

УДК 621.521

doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-37-43

Анализ энергетических характеристик безмасляного спирального вакуумного насоса

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

Казанский национальный исследовательский технологический университет

An Analysis of Power Characteristics of Oil-Free Scroll Vacuum Pumps

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

Kazan National Research Technological University

На основании индикаторных диаграмм, полученных с помощью высокоскоростных датчиков давления, рассчитаны значения индикаторной мощности безмасляного спирального вакуумного насоса. Проведено сопоставление полученных данных и результатов расчета индикаторной мощности с помощью математической модели рабочего процесса насоса. Показано, что расхождение расчетных и экспериментальных индикаторных мощностей, не превышает 4 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели. Полная мощность спирального насоса выше индикаторной более чем в 2 раза вследствие потерь на трение торцевых уплотнителей о торцевые диски ответных спиральных элементов, потерь на трение в сальниковых уплотнителях и подшипниках качения и потерь коэффициента полезного действия электродвигателя. Рассмотрено влияние радиального зазора между спиральными элементами на потребляемую мощность. Установлено, что при низком давлении, близком к предельному остаточному, мощность с увеличением зазора растет, а при давлении на входе, превышающем 40 кПа, — падает. Проведенный анализ позволяет выбрать оптимальные геометрические параметры спиральных элементов и повысить энергоэффективность насоса для конкретных условий работы.

Ключевые слова: спиральный насос, индикаторная мощность, радиальный зазор, перетекания газа, полная мощность, индикаторные диаграммы

This paper presents an analysis of the indicator power of an oil-free scroll vacuum pump based on the indicator diagrams obtained through high-speed pressure sensors. These values are compared with the results of calculations using a mathematical model of the pump working process. It is shown that the divergence of the calculated results and experimental values does not exceed 4%, which confirms the adequacy of the developed mathematical model. The total power of the scroll pump exceeds the indicator power by more than 2 times due to the friction losses between the face seals and disks of the reciprocal scroll elements, friction losses in the stuffing box seals and rolling bearings, as well as due to the coefficient of efficiency of the motor. The influence of the radial clearance between the scroll elements on the power consumption is considered. It is shown that at low pressures nearing the ultimate pressure, the power increases with the increased clearance, while at inlet pressures exceeding 40 kPa it decreases. The performed analysis can be used for selecting the optimal geometrical parameters of the scroll elements and increasing power efficiency of the pump depending on specific operating conditions.

Keywords: scroll pump, indicator power, radial clearance, gas flow, full power, indicator diagrams

Повышенные требования к энергоэффективности и экологичности, предъявляемые потребителями вакуумного оборудования, диктуют необходимость совершенствования средств фор- и высоковакуумной откачки [1–3]. Бесконтактные вакуумные насосы благодаря отсутствию паров масла позволяют создавать «чистые» производства с минимальным воздействием на технологические процессы и окружающую среду [4, 5]. Повысить энерго-

эффективность машин можно на основе детального изучения влияния всех факторов на процесс откачки и выбора их оптимальных значений.

Одним из самых перспективных в классе машин низкого и среднего вакуума остается насос вакуумный спиральный (НВСП) (рис. 1) [6, 7]. Как и у всех бесконтактных насосов, на его откачные и энергетические характеристики определяющее влияние оказывают обратные

