторный зазор. Значения межроторных перетеканий газа при молекулярном режиме зависят от вероятности прохождения молекул через зазор (коэффициента проводимости каналов роторного механизма  $K_z$ ) [14].

Задача подбора оптимальной формы роторов сводится к поиску такого соотношения геометрических параметров, которое обеспечивает максимальный коэффициент использования рабочего объема при наименьшем коэффициенте проводимости каналов.

**Результаты и их обсуждение.** Наибольшее влияние на коэффициент использования рабочего объема оказывает отношение радиуса расточки корпуса к межроторному расстоянию  $R/A$ . В качестве прототипа выбран насос НВД-200, серийно выпускаемый АО «Вакууммаш», с межроторным расстоянием  $A = 75$  мм и отношением  $R/A = 0,8$ . При выборе наилучшего

профиля роторов радиус расточки корпуса варьировали в диапазоне 50...58 мм, (т. е.  $R/A = 0,666...0,773$ ).

Схемы вариантов профиля роторов при отношении радиуса расточки корпуса к межроторному расстоянию  $R/A = 0,67; 0,72; 0,75$  и  $0,77$  приведены на рис. 2. Видно, что увеличение радиуса расточки корпуса приводит к снижению полноты профиля. Причем при  $R/A > 0,77$  происходит самопересечение профиля, то есть при таком размере корпуса изготовление роторов невозможно.

Коэффициент использования рабочего объема рассчитывали по формуле

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

где  $f_p$  — площадь поперечного сечения ротора.

Полученная с помощью этой формулы зависимость коэффициента использования рабочего объема от отношения радиуса расточки корпуса к межроторному расстоянию  $R/A$  при отношении  $b/a = 0,85$  приведена на рис. 3. Видно, что эта зависимость имеет практически линейный характер: чем больше радиус расточки корпуса, тем выше коэффициент использования рабочего объема.

Также на рис. 3 показана зависимость коэффициента проводимости межроторного канала от отношения  $R/A$ , рассчитанная по методике, приведенной в работах [15, 16].

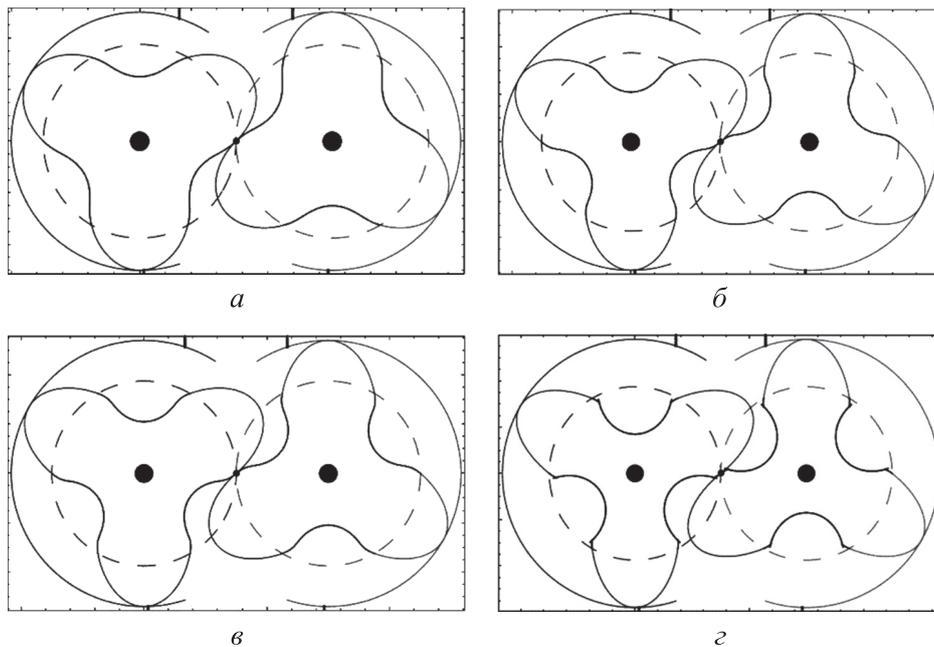


Рис. 2. Схемы вариантов профилей роторов при отношении радиуса расточки корпуса к межроторному расстоянию  $R/A = 0,67$  (а),  $0,72$  (б),  $0,75$  (в) и  $0,77$  (г)

