

УДК 621.521

Сравнение эффективности многолопастных роторов вакуумных насосов внешнего сжатия

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

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Comparing efficiency of the multi-lobe external compression pump rotors

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

Kazan National Research Technological University

Рассмотрены двухроторные вакуумные насосы с роторами, имеющими разное число лопастей. Для двух-, трех- и четырехлопастных роторов с эллиптическим профилем рассчитаны коэффициенты использования объема и проводимости каналов роторного механизма. Определены параметры профилей, обеспечивающие наилучшее сочетание этих коэффициентов. Установлено, что в четырехлопастном профиле ротора перетекание газа меньше, чем в двух- и трехлопастных, но из-за меньшего радиуса расточки корпуса при одинаковом межцентровом расстоянии он имеет наихудший коэффициент использования объема. Наибольшую эффективность по скорости действия и максимальной степени повышения давления показал насос с трехлопастным профилем ротора.

EDN: NSXYOQ, <https://elibrary/nsxyoq>

Ключевые слова: двухроторный вакуумный насос, многолопастной ротор, коэффициент использования объема, коэффициент проводимости каналов, быстрота действия, обратные перетекания

The paper considers two-rotor vacuum pumps with rotors having different number of lobes. Coefficients of utilizing the working volume and the rotor mechanism channels conductivity are computed for the two-, three- and four-lobe rotors with an elliptical profile. The paper determines the profile parameters that provide best combination of these coefficients. Comparison of the obtained results shows that the four-lobe rotor profile provides less overflows than the two- and three-lobe profiles. However, due to a smaller radius of the casing bore with the same intercenter distance, it has the worst coefficient of volume utilization. The pump with the three-lobe rotor profile demonstrates the highest efficiency in terms of speed of action and maximum degree of the increase in pressure.

EDN: NSXYOQ, <https://elibrary/nsxyoq>

Keywords: two-rotor vacuum pump, multi-lobe rotor, volume utilization coefficient, channel conductivity coefficient, speed of action, backflows

Машины внешнего сжатия типа Рутс (рис. 1) получили широкое распространение в качестве воздуходувок и вакуумных насосов. Благодаря главному достоинству таких машин — высокой производительности — их используют как пневмотранспорт в сельском хозяйстве, а также

в других сферах для транспортирования текстильных материалов, древесины, стружки или абразивной пыли [1, 2]. Воздуходувки применяют также при водоочистке и аэрации бассейнов и водоемов, в пищевой и фармацевтической промышленности [3].

Чаще всего машины Рутса используют в качестве насосов вакуумных двухроторных (НВД) [4–6], причем долгие годы их предназначением являлось повышение быстроты откачки и снижение предельного остаточного давления. При этом НВД агрегатировались различными насосами предварительного разрежения.

Однако в последние годы с целью более полной реализации основного достоинства НВД — безмасляности — появились многоступенчатые агрегаты, состоящие из нескольких последовательно соединенных ступеней типа Рутс [7]. Благодаря этому они работают в разных условиях: последние ступени — в сплошной среде, а первая — практически при молекулярном режиме в щелевых каналах. Здесь очень актуальной является задача правильного выбора профиля и числа лопастей у роторов разных ступеней. Следует учитывать, что основное назначение первой ступени — обеспечение высокой быстроты действия, а последующих — высокой степени понижения давления.

В подавляющем большинстве случаев, особенно при использовании машины Рутса для получения вакуума, используются роторы с двумя лопастями, реже — с тремя или четырьмя [8, 9].

В работе [10] приведены результаты исследования эвольвентного профиля с разным числом зубьев, где главной задачей являлся поиск оптимального профиля для обеспечения наибольшего коэффициента использования объема и наименьшего коэффициента проводимости каналов роторного механизма. Анализ полученных результатов показал, что увеличение числа лопастей приводит к снижению эффективности использования объема, но при этом уменьшается и коэффициент проводимо-

сти. Ожидаемые цели — более высокий коэффициент использования объема и более низкий коэффициент проводимости каналов — противоречат друг другу.

Цель работы — исследование влияния числа лопастей эллиптического профиля роторов НВД типа Рутс на его откачные характеристики.

