

УДК 621.521

Термометрирование рабочих элементов безмасляного винтового вакуумного насоса

А.А. Ласкин, А.Е. Капустин, А.А. Райков,
С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Temperature monitoring of working components in an oil-free screw vacuum pump

A.A. Laskin, A.E. Kapustin, A.A. Raykov, S.I. Salikeev, A.V. Burmistrov

Kazan National Research Technological University

Математическая модель рабочего процесса позволяет прогнозировать характеристики вновь разрабатываемых винтовых вакуумных насосов на стадии проектирования, что снижает время и затраты ресурсов на разработку новых машин. Для уточнения математической модели рабочего процесса безмасляного винтового вакуумного насоса с переменным шагом винта необходимо знать температуры основных рабочих элементов насоса. Наиболее достоверные данные о температурах рабочих поверхностей могут быть получены в ходе натурного эксперимента. Выполнена серия экспериментов по измерению температур рабочих органов винтовых вакуумных насосов при различных режимах работы.

EDN: WTXQOG, <https://elibrary/wtxqog>

Ключевые слова: винтовой вакуумный насос, винтовые роторы, термометрирование рабочих элементов, быстрота действия

To refine the mathematical model of the operating process of a dry screw vacuum pump with variable pitch, knowledge of the temperatures of the pump's main working elements is necessary. The mathematical model allows for predicting the characteristics of newly developed dry screw vacuum pumps at the design stage, reducing the time and resources required to develop new machines. The model takes into account the heat exchange between the pumped gas and the rotor and casing walls. However, only a full-scale experiment can provide the most reliable data on the working surface temperatures. In this study, a series of full-scale experiments were conducted to measure the temperatures of the DSVP's working elements under various operating conditions. The obtained data are of significant practical interest and were also used to refine and verify the calculations performed in the mathematical model.

EDN: WTXQOG, <https://elibrary/wtxqog>

Keywords: screw vacuum pump, screw rotors, temperature monitoring of working components, pumping speed

Насосы вакуумные винтовые (НВВ) являются для России достаточно новым видом безмасляных средств откачки. Несмотря на это, они уже выходят на лидирующие позиции в области низко- и средневакуумной откачки. Это обусловлено их хорошими удельными характеристиками, широким диапазоном рабочего давления, высокой надежностью и быстротой действия, а также возможностью откачки различных сред — агрессивных и содержащих пыль и влагу. Спрос на насосы такого типа непрерывно растет. Однако лишь пять лет назад на казанском АО «Вакууммаш» выпущен первый в России НВВ с быстротой действия 650 м³/ч. В настоящее время ведутся работы по созданию типоразмерного ряда винтовых машин.

Новые высокоэффективные машины типоразмерного ряда могут быть созданы на базе математической модели рабочего процесса НВВ [1]. Важнейшей составляющей математической модели любого бесконтактного насоса является расчет обратных перетеканий откачиваемого газа в каналах проточной части. Эти перетекания определяют характеристики НВВ и зависят от типа канала, его размеров, рода, давления, температуры газа и стенок канала.

В публикациях [2, 3] показано, что благодаря наличию гарантированных зазоров в роторном механизме НВВ являются насосами объемно-скоростного принципа действия и им присуща селективность откачки при работе с разными газами. Если типы и базовые размеры каналов определяются геометрическими характеристикам проточной части насоса, то их точная конфигурация зависит от распределения температур внутри насоса [4, 5]. Распределение температур, в свою очередь, напрямую зависит от режимов работы НВВ — частоты вращения роторов, давления на входе в насос и эффективности охлаждения.

Вследствие широчайшего диапазона рабочего давления НВВ (от 0,1 до 10⁵ Па), подвижности стенок роторов и сложной конфигурации каналов задача расчета теплообмена газа со стенками представляется очень трудной. Исследования в этом направлении проведены в работах [6–9] для винтовой машины в компрессорном режиме.