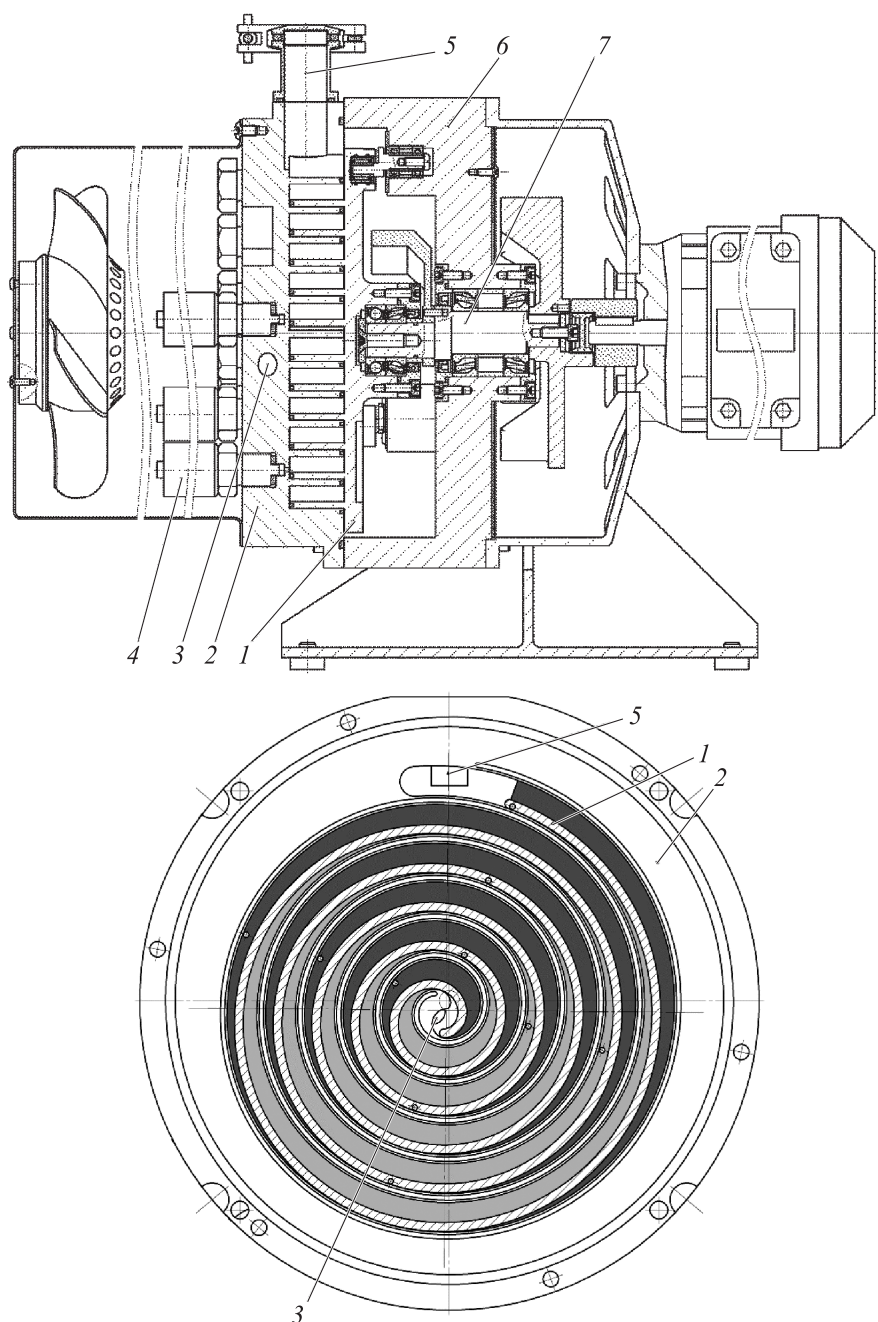


Рис. 1. Схема НВСП-12 с указанием расположения датчиков давления:
1 — подвижный спиральный элемент; 2 — неподвижный спиральный элемент; 3 — окно выхлопа;
4 — датчики давления МИДА; 5 — патрубок всасывания; 6 — корпус; 7 — вал

перетекания через щелевые каналы между спиральными элементами [8, 9].

Для анализа энергоэффективности НВСП и нахождения способов ее повышения применяются математические модели процесса откачки [10–12]. При этом математические модели требуют верификации. Кроме того, значительную часть затрат мощности составляют механические потери на трение, которые зависят от целого ряда неустойчивых факторов и могут различаться для каждой конкретной машины. Поэтому выделение и анализ индикаторной мощности, расходуемой на процесс откачки, из общей мощности, идущей на работу насоса, становится актуальной задачей.

Цель работы — анализ влияния радиального зазора на энергетические характеристики НВСП для повышения его энергоэффективности.

Для экспериментального определения индикаторной мощности необходимо измерить индикаторные диаграммы, т. е. зависимости давления в рабочей полости p от угла поворота приводного вала (или от объема рабочей полости V). Такие измерения выполнены в работах [13, 14], где доработка насоса НВСП-12 производства АО «Вакууммаш» (г. Казань) позволила разместить датчики давления на неподвижном спиральном элементе.