Описание объекта исследования. Проведем сравнительное исследование характеристик ступеней для роторов с эллипсом на вершине (см. рис. 1), так как данный профиль позволяет задавать три из четырех параметров профиля A , b , r и d , что обеспечивает очень широкие возможности по варьированию формы сопряженных профилей [11].

Параметрические уравнения эллипса на вершине ротора имеют вид

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

где b — расстояние от центра эллипса до оси ротора, $b = R - r$ (R — радиус расточки корпуса; r — меньшая полуось эллипса); s — параметр профиля; d — большая полуось эллипса.

Получение сопряженного профиля происходит перестроением уравнений (1), заданных в системе подвижных координат одного ротора, в систему подвижных координат другого ротора с помощью уравнений связи координат

$$\begin{aligned} x_1 &= A \cos \alpha - \cos 2\alpha x - \sin 2\alpha y; \\ y_1 &= A \sin \alpha + \cos 2\alpha y - \sin 2\alpha x, \end{aligned}$$

где α — параметр, связывающий координату на эллипсе с соответствующей точкой на ответном профиле; A — межцентровое расстояние.

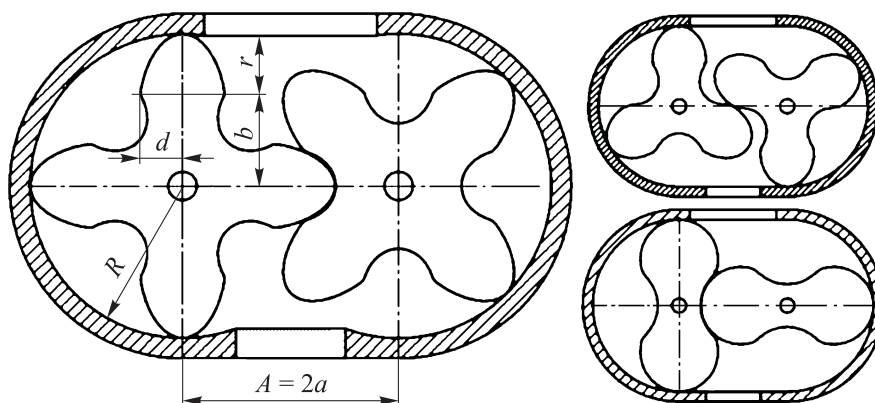


Рис. 1. Схемы исследуемых насосов

Эффективность профиля насоса типа Рутс можно оценить двумя параметрами — коэффициентом использования объема и коэффициентом проводимости каналов.

Коэффициент использования объема определяет геометрическую быстроту действия и рассчитывается по формуле

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

где f_p — площадь поперечного сечения ротора.

Чем больше коэффициент использования объема χ , тем большую быстроту действия может обеспечить НВД при тех же габаритных размерах.

Проводимость каналов роторного механизма характеризует обратный поток газа с выхода на вход и определяется как сумма проводимостей всех параллельно включенных каналов НВД — межроторного, радиальных и торцевых. Торцевые каналы по форме представляют собой длинные плоские щели, и их доля в общей проводимости не превышает 5 %. Изменение профиля роторов практически не влияет на перетекание газа через торцевые каналы, поэтому при анализе перетекания газа торцевые каналы учитывать не будем.

Величина перетекания газа при молекулярном режиме характеризуется вероятностью прохождения молекул через соответствующие каналы (коэффициентом проводимости) [12].

Сравнение эффективности профилей. Сравнение эффективности многолопастных роторов начнем с определения для каждого из профилей геометрических параметров, обеспечивающих сочетание наименьшего перетекания газа и наибольшего коэффициента использования объема. В работах [11, 13] показано, что для двухлопастного ротора такое сочетание достигается при отношениях параметров $b/a = 0,86$ и $R/A = 0,80$, для трехлопастного — при $b/a = 0,85$ и $R/A = 0,75$, для четырехлопастного — при $b/a = 0,60$ и $R/A = 0,70$.

Проведем сравнение значений полной проводимости U и коэффициента использования объема для НВД с двух- трех- и четырехлопастными роторами. Полную проводимость рассчитаем методом угловых коэффициентов в программном пакете COMSOL Multiphysics [14] при относительных зазорах δ/A ротор — корпус и ротор — ротор, равных 0,0013 и 0,0040 соответственно. Результаты расчета приведены в таблице.