Хорошие результаты дает решение задачи сопряженного теплообмена в пакетах вычислительной гидродинамики [10, 11], однако их применение ограничено вязкостным режимом течения газа. В более широком диапазоне дав-

лений работают модели рабочего процесса на основе камерного метода [12], но для его использования необходимо знать коэффициенты теплопередачи.

Наиболее точную информацию о температуре роторов и корпуса может дать эксперимент, однако это сопряжено со многими трудностями. В исследовании [13] для измерения температуры роторов насоса типа Рутс использован метод инфракрасного термометрирования через прозрачную вставку в корпусе. Несмотря на возможность измерения температуры любой точки поверхности ротора, такой метод имеет большую погрешность, а результаты существенно зависят от состояния поверхностей.

В работе [6] температуру роторов измеряли с помощью пяти хромель-копелевых термопар, установленных на разной высоте зуба, и двух — на торцах. Передача сигнала с вращающегося ротора возможна через ртутный токосъемник [6] или графитовые щетки [14].

Аналогичная методика применена в трудах [15, 16] при испытании двухроторных машин. В дополнение к измерению температуры рабочих элементов получены температуры газа в рабочих полостях, для чего в роторе сделали проточку с целью свободного прохождения термопары, закрепленной в корпусе. Такая методика измерения позволяет получать обширный массив экспериментальных данных по распределению температур в рабочих элементах насоса. Однако она достаточно трудоемкая, требует значительной модификации конструкции насоса и повторной балансировки роторов.

В статье [17] исследовано распределение температур рабочих элементов вертикального НВВ. Для измерения температуры корпуса использованы инфракрасная камера и термопары К-типа. Однако температуру ротора измеряли только на верхней торцевой поверхности с помощью инфракрасного датчика.

Более современный подход применен в статье [18], где для мониторинга температуры корпуса нагнетателя типа Рутс задействованы волоконно-оптические датчики на основе решеток Брэгга. Основным достоинством этих датчиков является устойчивость к электромагнитным помехам. Кроме того, с помощью мультиплексирования можно создать сенсорную сетку, которая позволяет получить полную температурную карту корпуса. Однако в статье отмечены ошибки измерения, свя-

занные с влиянием тепловых деформаций датчика.

В исследовании [19] измерена температура откачиваемого газа на выходе из НВВ при различных значениях входного давления и частоты вращения роторов. В работе [20] выполнено термометрирование подшипниковых опор НВВ.

Хорошие результаты для измерения температуры роторов показал метод с использованием подвижной термопары [21]. Он позволяет проводить измерения с высокой точностью, а подвижность термопары дает возможность получать температуру и ротора, и газа.

Цель работы — экспериментальное определение температуры элементов безмасляного НВВ при различных режимах для воссоздания более точной картины его работы в рамках математической модели НВВ.

Описание экспериментального стенда. В качестве объекта исследования выступал НВВ с номинальной быстротой действия $650 \text{ м}^3/\text{ч}$ производства АО «Вакууммаш». Длина винтовых роторов — 550 мм.

Экспериментальный стенд (рис. 1) включал в себя исследуемый НВВ NL1, измерительную камеру CV1, натекатель VF1, два блока мембранно-емкостных вакуумметров PD1–PD6, восемь хромель-копелевых термопар T1–T8,

напускной VM1 и отсечные клапаны VП1, VП2, металлорукава MR1, MR2 и вспомогательный механический вакуумный насос NL2, предназначенный для сохранения вакуума внутри исследуемого НВВ при измерении температуры роторов.

Места расположения восьми хромель-копелевых термопар, закрепленных на корпусе НВВ, схематично показаны на рис. 1. Для измерения температуры роторов корпус НВВ доработали с целью обеспечения возможности установки датчиков температуры (рис. 2). Термопары T1–T3 смонтированы на стеклотекстолитовые стержни, которые герметично закреплены в заглушках фланцев DN 25 ISO-KF. При работе НВВ и вращении винтовых роторов стержни с термопарами отдалены от поверхности роторов на 8...10 мм. В этом положении выполнялись измерения температуры перекачиваемого газа в окрестности роторов. При остановке двигателя термопары прижимались к ротору и измерялась температура его поверхности в соответствующих точках. Герметичность и возможность продольного хода стержней обеспечивали сальфоны.