Датчики давления устанавливали через 270 или 450° по длине пера спирали и с помощью цилиндрического канала соединяли с рабочими полостями насоса. Таким образом, удалось осуществить практически полный контроль за одной порцией откачиваемого газа при ее переносе с входа на выход насоса.

Полученные в результате эксперимента зависимости давления в рабочей полости p от времени при частоте вращения приводного вала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и объеме рабочей полости V пересчитаны в индикаторные диаграммы в координатах p – V (рис. 2).

Расчет работы на всасывание, сжатие и нагнетание в полости проведен по формуле

$$L = \int_0^{\varphi_{p.n}} p dV, \quad (1)$$

где $\varphi_{p.n}$ — продолжительность рабочего процесса.

Так как в НВСП процесс откачки происходит одновременно в двух параллельно включенных полостях, мощность определяется выражением

$$W = (L_1 + L_2)n, \quad (2)$$

где L_1 и L_2 — индикаторная работа для каждой отсеченной полости НВСП.

Для этих же условий в работе [15] индикаторные диаграммы получены с использованием математической модели процесса НВСП, согласно формулам (1), (2) найдена расчетная индикаторная мощность.

На рис. 3 показаны зависимости расчетной и экспериментальной индикаторных мощностей НВСП от входного давления $p_{вх}$ при радиальном зазоре между спиральными элемента-

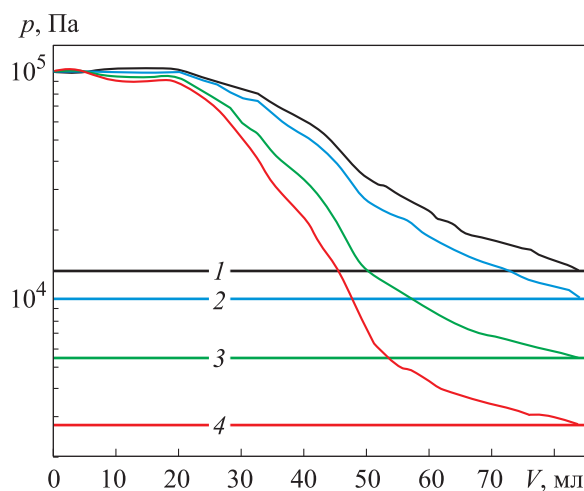


Рис. 2. Экспериментальные индикаторные диаграммы в координатах p – V для внутренней полости НВСП при частоте вращения приводного вала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и давлении на входе в насос $p_{вх} = 13,30$ (1), 10,64 (2), 5,32 (3) и 2,66 кПа (4)

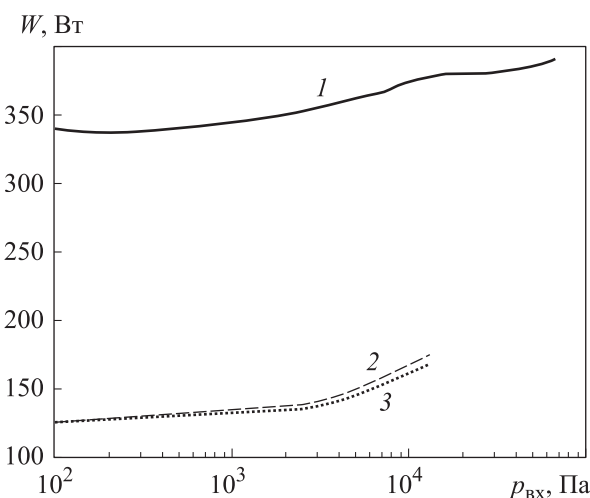


Рис. 3. Зависимость полной экспериментальной мощности на электродвигателе (1), экспериментальной (2) и расчетной (3) индикаторных мощностей НВСП от входного давления при радиальном зазоре $\delta = 0,105 \text{ мм}$

ми $\delta = 0,105$ мм. Там же нанесена кривая полной экспериментальной мощности, потребляемой насосом.

Как видно из рис. 3, расхождение расчетных и экспериментальных значений индикаторной мощности, не превышает 4 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели.

Зависимость полной экспериментальной мощности на электродвигателе от входного давления имеет аналогичный характер, что и зависимости экспериментальной и расчетной индикаторных мощностей НВСП от давления $p_{вх}$, но отличается от них на величину механических потерь. В первую очередь это потери на трение торцевых уплотнителей о торцевые диски ответных спиральных элементов, потери на трение в сальниковых уплотнителях и подшипниках качения и потери КПД электродвигателя. Полная мощность превышает индикаторную более чем в 2 раза, что характерно для насосов низкого и среднего вакуума.