Значения полной проводимости и коэффициента использования объема

Число лопастей	b/a	R/A	U , л/с	χ
2	0,60	0,70	0,0459	0,452
3	0,60	0,70	0,0388	0,467
4	0,60	0,70	0,0306	0,483
2	0,86	0,77	0,0418	0,554
3	0,85	0,75	0,0414	0,520

Из таблицы следует, что НВД с четырехлопастным профилем ротора имеет наименьшую среднюю по углу поворота ротора полную проводимость, которая на 27 и 26 % меньше, чем у НВД с двух- и трехлопастным профилем соответственно. В данном корпусе четырехлопастной профиль имеет наибольший коэффициент использования объема.

Важнейшими показателями эффективности НВД являются быстрота действия и максимальная степень повышения давления. Наиболее точным методом расчета этих параметров является моделирование методами вычислительной гидрогазодинамики (CFD).

Расчет проводили в двумерной постановке. Расчетная область насоса представляла собой внутреннее пространство расточки корпуса, не занятое роторами, включая входной и выходной патрубки. Расчетную область разбивали на структурированную сетку, состоящую из 20 000 четырехгранных элементов с углом скошенности не менее 25° , с помощью программного пакета TwinMesh [15] при различных значениях угла поворота ротора с шагом 1° . Количество элементов сетки выбирали из условия сеточной сходимости в ходе предварительных расчетов.

Моделирование рабочего процесса выполняли в программном пакете ANSYS CFX, где рабочим телом являлся воздух в модели идеального сжимаемого газа. Уравнения течения газа Навье — Стокса дополняли SST-моделью турбулентности с опцией Laminar Turbulent Blend. На входе и выходе задавали соответствующие параметры массы и импульса и открытые граничные условия (Opening) с нулевым градиентом турбулентности, на стенках роторов — соответствующую угловую скорость. Для стенки корпуса задавали условия отсутствия скольжения и полученную в ходе эксперимента температуру, а на границе между рабо-

чей зоной и патрубками всасывания и нагнетания — условия сохранения массы и импульса, турбулентности и теплового потока.

Сходимость достигалась за 5400 временных шагов при 500 итерациях за каждый шаг. В результате решения получены распределения давления, скорости течения и температуры газа в рабочей полости при каждом угле поворота ротора. Также определены интегральные характеристики в виде зависимостей индикаторной мощности, массового расхода на входе и выходе, моментов и сил, действующих на роторы со стороны газа. Определив интегральную величину массового расхода газа на входе за один оборот и умножив на частоту вращения роторов, можно получить быстроту действия насоса. Варьируя при моделировании давление газа на входе, можно найти зависимость быстроты действия от входного давления (рис. 2).

Самую высокую быстроту действия показал НВД с двухлопастным профилем ротора. Для него можно построить профиль с максимальным радиусом расточки корпуса и, соответственно, наибольшим объемом, перемещаемым за один оборот. Однако такому насосу присущи наибольшие перетекания газа, вследствие чего он имеет наихудшее остаточное давление.

На остаточное давление влияет сочетание геометрической быстроты действия и обратного перетекания газа. Поэтому, несмотря на то, что четырехлопастной профиль имеет наименьшее обратное перетекание газа, вследствие меньшей геометрической быстроты действия его остаточное давление будет больше, чем у трехлопастного.

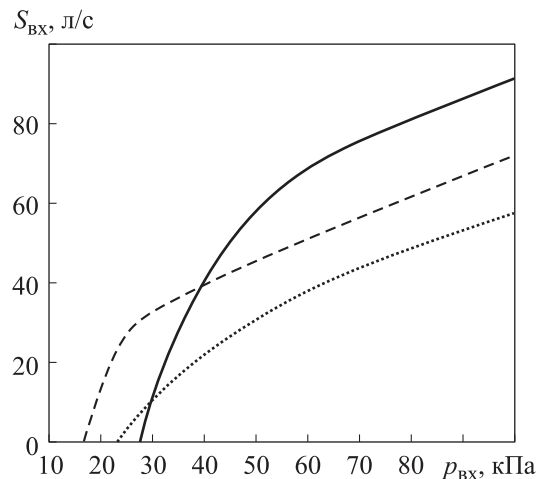


Рис. 2. Зависимости быстроты действия $S_{вх}$ от давления газа на входе $p_{вх}$ при числе лопастей профиля ротора $n = 2$ (—), 3 (---) и 4 (.....)