Для сохранения температуры роторов при остановке НВВ вакуум в системе поддерживался вспомогательным насосом NL2.

Исследуемый НВВ имеет перепускные клапаны, расположенные на расстоянии 155 мм от

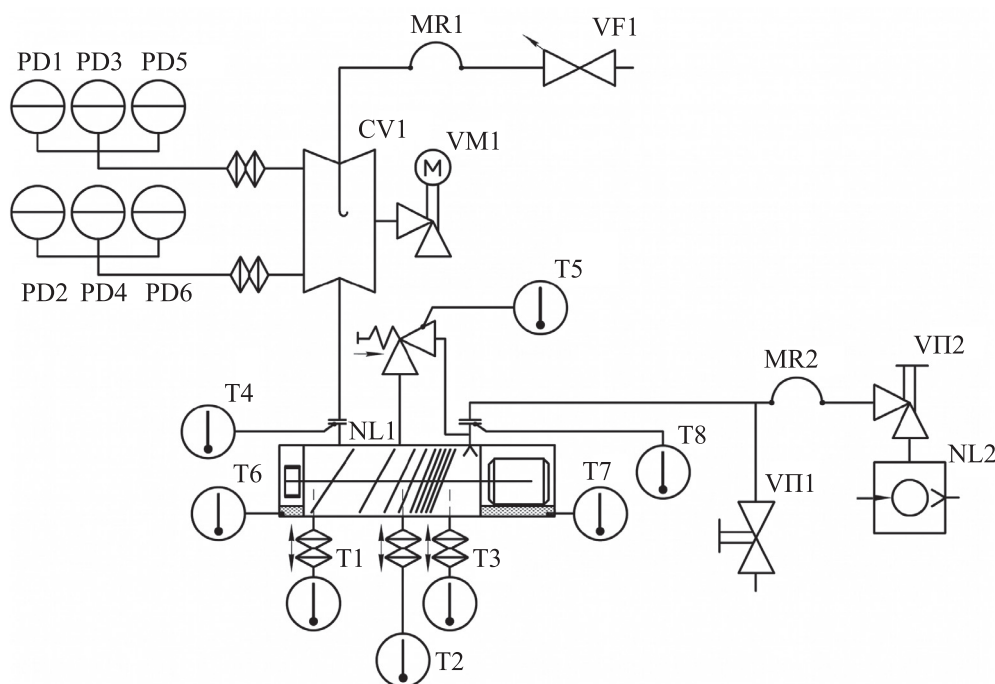


Рис. 1. Вакуумная схема экспериментального стенда

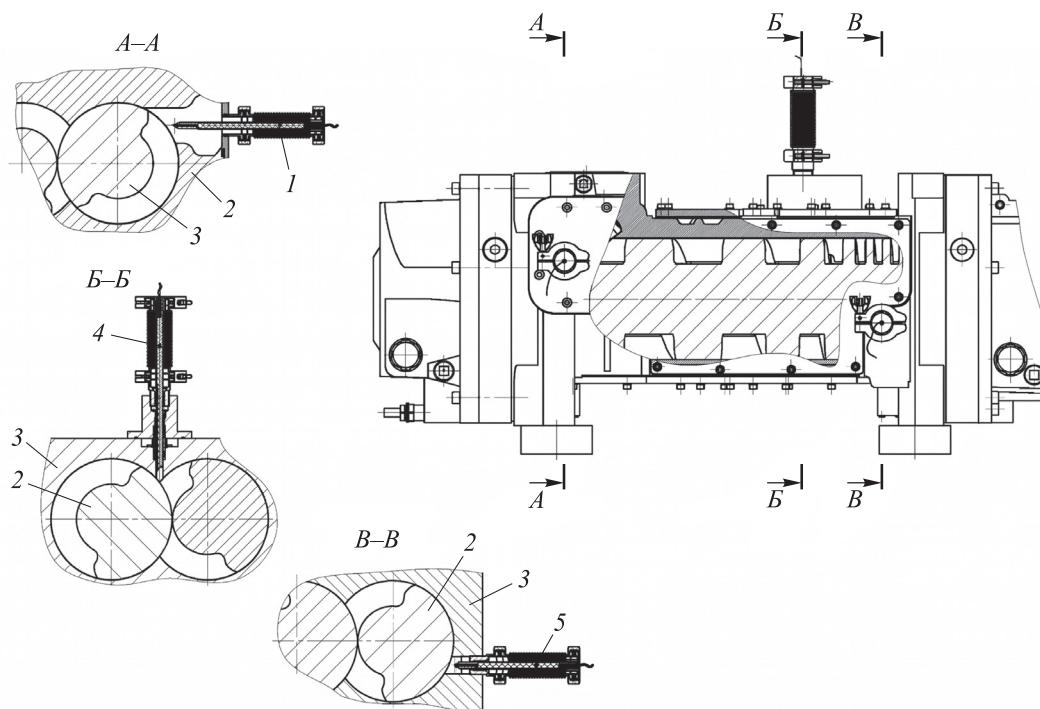


Рис. 2. Схема размещения термодпар:
1, 4, 5 — термодпары; 2 — ротор; 3 — корпус

конца ротора и обеспечивающие снижение пережатия газа при работе на высоких значениях входного давления. В экспериментальной установке предусмотрена возможность фиксации клапанов в открытом и закрытом состояниях.

Также измеряли температуру корпуса термодпарами Т4, Т5, Т8, масла в картерах на стороне синхронизирующих шестерен и электродвигателя — термодпарами Т6 и Т7 соответственно.

Измерения выполняли при частоте вращения роторов $n = 4500, 5400, 6300$ и 7200 мин^{-1} и входном давлении $p_{\text{вх}} = 2...26 \text{ 666 Па}$.

Эксперимент проводили в следующей последовательности:

- стенд в исходном положении — клапаны VF1, VM1, VP2 закрыты, клапан VP1 открыт, насосы NL1 и NL2 выключены;
- задание требуемой частоты вращения роторов на частотном преобразователе электродвигателя насоса NL1;
- пуск и разгон насоса NL1 до заданной частоты вращения роторов;
- приоткрывание натекавателя VF1 в камере CV1 и установление требуемого давления на входе в насос NL1;
- ожидание установления температурного равновесия системы и фиксация показаний

термодпар (температура Т1–Т8 не должна изменяться более чем на 1°C за 10 мин);

- пуск вспомогательного насоса NL2, одновременное закрытие VF1 и VP1, открытие VP2 и останов насоса NL1;
- после выбега роторов NL1 (не более 5 с) измерение температуры его роторов путем прижатия к ним термодпар Т1–Т3 через сильфонные узлы;
- возвращение стенда в исходное положение.

Обсуждение результатов. Полученные экспериментальные значения температуры ротора показаны на рис. 3 в виде точек. Видно, что в области входа (Т1) температура ротора почти не зависит от частоты его вращения n и снижается с ростом входного давления $p_{\text{вх}}$. Это связано с интенсификацией теплообмена с холодным газом, поступающим в НВВ.

