

УДК 621.521

doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-52-58

Расчет действительного радиального зазора при моделировании рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса

А.В. Тюрин^{1,2}, А.А. Райков¹, А.В. Бурмистров¹, С.И. Саликеев¹

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет

² АО «Вакууммаш»

Calculation of the Actual Radial Clearance when Simulating the Working Process of an Oil-Free Volute Vacuum Pump

A.V. Turin^{1,2}, A.A. Raykov¹, A.V. Burmistrov¹, S.I. Salikeev¹

¹ Kazan National Research Technological University

² Vacuummash JSC

Благодаря наличию гарантированного зазора между спиральями и малых обратных перетеканий спиральные вакуумные насосы обеспечивают получение безмасляного среднего вакуума. При разработке таких насосов определяют минимальный радиальный зазор, обеспечивающий бесконтактное движение спиральных элементов для любых штатных условий работы. Рассмотрена методика расчета радиального зазора безмасляного спирального насоса. Газовые силы, действующие на рабочие элементы вакуумного насоса, не приводят к значительным изменениям радиального зазора. Так как спиральные элементы изготавливают из алюминиевых сплавов, основное влияние на изменение радиального зазора оказывают тепловые деформации спиральных элементов. Это изменение может достигать 25 %, причем для внешних полостей при работе насоса радиальный зазор уменьшается, а для внутренних увеличивается. Чтобы найти наиболее точное значение радиального зазора, в качестве начального приближения необходимо использовать результаты замеров профильных частей спиральных элементов. Сравнение расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм подтвердило адекватность предложенной методики.

Ключевые слова: спиральный вакуумный насос, индикаторные диаграммы, радиальный зазор, температурные поля, тепловые деформации

The volute vacuum pumps provide an oil-free medium vacuum due to low backflows and the guaranteed clearance between the spirals. When developing volute pumps, the minimum radial clearance ensuring contactless movement of the spirals is determined for any normal operating conditions. The article considers a method for calculating the radial clearance of an oil-free volute pump. The gas forces acting on the working elements of the vacuum pump do not change significantly the radial clearance. Since the spirals are made of aluminum alloys, the main effect on the radial clearance change is caused by thermal deformations of the spiral elements. This change can reach up to 25%, and during pump operation the clearance decreases for external cavities and it increases for internal ones. To find the most accurate value of the radial clearance, it is necessary to use the results of measurements of the spiral element profile parts as an initial approximation. Comparison of calculated and experimental indicator diagrams confirmed the adequacy of the proposed methodology.

Keywords: volute vacuum pump, indicator diagrams, radial clearance, temperature fields, thermal deformations

Как известно, основными достоинствами насоса вакуумного спирального (НВСп) являются безмасляность получаемого вакуума и очень высокая степень сжатия (до 10^5) [1, 2]. Это достигается благодаря малому радиальному зазору ($PЗ$) между боковыми поверхностями спиральных элементов (СЭ) и большому количеству последовательно соединенных серповидных объемов между входом и выходом НВСп, что снижает в нем обратные перетекания.

В зависимости от размеров насоса $PЗ$ может варьироваться от 0,05 до 0,20 мм [3]. $PЗ$ должен быть как достаточно большим, чтобы обеспечивать бесконтактное орбитальное движение подвижного СЭ при всех штатных условиях работы, так и достаточно малым, чтобы перетекания через радиальный канал были минимальными, что обеспечивало бы получение предельного остаточного давления около 1...10 Па.

В работе [4] показано, что в среднем увеличение $PЗ$ на 50 мкм приводит к росту предельного остаточного давления примерно в 10 раз, а при $PЗ \delta > 150...200$ мкм НВСп перестает быть насосом среднего вакуума. Поэтому выбор $PЗ$ — важнейший этап проектирования НВСп с использованием математического моделирования, включая CFD-методы [5, 6].

При оценке адекватности математической модели важно вести расчеты, оперируя макси-

мально точным значением $PЗ$ в рабочих условиях, для чего необходимо определить, как изменяется $PЗ$ под действием различных факторов.

В трудах [7, 8] установлено, что газовые силы, действующие на рабочие элементы вакуумного насоса или компрессора, не вызывают значительных изменений $PЗ$. Однако ввиду того, что СЭ изготавливают из алюминиевых сплавов, имеющих высокий коэффициент теплового расширения, их тепловые деформации в 5–7 раз превышают силовые и являются основным фактором, влияющим на $PЗ$ в НВСп.