Сравнение потребляемой мощности показало, что у двухлопастного ротора она максимальная и равна 6,67 кВт, у трехлопастного — 5,68 кВт, а у четырехлопастного — 4,49 кВт.

При работе с выхлопом в атмосферу важным параметром являются пульсации газа на выходе. Большие пульсации газа увеличивают потери давления, возникает необходимость установки глушителей для снижения шума. Зависимости массового расхода газа на выходе Q от угла поворота ротора, характеризующие пульсации газа, показаны на рис. 3, а. Для двухлопастного ротора коэффициент пульсаций составил 9,51, для трехлопастного — 4,69, для четырехлопастного — 2,13, т. е. трех- и четырехлопастные НВД имеют меньшие пульсации газа на выходе.

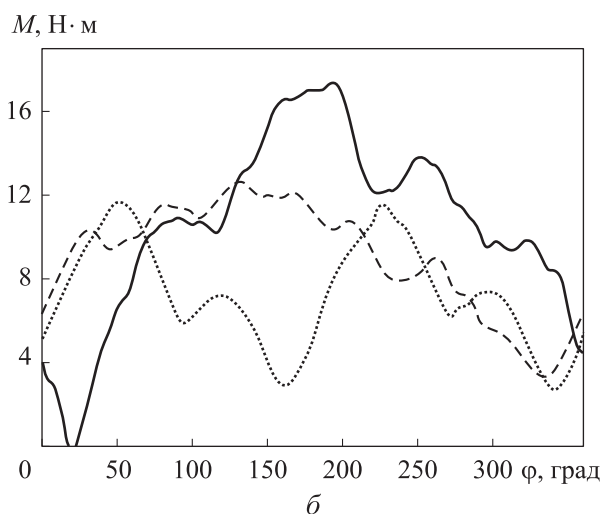
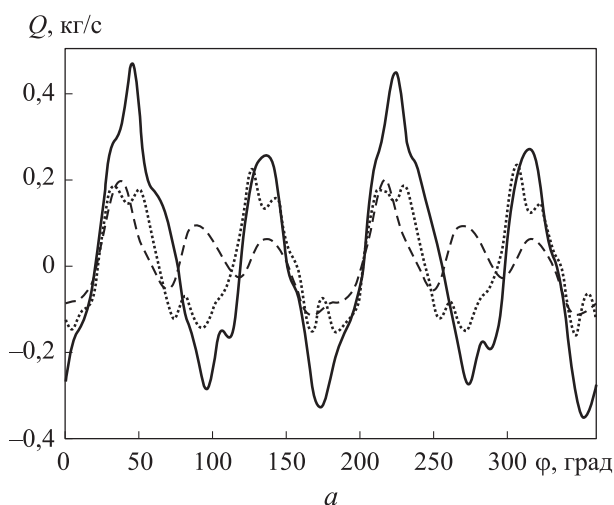


Рис. 3. Зависимости массового расхода газа на выходе Q (а) и момента силы на валу M (б) от угла поворота НВД φ при числе лопастей его профиля $n = 2$ (—), 3 (---) и 4 (.....)

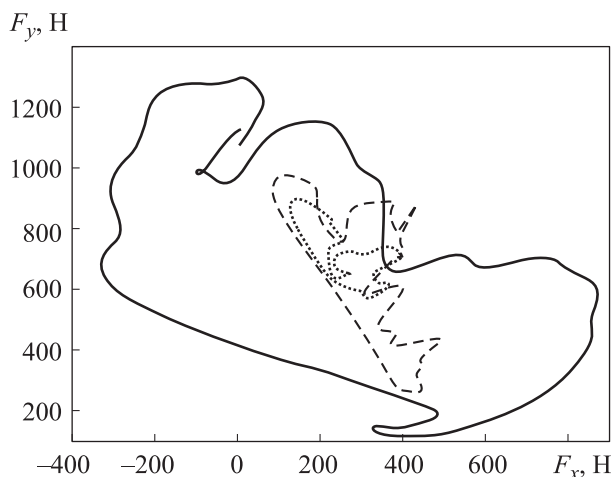


Рис. 4. Диаграмма радиальных газовых сил при числе лопастей профиля ротора $n = 2$ (—), 3 (---) и 4 (.....)