В зоне выхода (Т3) при низких значениях входного давления температура ротора также почти не зависит от частоты вращения. Однако с ростом входного давления при низких частотах вращения температура падает, тогда как при высоких — растет. При низких частотах вращения значительную долю в рабочем объеме составляют обратные перетекания более холодного газа с выхода, что приводит к охла-

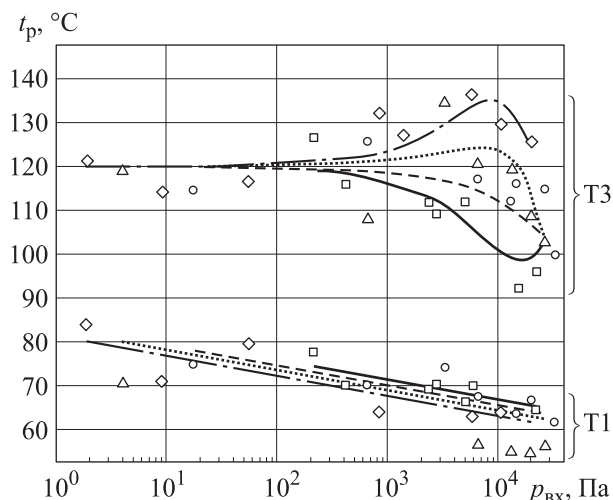


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости температуры ротора t_p от входного давления $p_{вх}$ при частоте вращения $n = 75$ (□, —), 90 (○, --), 105 (△,), и 120 Гц (◇, ---) в зонах выхода (T3) и входа (T1)

ждению ротора. При высоких частотах преобладает поток газа с выхода, который разогреваясь при сжатии, передает часть своей теплоты ротору. В то же время при открытии перепускного клапана возникает пережатие в витках, ближайших к выхлопу.

Температура корпуса и масляных картеров поддерживается почти постоянной за счет наличия водяного охлаждения и незначительно зависит от входного давления и частоты вращения ротора. Температура в масляном картере со стороны электродвигателя (T7) составляет 45 °C, а со стороны синхронизирующих шестерен (T6) за счет тепловыделения в зубчатой передаче — 65 °C. Температура крышки клапанной коробки (T8) вследствие отсутствия водяного охлаждения может превышать 100 °C.

Для дальнейшего использования с целью уточнения математической модели НВВ получены аппроксимирующие зависимости температуры газа от входного давления (рис. 4):

- в зоне входа

$$t_1 = 90,78 - 0,0787n - 1,968 \ln p_{вх};$$

- в зоне выхода

$$t_3 = 119,72 + 10^2(0,0136n - 1,3)p_{вх} + 10^7(4,876 - 0,0532n)p_{вх}^2.$$

Эти зависимости дают расхождение с экспериментом не более 12 %.

Характер зависимости температуры газа от входного давления при различных частотах вращения ротора (см. рис. 4) в целом коррелирует с его температурой. Однако на входе более горячий ротор охлаждается поступающим холодным газом, а ближе к выходу горячий газ нагревает ротор. Также при низких значениях входного давления прослеживается зависимость температуры газа от частоты вращения, которая отсутствовала при его высоких значениях. Это обусловлено влиянием теплообмена концов роторов с маслом в картерах, где температура поддерживается близкой к постоянной за счет водяного охлаждения.

Также исследовано влияние перепуска газа на температурные характеристики НВВ. При заглушении отверстий перепускных клапанов с ростом входного давления повышается температура ротора как на стороне всасывания, так и нагнетания. А при принудительно открытых перепускных клапанах в области низкого входного давления из-за роста обратных перетеканий газа происходит резкий рост потребляемой мощности и температуры. Однако при входном давлении более 13 кПа наблюдается падение температур в зонах ротора T1 и T2, так как уменьшается пережатие газа в витках, ближайших к выходу, вследствие чего снижается избыточное тепловыделение.

При увеличении температуры корпуса температура газа в центре НВВ ожидаемо возрастает, причем ее рост усиливается с повышением