Из рис. 3 также следует, что до 2 кПа входное давление оказывает слабое влияние на индикаторную мощность вследствие малого количества сжимаемого газа. Рост мощности при приближении к атмосферному давлению объясняется увеличением количества сжимаемого газа.

Интересно рассмотреть, как влияет изменение радиального зазора между спиральными элементами на потребляемую мощность. Как

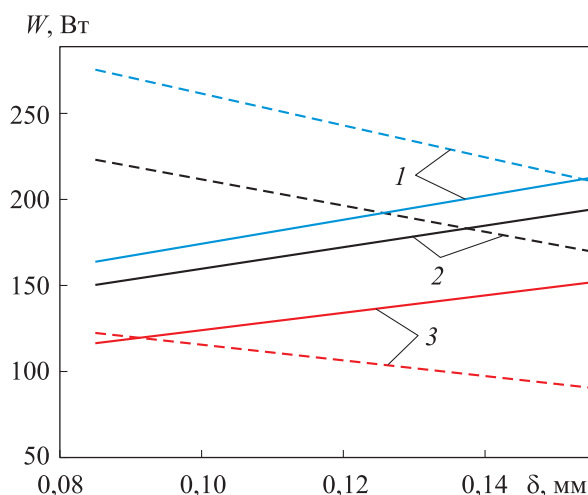


Рис. 4. Зависимость расчетной индикаторной мощности W от радиального зазора δ при входном давлении $p_{вх} = 1$ (сплошные линии) и 80 кПа (штриховые линии) и различных значениях частоты вращения:

1 — $n = 1750 \text{ мин}^{-1}$; 2 — $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 3 — $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$

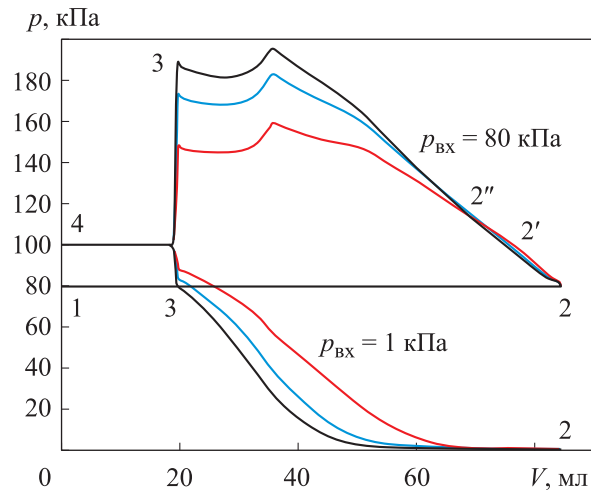


Рис. 5. Индикаторные диаграммы НВСП при радиальном зазоре $\delta = 0,085$ (—), $0,105$ (—) и $0,155$ мм (—) и входном давлении $p_{вх} = 1$ и 80 кПа на разных этапах работы насоса: 1–2 — всасывание; 2–3 — сжатие; 3–4 — нагнетание

следует из рис. 4, при низком давлении, близком к предельному остаточному, с увеличением зазора мощность растет, а при давлении на входе, превышающем 40 кПа, падает.

Объяснение данной закономерности следующее: при увеличении радиального зазора происходит рост перетеканий. Однако при низком входном давлении перетекания направлены от выхода к входу, что приводит к росту давления во всех отсеченных объемах (рис. 5) и, как следствие, к повышению индикаторной мощности.

При высоком входном давлении имеет место пережатие газа в центральных витках, и давление в отсеченном объеме превышает таковое на выходе. Поэтому часть перетеканий будет направлена в сторону выхода, и, несмотря на повышение давления на периферийных витках, увеличение зазора приводит к стравливанию газа из центральных витков, и уменьшению индикаторной мощности.

Если насос работает при высоком входном давлении (см. рис. 5), то давление в отсеченном объеме в точке 2' превышает давление выхода, и происходит пережатие газа. До точки 2'' перетекания преимущественно направлены в сторону входа, поэтому рост зазора сопровождается повышением давления в отсеченном объеме. После точки 2'' поток перетеканий в направлении выхода превышает таковой в сторону входа, и увеличение зазора приводит к снижению давления в отсеченном объеме и, соответственно, к уменьшению мощности.