При $PЗ \delta = 100$ мкм его изменение под действием тепловых деформаций может достигать 25 %, что необходимо учитывать при верификации и валидации [3, 4, 8] математической модели рабочего процесса.

Существуют два вида полостей НВСп (рис. 1) [9, 10]. Первая — полость А — расположена между внешней поверхностью неподвижного СЭ и внутренней поверхностью подвижного СЭ, вторая — полость Б — между наружной поверхностью подвижного СЭ и внутренней поверхностью неподвижного СЭ.

У полости А объем меньше, чем у полости Б, и каждой из них может соответствовать свой $PЗ$. Кроме того, при работе НВСп температура подвижного СЭ всегда выше, чем у неподвиж-

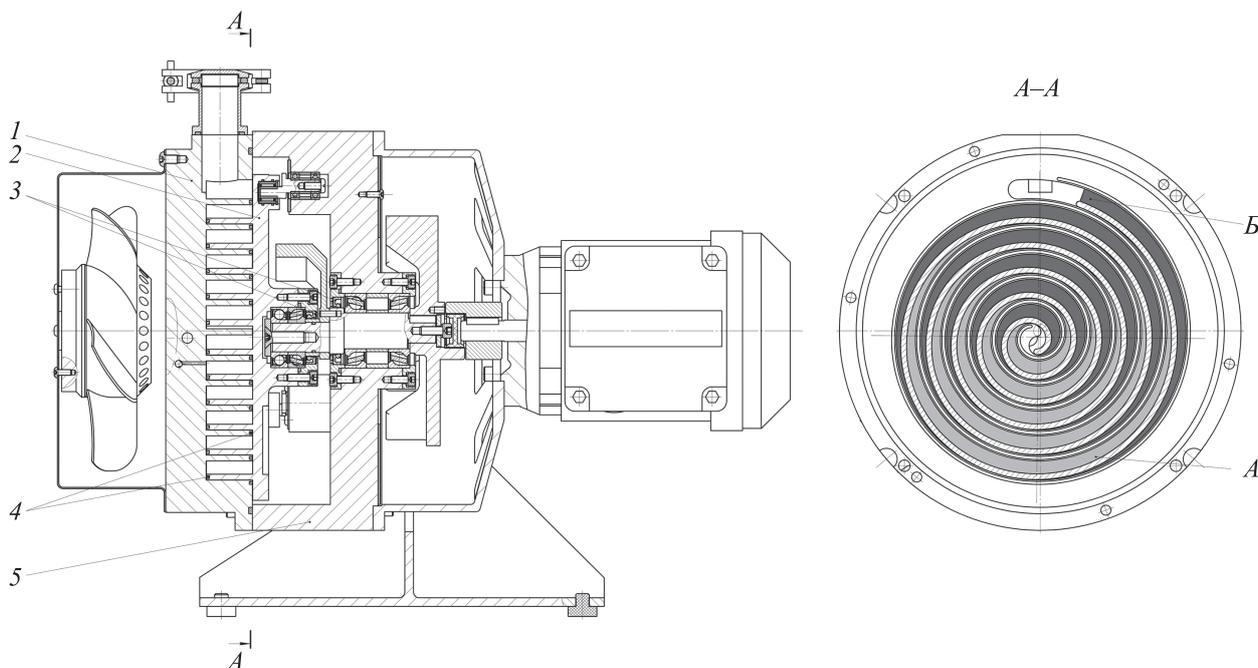


Рис. 1. Схема НВСп производства АО «Вакууммаш»:

1 и 2 — неподвижный и подвижный СЭ; 3 — манжеты; 4 — торцевой уплотнитель; 5 — корпус насоса с электродвигателем