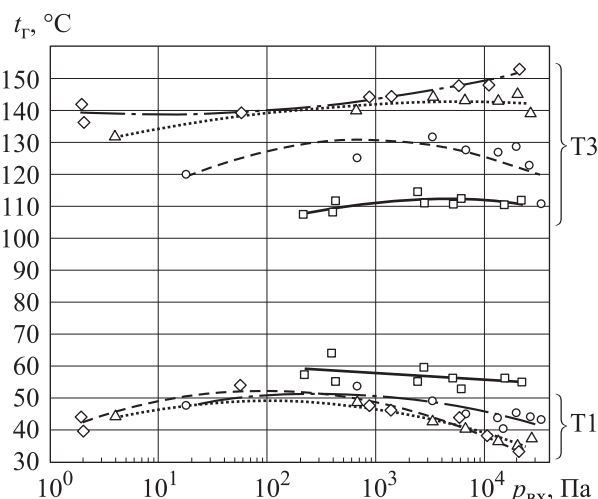


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости температуры газа t_r от входного давления $p_{вх}$ при частоте вращения $n = 75$ (□, —), 90 (○, --), 105 (△,), и 120 Гц (◇, ---) в зонах выхода (T3) и входа (T1)

входного давления. Увеличение температуры ротора при отключении охлаждения составляет 8 °С (от 27 до 35 °С).

Теплообмен между корпусом и ротором через малый зазор оказывает существенное влияние на температуру вследствие большой площади их взаимодействия. При повышении входного давления разница между температурами газа и ротора растет. При этом охлаждение ротора непосредственно от корпуса оказывается более существенным, чем от газа в рабочей полости. При низких значениях входного давления, наоборот, теплообмен между рото-

ром и газом в рабочей полости вносит большой вклад вследствие снижения коэффициента теплопередачи.

Выводы

1. В ходе натурных экспериментов получен массив данных по зависимостям температур безмасляного НВВ от режимов его работы.

2. Полученные данные представляют существенный интерес при проектировании новых НВВ и могут быть использованы для уточнения математической модели рабочего процесса.

Литература

- [1] Ласкин А.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. Математическое моделирование работы безмасляного винтового вакуумного насоса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 73–84. EDN: ММОРJB
- [2] Ласкин А.А. Откачные характеристики винтового вакуумного насоса при откачке различных газов. *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Мат. 15-й Межд. науч.-тех. конф.* Омск, ОмГТУ, 2025. с. 26–27. EDN: OLRZSA
- [3] Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Райков А.А. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов. *Компрессорная техника и пневматика*, 2013, № 4, с. 37–42.
- [4] Wang J., Zhao X., Zhao L. et al. Clearance distribution design and thermal deformation analysis of variable-pitch screw rotors for twin-screw vacuum pumps. *Vacuum*, 2023, vol. 211, art. 111936, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111936>
- [5] Cui Y., Wang Q., Wang G. Thermal deformation of rotors and casing in operation of screw vacuum-pump. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, vol. 35, no. 11, pp. 1291–1294, doi: <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2015.11.01>
- [6] Хисамеев И.Г., Максимов В.А. *Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры*. Казань, ФЭН, 2000. 638 с.
- [7] Сакун И.А. *Винтовые компрессоры*. Москва, Машиностроение, 1970. 400 с.
- [8] Basha N., Kovacevic A., Rane S. Numerical investigation of oil injection in screw compressors. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 193, art. 116959, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116959>
- [9] Liu G., Xing Z., Sun S. et al. Analysis on performance of screw compressor in MVR system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 604, art. 012002, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/604/1/012002>
- [10] Rane S.R., Kovacevic A., Akhtar K. et al. Thermal analysis of a twin screw vacuum pump using CFD model. *ICEC*, 2024, art. 2796. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2796> (дата обращения: 15.12.2025).
- [11] Saravana A., Liu H., Able N. et al. Conjugate heat transfer analysis of a twin-screw compressor with 4-6 configuration and internal cooling channels. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2022, vol. 1267, art. 012014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1267/1/012014>
- [12] Li D., He Z., Wang C. et al. Simulation of dry screw vacuum pumps based on chamber model and thermal resistance network. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 211, art. 118460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118460>
- [13] Patel B., Rane S., Kovacevic A. et al. Infrared-thermography and numerical investigation of conjugate heat transfer in roots blower. *ICEC*, 2022, vol. 2709. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2709/> (дата обращения: 15.12.2025).
- [14] Daemgen U., Hadamitzky P., Dohmann J. Thermal expansion in liquid-injected screw compressors. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 425, art. 012010, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/425/1/012010>