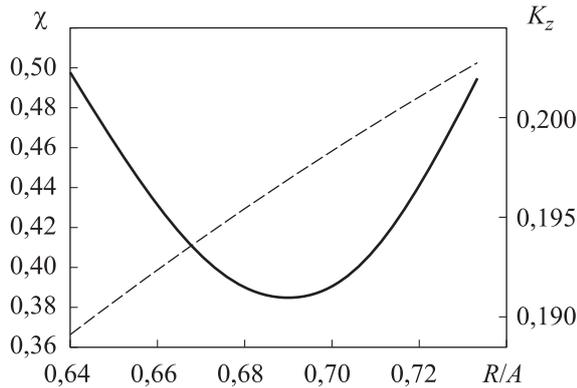


Рис. 3. Зависимости коэффициента использования рабочего объема  $\chi$  (---) и коэффициента проводимости межроторного канала  $K_z$  (—) от отношения радиуса расточки корпуса к межроторному расстоянию  $R/A$  при отношении  $b/a = 0,85$

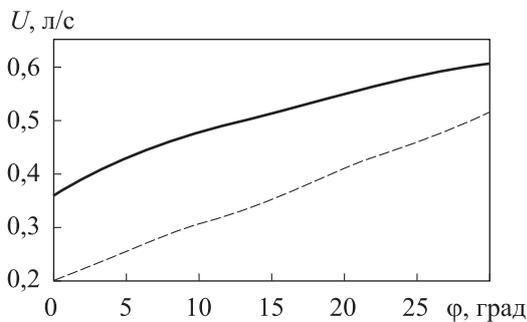


Рис. 4. Зависимости проводимости каналов  $U$  от угла поворота двух- (—) и трехлопастного (---) роторов

Общую проводимость роторного механизма можно рассчитать методом угловых коэффициентов в пакете COMSOL Multiphysics [17]. Так как для НВД с трехлопастным эллиптическим профилем роторов зависимость проводимости каналов  $U$  от угла поворота ротора  $\varphi$  носит периодический характер с периодом  $30^\circ$ , вероятности прохождения и проводимости каналов рассчитывали в диапазоне  $\varphi = 0 \dots 30^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Результаты расчета приведены на рис. 4.

Как видно из графика, у трехлопастного профиля проводимость на 40 % меньше, чем у двухлопастного. Следовательно, вакуумный насос с трехлопастным профилем роторов достигнет меньшего остаточного давления вследствие снижения обратных перетеканий газа.

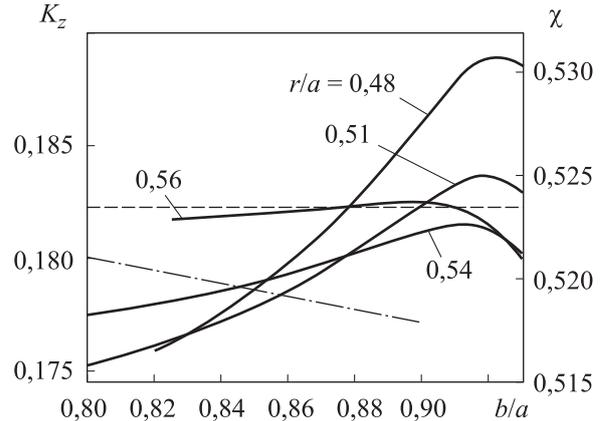


Рис. 5. Зависимости коэффициента использования рабочего объема  $\chi$  (---) и коэффициента проводимости межроторного канала  $K_z$  (—) от отношения  $b/a$  при различных значениях отношения полуосей эллипса  $r/a$

В аналогичном корпусе также можно построить распространенный профиль, образованный дугой окружности и эвольвентой, описанный в патенте [17]. Результаты сравнения коэффициентов проводимости межроторного канала для эвольвентного и эллиптического профилей приведены на рис. 5.