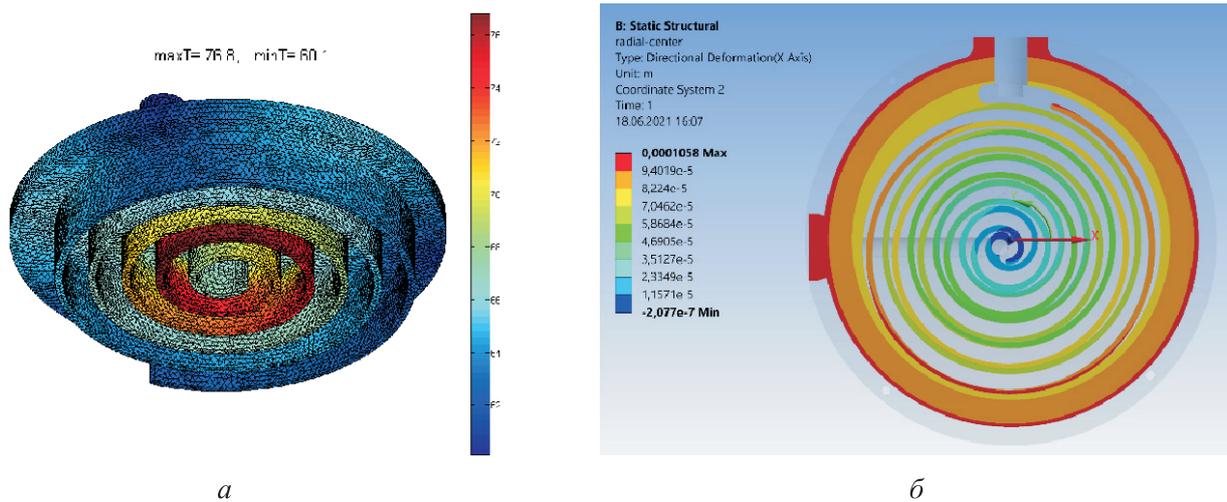


Рис. 2. Поля температур подвижного СЭ, °С, (а) и распределение радиальных тепловых деформаций в СЭ, м, (б) при входном давлении $p_{\text{вх}} = 20$ кПа и частоте вращения приводного вала $n = 1500$ мин⁻¹

ного СЭ вследствие худшего отвода тепла от ПСЭ, находящегося в вакуумной полости. Поэтому при работе насоса и его нагреве РЗ в полости А, как правило, увеличивается, а в полости Б уменьшается.

Цель работы — исследование изменения РЗ по углу орбитального движения СЭ под влиянием указанных факторов на примере НВСП (см. рис. 1) производства АО «Вакууммаш» (г. Казань).

Следует отметить, что в модели НВСП монтажный зазор для двух полостей одинаковый и равен 95 мкм при эксцентриситете вала $e = 4,59$ мм.

Для расчета тепловых деформаций используем методику, приведенную в работах [4, 9, 11]. Исходными данными для расчета температурных полей СЭ являются значения давлений и

температур газа в каждой полости насоса, определяемые с помощью математической модели рабочего процесса.

После расчета температурного поля СЭ эти данные снова передаются в математическую модель, для чего температурное поле преобразуется в зависимость средней температуры стенок рабочего объема от угла поворота приводного вала. Также учитывается дополнительный теплоприток от течения газа через зазоры.

Затем проводятся итерационные расчеты с контролем сходимости по температуре пера СЭ. Полученные зависимости температур стенок от угла поворота приводного вала заносятся в термодинамическую модель, и расчет повторяется для уточнения результатов. Путем расчета определяются поля температур подвижного СЭ (рис. 2, а) и неподвижного СЭ.