Число лопастей также влияет на моменты сопротивления и силы, действующие на роторы со стороны газа. Как видно из рис. 3, б, у НВД с двухлопастным профилем ротора максимальный момент на валу почти на 30 % больше, чем у НВД с трех- и четырехлопастными профилями.

Так как силы, действующие на роторы со стороны газа, передаются на подшипники, их

абсолютные значения и колебания оказывают влияние на долговечность подшипников. Взаимосвязь составляющих F_x и F_y сил, действующих на роторы, показана на рис. 4. У двухлопастного ротора наблюдаются значительные колебания как в значении, так и в направлении, несмотря на то, что абсолютное значение силы у него ненамного выше, чем у трех- и четырехлопастных роторов. Это приводит к повышенному износу подшипников.

Вывод

Трехлопастной эллиптический профиль с параметрами $R/A = 0,75$ и $b/a = 0,85$ обеспечивает роторам наименьшее остаточное давление, однако самую высокую быстроту действия имеет двухлопастной профиль с параметрами $R/A = 0,77$ и $b/a = 0,86$. Наименьшее перетекание газа показал четырехлопастной профиль с параметрами $R/A = 0,70$ и $b/a = 0,60$. Для двухлопастного насоса характерны наибольшие воздействия сил и пульсаций на роторы, что увеличивает вибрацию и потребляемую мощность и снижает ресурс подшипников.

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., ред. *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
- [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., Peng X. et al. The effects of design parameters on performance of a novel roots profile. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2023, vol. 48, no. 6, pp. 2368–2384, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.023>
- [11] 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.
- [12] Бурмистров А.В., Саликеев С.И., Бронштейн М.Д. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах. Казань, Казан. гос. технол. ун-та, 2009. 232 с.
- [13] 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. EDN: KUJZWI
- [14] COMSOL Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University. C/n 9601045.
- [15] TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University. C/n 13449.

References

- [1] Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. *Vakuumnaya tekhnika. Oborudovanie, projektirovanie, tekhnologii, ekspluatatsiya*. Ch. 1. Inzhenerno-fizicheskie osnovy [Vacuum technology. Equipment, design, technology, operation. P. 1. Engineering-physical bases]. Kazan, Izd-vo KNITU Publ., 2013. 232 p. (In Russ.).
- [2] Demikhov K.E., Panfilov Yu.V., eds. *Vakuumnaya tekhnika* [Vacuum engineering]. 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
- [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/ICAEE.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., Peng X. et al. The effects of design parameters on performance of a novel roots profile. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2023, vol. 48, no. 6, pp. 2368–2384, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.023>
- [11] 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. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2004, no. 6, pp. 38–40. (In Russ.).
- [12] Burmistrov A.V., Salikeev S.I., Bronshteyn M.D. *Pryamye i obratnye potoki v beskontaktnykh vakuumnykh nasosakh* [Forward and reverse flows in non-contact vacuum pumps]. Kazan, Kazan. gos. tekhnol. un-ta Publ., 2009. 232 p. (In Russ.).
- [13] Malin I.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. Increasing efficiency of a two-rotor external compression machine with the three-blade rotor profile. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedeniy. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 11, pp. 72–78. EDN: KUJZWI (In Russ.).

[14] *COMSOL Multiphysics*. License file for Kazan National Research Technological University. C/n 9601045

[15] *TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University*. C/n 13449.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025

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).

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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Малин И.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. Сравнение эффективности многолопастных роторов вакуумных насосов внешнего сжатия. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 56–62.

Please cite this article in English as:

Malin I.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. Comparing efficiency of the multi-lobe external compression pump rotors. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 56–62.