Выводы

1. Плавное увеличение радиального зазора между спиральными элементами к центру позволяет снизить индикаторную мощность при высоком входном давлении. При этом увеличение мощности при низком давлении будет меньше, чем при росте зазора на ту же величину при его постоянном значении.

2. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по мощности доказывает адек-

ватность разработанной математической модели рабочего процесса НВСП и подтверждает возможность ее использования для расчета энергетических характеристик.

3. Проведенный анализ влияния радиального зазора и входного давления на индикаторную мощность дает возможность выбрать оптимальные геометрические параметры спиральных элементов, позволяющие повысить энергоэффективность насоса для конкретных условий работы.

Литература

- [1] Ануфриева И.В., Васильев Ю.К., Кеменов В.Н., Нестеров С.Б., Строгова Т.С. Современное состояние рынка безмасляных форвакуумных средств откачки. *Вакуумная техника и технология*, 2003, т. 13, № 2, с. 93–99.
- [2] Васильева Т.С., Васильев Ю.К., Нестеров С.Б. Анализ современного рынка оборудования систем создания и поддержания вакуума. *Вакуумная наука и техника. Матер. XII науч.-техн. конф.*, Судак, сентябрь 2005, Москва, МИЭМ, 2005, с. 79–86.
- [3] Hablani M.H. *High-vacuum technology: a practical guide*. New York, Marcel Dekker, 1997. 547 p.
- [4] Hablani M.H. Emerging technologies of oil-free vacuum pumps. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1988, vol. 6(3), pp. 1177–1182, doi: 10.1116/1.575672
- [5] Bez E., Guarnaccia D., Hablani M. A new oil-free mechanical vacuum pump. *AIP Conference Proceedings*, 1988, vol. 171(262), pp. 262–267, doi: 10.1063/1.37315
- [6] Sawada T., Kamada S., Sugiyama W., Takemoto J., Haga S., Tsuchiya M. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1999, vol. 53, pp. 233–237, doi: 10.1016/S0042-207X(98)00383-2
- [7] Su Y., Sawada T., Takemoto J., Haga S. Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1996, vol. 47, pp. 815–818.
- [8] Raykov A.A., Tyurin A.V., Burmistrov A.V., Salikeev S.I., Bronstein M.D., Fomina M.G. Calculation of backward flow in channels with moving walls in oil free non-contact vacuum pumps. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030024, pp. 1–6, doi: 10.1063/1.5122074
- [9] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M., Fomina M., Raykov A. Conductance calculation of channels in laminar gas flow regime at an arbitrary pressure difference. *Vacuum*, 2014, vol. 107, pp. 178–183, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.01.016
- [10] Moore E.J., Muntz E.P., Erye F., Myung N., Orient O., Shcheglov K., Wiberg D. Analysis of a Two Wrap Mesoscale Scroll Pump. *AIP Conference Proceedings*, 2003, pp. 1033–1040, doi: 10.1063/1.1581653
- [11] Li Z., Li L., Zhao Y., Bu G., Shu P. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2009, vol. 84, pp. 415–421, doi: 10.1016/j.vacuum.2009.09.005
- [12] Паранин Ю.А., Хисамеев И.Г. Математическая модель рабочего процесса спирального компрессора сухого сжатия с учетом теплообмена и упругой деформации спиралей. *Компрессорная техника и пневматика*, 2011, № 5, с. 16–23.
- [13] Тюрин А.В., Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Капустин Е.Н. Индикаторные диаграммы спирального вакуумного насоса. *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2018. Матер. IX Междунар. науч.-техн. конф.*, Казань, 5–7 декабря 2018, Казань, КНИАТ, 2018, с. 115–119.
- [14] Тюрин А.В., Райков А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В. Экспериментальные индикаторные диаграммы безмасляного спирального вакуумного насоса. *Компрессорная техника и пневматика*, 2018, № 4, с. 12–16.
- [15] Tyurin A., Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pumps. *Vacuum in Forschung und Praxis*, 2019, vol. 31, iss. 4, pp. 34–37, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201900717>