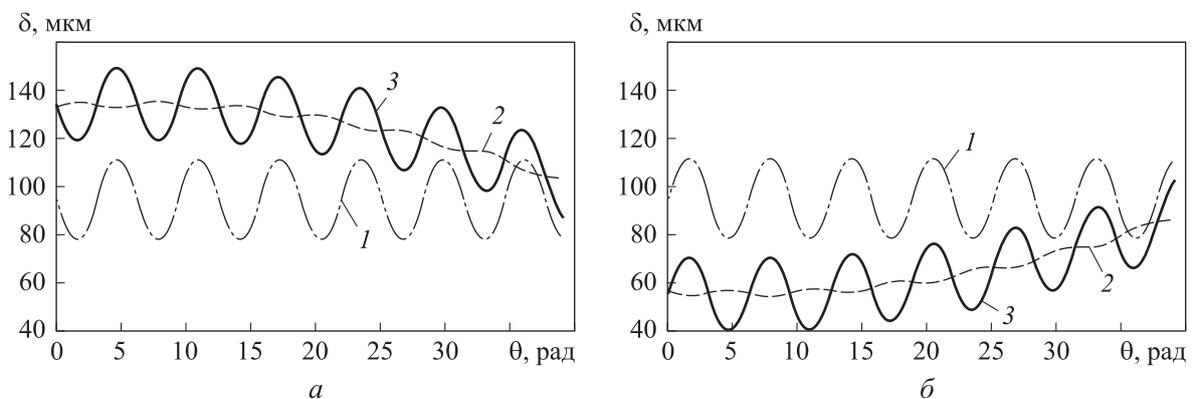


Рис. 3. Зависимости РЗ δ в полостях А (а) и Б (б) НВСП от угла поворота приводного вала θ при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹, эксцентриситете $e = 4,59$ мм и входном давлении $p_{\text{вх}} = 2,66$ кПа:

1 — результаты обмеров; 2 — результаты расчета с учетом тепловых деформаций; 3 — результаты расчета с учетом тепловых деформаций и обмеров

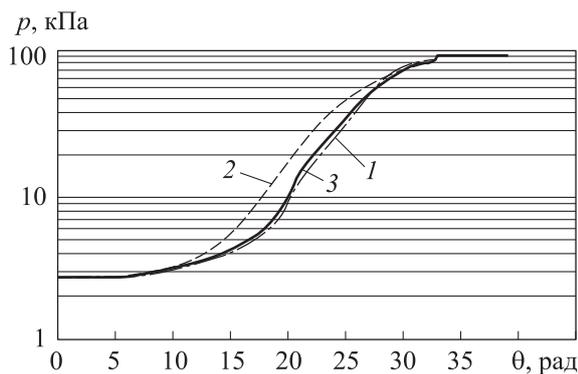


Рис. 4. Индикаторная диаграмма полости А НВСп при частоте вращения $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, входном давлении $p_{\text{вх}} = 2,66 \text{ кПа}$ и эксцентриситете $e = 4,59 \text{ мм}$:
1 — результаты обмеров; 2 — результаты расчета с учетом тепловых деформаций; 3 — результаты расчета с учетом тепловых деформаций и обмеров

Полученные температурные поля используются для расчета радиальных тепловых деформаций (рис. 2, б) методом конечных элементов в пакете ANSYS Fluent [12]. На основе расчетных тепловых деформаций вычисляется РЗ по углу поворота приводного вала. Далее значение РЗ вносится в математическую модель, и расчет повторяется по описанному алгоритму.

Полученная зависимость РЗ для полостей А и Б НВСп с учетом тепловых деформаций СЭ от угла поворота приводного вала φ приведена на рис. 3 (кривая 2). Это позволило построить расчетные индикаторные диаграммы НВСп (зависимости давления в рабочих полостях p от угла поворота приводного вала θ) с учетом изменения РЗ вследствие тепловых деформаций. Такая диаграмма для полости А показана на рис. 4 (кривая 2). Там же приведена экспериментальная индикаторная диаграмма (кривая 1), полученная для опытного образца НВСп в работах [13, 14].

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, показывает, что в ряде случаев недостаточно учитывать изменение РЗ вследствие тепловых деформаций, так как на результаты расчета влияет отклонение действительного профиля СЭ от теоретического из-за погрешности изготовления. Чтобы учесть последний фактор для нахождения наиболее точного значения РЗ, в качестве начального приближения необходимо использовать результаты обмеров профильной части СЭ.

Обмеры профильной части СЭ НВСп проведены на координатно-измерительной машине Carl Zeiss Contura G2 [15]. Полученные путем таких измерений значения монтажного РЗ (кривая 1) приведены на рис. 3. Там же показаны значения РЗ, найденные с учетом тепловых деформаций и действительного профиля СЭ (кривая 3). Отметим, что результаты расчета индикаторной диаграммы по предложенной методике (рис. 4, кривая 3) имеют наилучшую сходимость с данными эксперимента (рис. 4, кривая 1).

Выводы

1. Выполнен анализ изменения РЗ под влиянием тепловых деформаций и погрешностей изготовления СЭ. Установлено, что, в отличие от силовых деформаций, оба фактора существенно влияют на РЗ. Это, в свою очередь, подтверждено сравнением расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм.