- [15] Сайфетдинов А.Г. *Совершенствование метода расчета рабочего процесса роторного компрессора внутреннего сжатия с использованием результатов экспериментальных исследований теплообмена в рабочей полости*. Дисс. ... канд. техн. наук. Казань, КНИТУ, 2013. 190 с.
- [16] Шарапов И.И. *Разработка методики измерения и расчета параметров процесса теплообмена в шестеренчатом компрессоре с целью повышения точности расчета рабочего процесса*. Дисс. ... канд. техн. наук. Казань, КГТУ, 2009. 146 с.
- [17] Chang M.-S., Park J., Kim S.-T. et al. A study on the thermal characteristics of dry vacuum pump with vertical screws. *J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng.*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 67–74, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.2.067>
- [18] Tam T., Kovacevic A., Milligan W. et al. Experimental investigation of screw compressor clearance monitoring techniques. *ICEC*, 2022, vol. 2715. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2715/> (дата обращения: 15.12.2025).
- [19] Ласкин А.А., Капустин Е.Н., Райков А.А. и др. Экспериментальное исследование откачных характеристик винтового вакуумного насоса. *Вакуумная техника и технологии — 2024. Мат. 31-й Всерос. науч.-тех. конф.* Санкт-Петербург, СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2024, с. 118–122.
- [20] Власенков А.И., Ласкин А.А., Бурмистров А.В. Термометрирование подшипниковых опор. Анализ выхода из строя подшипников винтового вакуумного насоса. *Техника и технологические процессы тепловых и холодильных установок. Мат. Всерос. студенч. науч.-тех. конф.* Казань, КНИТУ, 2024, с. 120–122.
- [21] Исаев А.А., Райков А.А., Бурмистров А.В. и др. Термометрирование двухроторного вакуумного насоса. *Вестник РВО*, 2023, № 2, с. 12–19.

References

- [1] Laskin A.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. Mathematical simulation of the oil-free screw vacuum pump operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 6, pp. 73–84. EDN: MMOPJB (in Russ.).
- [2] Laskin A.A. [Pumping characteristics of a screw vacuum pump when pumping various gases]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Mat. 15-y Mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Engineering and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production. Proc. 15th Int. Sci.-Tech. Conf.]. Omsk, OmGTU, 2025. s. 26–27. EDN: OLRZSA (in Russ.).
- [3] Salikeev S.I., Burmistrov A.V., Raykov A.A. A concept of calculation of pumping characteristics of non-contact oil-free vacuum pumps. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2013, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
- [4] Wang J., Zhao X., Zhao L. et al. Clearance distribution design and thermal deformation analysis of variable-pitch screw rotors for twin-screw vacuum pumps. *Vacuum*, 2023, vol. 211, art. 111936, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111936>
- [5] Cui Y., Wang Q., Wang G. Thermal deformation of rotors and casing in operation of screw vacuum-pump. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, vol. 35, no. 11, pp. 1291–1294, doi: <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2015.11.01>
- [6] Khisameev I.G., Maksimov V.A. *Dvukhrоторные винтовые и прямозубые компрессоры* [Twin-rotor screw and spur compressors]. Kazan, FEN Publ., 2000. 638 p. (In Russ.).
- [7] Sakun I.A. *Vintovye kompressory* [Screw compressors]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970. 400 p. (In Russ.).
- [8] Basha N., Kovacevic A., Rane S. Numerical investigation of oil injection in screw compressors. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 193, art. 116959, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116959>
- [9] Liu G., Xing Z., Sun S. et al. Analysis on performance of screw compressor in MVR system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 604, art. 012002, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/604/1/012002>