References

- [1] Anufriyeva I.V., Vasil'yev Yu.K., Kemenov V.N., Nesterov S.B., Strogova T.S. The current state of the oil-free forevacuum pumping market. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 93–99 (in Russ.).
- [2] Vasil'yeva T.S., Vasil'yev Yu.K., Nesterov S.B. Analysis of the modern market of equipment for creating and maintaining vacuum systems. *Vakuumnaya nauka i tekhnika. Mater. XII nauch.-tekhn. konf.* [Vacuum science and technology. Materials of the XII Scientific and Technical Conference]. Moscow, 2005, pp. 79–86.
- [3] Hablanian M.H. *High-vacuum technology: a practical guide*. New York, Marcel Dekker, 1997. 547 p.
- [4] Hablanian M.H. Emerging technologies of oil-free vacuum pumps. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1988, vol. 6(3), pp. 1177–1182, doi: 10.1116/1.575672
- [5] Bez E., Guarnaccia D., Hablanian M. A new oil-free mechanical vacuum pump. *AIP Conference Proceedings*, 1988, vol. 171(262), pp. 262–267., 1988, vol. 171(262), pp. 262–267, doi: 10.1063/1.37315
- [6] Sawada T., Kamada S., Sugiyama W., Takemoto J., Haga S., Tsuchiya M. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1999, vol. 53, pp. 233–237, doi: 10.1016/S0042-207X(98)00383-2
- [7] Su Y., Sawada T., Takemoto J., Haga S. Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 1996, vol. 47, pp. 815–818.
- [8] Raykov A.A., Tyurin A.V., Burmistrov A.V., Salikeev S.I., Bronstein M.D., Fomina M.G. Calculation of backward flow in channels with moving walls in oil free non-contact vacuum pumps. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030024, pp. 1–6, doi: 10.1063/1.5122074
- [9] Salikeev S., Burmistrov A., Bronshtein M., Fomina M., Raykov A. Conductance calculation of channels in laminar gas flow regime at an arbitrary pressure difference. *Vacuum*, 2014, vol. 107, pp. 178–183, doi: 10.1016/j.vacuum.2014.01.016
- [10] Moore E.J., Muntz E.P., Erye F., Myung N., Orient O., Shcheglov K., Wiberg D. Analysis of a Two Wrap Mesoscale Scroll Pump. *AIP Conference Proceedings*, 2003, pp. 1033–1040, doi: 10.1063/1.1581653
- [11] Li Z., Li L., Zhao Y., Bu G., Shu P. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump. *Vacuum*, 2009, vol. 84, pp. 415–421, doi: 10.1016/j.vacuum.2009.09.005
- [12] Pararin Yu.A., Khisameyev I.G. Mathematical model of oil-free scroll compressor working process including heat exchange and elastic deformation of the scrolls. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2011, no. 5, pp. 16–23 (in Russ.).
- [13] Tyurin A.V., Raykov A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V., Kapustin E.N. Indicator charts of a spiral vacuum pump. *Innovatsionnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i materialy — 2018. Mater. IX Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials — 2018. Materials of the IX International Scientific and Technical Conference]. Kazan, 2018, pp. 115–119.
- [14] Tyurin A.V., Raykov A.A., Salikeev S.I., Burmistrov A.V. Experimental indicator diagrams of scroll vacuum pump. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2018, no. 4, pp. 12–16 (in Russ.).
- [15] Tyurin A., Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pumps. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 2019, vol. 31, iss. 4, pp. 34–37, doi: <https://doi.org/10.1002/vipr.201900717>

Статья поступила в редакцию 06.03.2020

Информация об авторах

ТЮРИН Алексей Викторович — аспирант кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок». Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 68, e-mail: tyurin92@mail.ru).

БУРМИСТРОВ Алексей Васильевич — доктор технических наук, проректор по учебной работе, 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).

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).

Information about the authors

TYURIN Aleksei Viktorovich — 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: tyurin92@mail.ru).

BURMISTROV Aleksei Vasilievich — 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).

RAYKOV Aleksei 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: alraykov@kstu.ru).

SALIKEEV Sergei 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., Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И. Анализ энергетических характеристик безмасляного спирального вакуумного насоса. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 8, с. 37–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-37-43

Please cite this article in English as:

Tyurin A.V., Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeev S.I. An Analysis of Power Characteristics of Oil-Free Scroll Vacuum Pumps. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 37–43, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-37-43