2. Разработана математическая модель рабочего процесса НВСп, в которой учтено изменение РЗ между СЭ вследствие тепловых деформаций и погрешностей изготовления спиралей.

Литература

- [1] Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. *Спиральные вакуумные насосы*. Казань, Изд-во КНИТУ. 2018. 220 с.
- [2] Хабляян 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.
- [3] Паранин Ю.А. *Совершенствование метода расчета рабочего процесса спирального компрессора сухого сжатия с использованием результатов экспериментальных исследований*. Дисс. ... канд. тех. наук. Казань, КГТУ. 2011. 254 с.
- [4] Райков А.А., Якупов Р.Р., Саликеев С.И. и др. Моделирование тепловых деформаций спиральных элементов безмасляного вакуумного насоса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 3, с. 92–102, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-3-92-102>

- [5] Spille-Kohoff A., Hesse J., Andres R. et al. CFD simulation of a dry scroll vacuum pump with clearances, solid heating and thermal deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 232, art. 012052, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/232/1/012052>
- [6] Yue X.J., Zhang Y.L., Su Z.H. et al. CFD-based analysis of gas flow in dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2017, vol. 139, pp. 127–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.02.019>
- [7] Райков А.А., Якупов Р.Р., Бурмистров А.В. и др. Силовые деформации рабочих элементов безмасляного спирального вакуумного насоса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 57–63, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-57-63>
- [8] Ибрагимов Е.Р. *Повышение эффективности спирального компрессора сухого сжатия*. Дисс. ... канд. тех. наук. Казань, КГТУ, 2009. 134 с.
- [9] Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A. et al. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump. Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics. *Vak. Forschung und Prax.*, 2017, vol. 29, no. 6, pp. 28–31, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201700663>
- [10] Sun S., Wang Z., Guo P., et al. Optimization of the tip profile of orbiting scroll in an asymmetry suction chamber scroll compressor. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1180, art. 012014, doi: [10.1088/1757-899X/1180/1/012014](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1180/1/012014)
- [11] Burmistrov A., Salikeev S., Bronshtein M. et al. Conductance calculation of slot channels with variable cross section. *Vak. Forschung und Prax.*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 36–40, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201500571>
- [12] Ansys Inc. license file for Kazan National Research Technology University no. 657938.
- [13] Тюрин А.В., Райков А.А., Саликеев С.И. и др. Экспериментальные индикаторные диаграммы безмасляного спирального вакуумного насоса. *Компрессорная техника и пневматика*, 2018, № 4, с. 12–15.
- [14] Tyurin A., Burmistrov A., Salikeev S. et al. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pumps. *Vak. Forschung und Prax.*, 2019, vol. 31, no. 4, pp. 34–37, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201900717>
- [15] Портальная координатно-измерительная машина Zeiss Contura. *zeiss-solutions.ru: веб-сайт*. URL: <https://zeiss-solutions.ru/equipment/promyshlennaya-metrologiya/koordinatno-izmeritelnye-mashiny/zeiss-contura> (дата обращения: 05.12.2021).

References

- [1] Raykov A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V. *Spiral'nye vakuumnnye nasosy* [Spiral vacuum pumps]. Kazan', Izd-vo KNITU Publ., 2018. 220 p. (In Russ.).
- [2] Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. *Vakuumnaya tekhnika. Oborudovanie, proektirovanie, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 2. Vakuumnnye nasosy* [Vacuum techniques. Equipment, design, technologies, exploitation. P. 2. Vacuum pumps]. Kazan', Izd-vo KNITU Publ., 2016. 300 p. (In Russ.).
- [3] Paranin Yu.A. *Sovershenstvovanie metoda rascheta rabocheho protsessa spiral'nogo kompressora sukhogo szhatiya s ispol'zovaniem rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving method for calculation of working process in a dry spiral compressor using results of experimental studies. Kand. tech. sci. diss.]. Kazan', KGTU Publ., 2011. 254 p. (In Russ.).
- [4] Raykov A.A., Yakupov R.R., Salikeev S.I. et al. Thermal deformation simulation of scroll elements in oil-free scroll vacuum pump. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 3, pp. 92–102, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-3-92-102> (in Russ.).
- [5] Spille-Kohoff A., Hesse J., Andres R. et al. CFD simulation of a dry scroll vacuum pump with clearances, solid heating and thermal deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 232, art. 012052, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/232/1/012052>
- [6] Yue X.J., Zhang Y.L., Su Z.H. et al. CFD-based analysis of gas flow in dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2017, vol. 139, pp. 127–135, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.02.019>