Штриховой линией обозначен минимальный коэффициент проводимости межроторного канала для эвольвентного профиля роторов. При  $r/a > 0,56$  и  $b/a > 0,88$  у эллиптического профиля перетекания газа больше, чем у эвольвентного, однако эллиптический профиль обеспечивает больший коэффициент использования рабочего объема. При  $r/a < 0,48$  применение эллиптического профиля является нецелесообразным вследствие малого рабочего объема, а при  $b/a < 0,80$  — его невозможно построить.

## Вывод

Установлено, что в исследованных диапазонах отношений геометрических параметров  $r/a$  и  $b/a$  у НВД с трехлопастным эллиптическим профилем ротора откачные характеристики лучше, а эффективность выше, чем у НВД с двух- и трехлопастным эвольвентными профилями.

## Литература

- [1] Хаблянян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. *Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация*. Ч. 1. Инженерно-физические основы. Казань, Изд-во КНИТУ, 2013. 232 с.
- [2] Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. *Вакуумная техника*. Москва, Машиностроение, 2009. 590 с.
- [3] Tran-The V., Do-Anh T. A tooth profile design for roots rotors of vacuum pump. In: ACOME-2017. *Springer*, 2018, pp. 1003–1016, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2\\_70](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_70)
- [4] Vecchiato D., Demenego A., Argyris J. et al. Geometry of a cycloidal pump. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2001, vol. 190, no. 18–19, pp. 2309–2330, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00236-X)
- [5] Hsieh C.-F., Hwang Y.-W. Study on the high-sealing of roots rotor with variable trochoid ratio. *J. Mech. Des.*, 2007, vol. 129, no. 12, pp. 1278–1284, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2779897>
- [6] Wang S., Li H., Zhao Y. et al. The improvement study of involutes profile type rotor profile in Roots vacuum pump. *Int. Conf. on New Technology of Agricultural*, 2011, pp. 251–253, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAE.2011.5943796>
- [7] Li Z., Wang X. New cycloid rotor profiles design under different rolling circle radii for Roots vacuum pumps. *SN Appl. Sci.*, 2022, vol. 4, no. 10, art. 280, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05174-x>
- [8] Li Z., Yang S., Wang X. et al. Analysis and construction of a parabolic rotor profile for Roots vacuum pumps. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1952, art. 042108, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/4/042108>
- [9] Tran N.-T., Nguyen D.-M. Analysis of flow characteristics of cylindrical and helical type multi-lobe roots blower. *Eureka: PE*, 2023, no. 1, pp. 67–75, doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002578>
- [10] 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>
- [11] Wang J., Liu R., Yang S. et al. Geometric study and simulation of an elliptical rotor profile for Roots vacuum pumps. *Vacuum*, 2018, vol. 153, pp. 168–175, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.014>
- [12] Wu Y.-R., Tran 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>
- [13] 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.
- [14] Бурмистров А.В., Саликеев С.И., Бронштейн М.Д. *Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах*. Казань, Изд-во КГТУ, 2009. 231 с.
- [15] Бурмистров А.В. *Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов*. Дисс. ... док. тех. наук. Казань, КГТУ, 2006. 451 с.
- [16] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M. et al. Non-contact vacuum pumps. A general purpose method for conductance calculation of profile slot channels. *Vak. Forschung und Prax.*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 40–44, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201400542>
- [17] Hirano T., Yamada K., Fujii T. *Roots type fluid machine*. Патент US 7320579. Заявл. 08.12.2006, опубл. 22.01.2008.

## References

- [1] Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. *Vakuumnaya tekhnika. Oborudovanie, proektirovanie, tekhnologii, ekspluatatsiya*. Ch. 1. Inzhenerno-fizicheskie osnovy [Vacuum technology. Equipment, design, technology, operation. Vol. 1. Engineering-physical bases]. Kazan, Izd-vo KNITU Publ., 2013. 232 p. (In Russ.).