- [10] Rane S.R., Kovacevic A., Akhtar K. et al. Thermal analysis of a twin screw vacuum pump using CFD model. *ICEC*, 2024, art. 2796. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2796> (accessed: 15.12.2025).
- [11] Saravana A., Liu H., Able N. et al. Conjugate heat transfer analysis of a twin-screw compressor with 4-6 configuration and internal cooling channels. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2022, vol. 1267, art. 012014, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1267/1/012014>
- [12] Li D., He Z., Wang C. et al. Simulation of dry screw vacuum pumps based on chamber model and thermal resistance network. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 211, art. 118460, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118460>
- [13] Patel B., Rane S., Kovacevic A. et al. Infrared-thermography and numerical investigation of conjugate heat transfer in roots blower. *ICEC*, 2022, vol. 2709. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2709/> (accessed: 15.12.2025).
- [14] Daemgen U., Hadamitzky P., Dohmann J. Thermal expansion in liquid-injected screw compressors. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 425, art. 012010, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/425/1/012010>
- [15] Sayfetdinov A.G. *Sovershenstvovanie metoda rascheta rabocheho protsessa rotornogo kompressora vnutrennego szhatiya s ispolzovaniem rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy teploobmena v rabochey polosti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the method for calculating the operating process of a rotary internal compression compressor using the results of experimental studies of heat transfer in the working cavity. Kand. tech. sci. diss.]. Kazan, KNITU Publ., 2013. 190 p. (In Russ.).
- [16] Sharapov I.I. *Razrabotka metodiki izmereniya i rascheta parametrov protsessa teploobmena v shesterenchatom kompressore s tselyu povysheniya tochnosti rascheta rabocheho protsessa*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a method for measuring and calculating heat transfer process parameters in a gear compressor in order to improve the accuracy of operating process calculations. Kand. tech. sci. diss.]. Kazan, KGTU Publ., 2009. 146 p. (In Russ.).
- [17] Chang M.-S., Park J., Kim S.-T. et al. A study on the thermal characteristics of dry vacuum pump with vertical screws. *J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng.*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 67–74, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.2.067>
- [18] Tam T., Kovacevic A., Milligan W. et al. Experimental investigation of screw compressor clearance monitoring techniques. *ICEC*, 2022, vol. 2715. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2715/> (accessed: 15.12.2025).
- [19] Laskin A.A., Kapustin E.N., Raykov A.A. et al. [Experimental study of pumping characteristics of a screw vacuum pump]. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologii — 2024. Mat. 31-y Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Vacuum Engineering and Technology — 2024. Proc. 31st Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Sankt-Peterburg, SPbGETU LETI Publ., 2024, pp. 118–122. (In Russ.).
- [20] Vlasenkov A.I., Laskin A.A., Burmistrov A.V. [Temperature measurement of bearing assemblies. Analysis of screw vacuum pump bearing failure]. *Tekhnika i tekhnologicheskie protsessy teplovykh i kholodilnykh ustanovok. Mat. Vseros. studench. nauch.-tekh. konf.* [Engineering and Technological Processes of Heating and Refrigeration Units. Proc. Russ. Stud. Sci.-Tech. Conf.]. Kazan, KNITU Publ., 2024, pp. 120–122. (In Russ.).
- [21] Isaev A.A., Raykov A.A., Burmistrov A.V. et al. Thermomentering of roots vacuum pump. *Vestnik RVO*, 2023, no. 2, pp. 12–19. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.11.2025

Информация об авторах

ЛАСКИН Арсений Александрович — аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: arseni0602@gmail.com).

КАПУСТИН Артур Евгеньевич — аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: vacma@inbox.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).

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).

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:

Ласкин А.А., Капустин А.Е., Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Термометрирование рабочих элементов безмасляного винтового вакуумного насоса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 9, с. 67–75.

Please cite this article in English as:

Laskin A.A., Kapustin A.E., Raykov A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V. Temperature monitoring of working components in an oil-free screw vacuum pump. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 9, pp. 67–75.

Information about the authors

LASKIN Arseniy Alexandrovich — 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: arseni0602@gmail.com).

KAPUSTIN Artur Evgenevich — 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: vacma@inbox.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).

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).

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).