- [7] Raykov A.A., Yakupov R.R., Burmistrov A.V. et al. Deformation of working elements of dry scroll vacuum pumps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 1, pp. 57–63, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-57-63> (in Russ.).
- [8] Ibragimov E.R. *Povyshenie effektivnosti spiral'nogo kompressora sukhogo szhatiya*. Diss. kand. tekh. nauk [Raising efficiency of a dry spiral compressor. Kand. tech. sci. diss.]. Kazan', KGTU Publ., 2009. 134 p. (In Russ.).
- [9] Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A. et al. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump. Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics. *Vak. Forschung und Prax.*, 2017, vol. 29, no. 6, pp. 28–31, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201700663>
- [10] Sun S., Wang Z., Guo P., et al. Optimization of the tip profile of orbiting scroll in an asymmetry suction chamber scroll compressor. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1180, art. 012014, doi:10.1088/1757-899X/1180/1/012014
- [11] Burmistrov A., Salikeev S., Bronshtein M. et al. Conductance calculation of slot channels with variable cross section. *Vak. Forschung und Prax.*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 36–40, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201500571>
- [12] Ansys Inc. license file for Kazan National Research Technology University no. 657938.
- [13] Tyurin A.V., Raykov A.A., Salikeev S.I. et al. Experimental indicator diagrams of scroll vacuum pump. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors and Pneumatics], 2018, no. 4, pp. 12–15. (In Russ.).
- [14] Tyurin A., Burmistrov A., Salikeev S. et al. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pumps. *Vak. Forschung und Prax.*, 2019, vol. 31, no. 4, pp. 34–37, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201900717>
- [15] *Portal'naya koordinatno-izmeritel'naya mashina Zeiss Contura* [Zeiss Contura portal coordinate-measuring machine]. *zeiss-solutions.ru: website*. URL: <https://zeiss-solutions.ru/equipment/promyshlennaya-metrologiya/koordinatno-izmeritelnye-mashiny/zeiss-contura> (accessed: 05.12.2021). (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.12.2021

Информация об авторах

ТЮРИН Алексей Викторович — ассистент кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет; начальник лаборатории испытаний и перспективных исследований АО «Вакууммаш» (420054, Казань, Российская Федерация, ул. Тульская, д. 58, e-mail: tyrin92@mail.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: ors@hitv.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

TURIN Alexey Viktorovich — Assistant Lecturer, Department of Vacuum Equipment for Electro-Physical Installations. Kazan National Research Technological University; Head of the Laboratory for Testing and Advanced Research. Vacuum-mash JSC (420054, Kazan, Russian Federation, Tulskaaya St., Bldg. 58, e-mail: tyrin92@mail.ru).

RAYKOV Alexey Aleksandrovich — 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: ors@hitv.ru).

BURMISTROV Alexey Vasilyevich — 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).

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).

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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тюрин А.В., Райков А.А., Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Расчет действительного радиального зазора при моделировании рабочего процесса безмасляного спирального вакуумного насоса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 5, с. 52–58, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-52-58

Please cite this article in English as:

Turin A.V., Raykov A.A., Burmistrov A.V., Salikeev S.I. Calculation of the Actual Radial Clearance when Simulating the Working Process of an Oil-Free Volute Vacuum Pump. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 5, pp. 52–58, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-52-58



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Материалы для поршневых двигателей.
Модули 1 и 2»**

Авторы: М.Ю. Семенов, М.В. Унчикова

Приведена методика оптимального выбора материалов для деталей двигателей внутреннего сгорания на основе анализа условий эксплуатации. Большое внимание уделено особенностям состава, структуры и свойств современных металлических и альтернативных материалов для изделий энергетических машин. Рассмотрены методы упрочняющей обработки, проведено сравнение отечественных материалов и покрытий с зарубежными аналогами.

Для студентов, обучающихся по магистерским программам «Двигатели наземного транспорта», «Двигатели специального назначения».

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; www.baumanpress.ru