- [2] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., Nikulin N.K. *Vakuumnaya tekhnika* [Vacuum technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 590 p. (In Russ.).
- [3] Tran-The V., Do-Anh T. A tooth profile design for roots rotors of vacuum pump. In: ACOME-2017. Springer, 2018, pp. 1003–1016, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2\\_70](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_70)
- [4] Vecchiato D., Demenego A., Argyris J. et al. Geometry of a cycloidal pump. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 2001, vol. 190, no. 18–19, pp. 2309–2330, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00236-X)
- [5] Hsieh C.-F., Hwang Y.-W. Study on the high-sealing of roots rotor with variable trochoid ratio. *J. Mech. Des.*, 2007, vol. 129, no. 12, pp. 1278–1284, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2779897>
- [6] Wang S., Li H., Zhao Y. at al. The improvement study of involutes profile type rotor profile in Roots vacuum pump. *Int. Conf. on New Technology of Agricultural*, 2011, pp. 251–253, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAE.2011.5943796>
- [7] Li Z., Wang X. New cycloid rotor profiles design under different rolling circle radii for Roots vacuum pumps. *SN Appl. Sci.*, 2022, vol. 4, no. 10, art. 280, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05174-x>
- [8] Li Z., Yang S., Wang X. at al. Analysis and construction of a parabolic rotor profile for Roots vacuum pumps. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1952, art. 042108, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/4/042108>
- [9] Tran N.-T., Nguyen D.-M. Analysis of flow characteristics of cylindrical and helical type multi-lobe roots blower. *Eureka: PE*, 2023, no. 1, pp. 67–75, doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002578>
- [10] Zhou S., Jia X., Yan H. at 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>
- [11] Wang J., Liu R., Yang S. at al. Geometric study and simulation of an elliptical rotor profile for Roots vacuum pumps. *Vacuum*, 2018, vol. 153, pp. 168–175, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.014>
- [12] Wu Y.-R., Tran 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>
- [13] Burmistrov A.V., Karablinov D.G., Bronshteyn M.D. Effect of geometrical parameters of elliptical profile on characteristics of twin-rotor vacuum pumps of Roots type. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2004, no. 6, pp. 38–40. (In Russ.).
- [14] Burmistrov A.V., Salikeev S.I., Bronshteyn M.D. *Pryamye i obratnye potoki v beskontaktnykh vakuurnykh nasosakh* [Direct and reverse flows in non-contact vacuum pumps]. Kazan, Izd-vo KGTU Publ., 2009. 231 p. (In Russ.).
- [15] Burmistrov A.V. *Sozdanie i issledovanie beskontaktnykh vakuurnykh nasosov*. Diss. dok. tekhn. nauk [Design and study on non-contact vacuum pumps. Doc. tech. sci. diss.]. Kazan, KGTU Publ., 2006. 451 p. (In Russ.).
- [16] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M. et al. Non-contact vacuum pumps. A general purpose method for conductance calculation of profile slot channels. *Vak. Forschung und Prax.*, 2014, vol. 26, no. 1, pp. 40–44, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201400542>
- [17] Hirano T., Yamada K., Fujii T. *Roots type fluid machine*. Patent US 7320579. Appl. 08.12.2006, publ. 22.01.2008.

Статья поступила в редакцию 30.01.2024

## Информация об авторах

**МАЛИН Илья Александрович** — аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: hoyki550@gmail.com).

**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).

**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).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Малин И.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. Повышение эффективности двухроторной машины внешнего сжатия с трехлопастным профилем роторов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 11, с. 72–78.

### Please cite this article in English as:

Malin I.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. Increasing efficiency of a two-rotor external compression machine with the three-blade rotor profile. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 11, pp. 72–78.

## Information about the authors

**MALIN Ilya Alexandrovich** — Postgraduate, Department of Vacuum Engineering. Kazan National Research Technological University (420015, Kazan, Russian Federation, Karl Marx St., Bldg. 68, e-mail: hoyki550@gmail.com).

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

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



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие**

**«Проектирование непрерывных технологических процессов»**

**Авторы: В.В. Стулов, А.Г. Колесников**

Приведен состав оборудования машины непрерывного литья заготовок и литейно-прокатного агрегата, рассмотрено моделирование затвердевания непрерывнолитой заготовки и моделирование охлаждения кристаллизатора, описаны печи для выплавки стали и для ее обработки, а также основное и вспомогательное оборудование.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень магистратуры). Может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании, а также при выполнении домашних заданий.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>