

УДК 621.521

doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-34-40

Исследование процесса откачки конденсируемых паров безмасляными спиральными вакуумными насосами

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

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Experimental Study of Pumping Condensable Vapors by Oil Free Vacuum Scroll Pumps

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

Kazan National Research Technological University

При эксплуатации вакуумного насоса достаточно часто приходится откачивать пары жидкостей или парогазовые среды, которые могут конденсироваться в его рабочих полостях. Для предотвращения конденсации в механических объемных насосах, в том числе в спиральных, применяют газобалластное устройство. Основными параметрами насоса с газобалластным устройством являются наибольшее давление водяного пара на входе и максимальная производительность по водяному пару. Экспериментальным путем получены основные параметры безмасляного спирального вакуумного насоса. Для проведения экспериментов разработан стенд, позволяющий измерять быстроту действия, поток газа через газобалластное устройство и температуру газа на выходе насоса. Предложена методика расчета парциального давления водяного пара в спиральном насосе с помощью математической модели процесса откачки. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошую сходимость.

Ключевые слова: спиральный вакуумный насос, газобалластное устройство, парциальное давление, наибольшее давление пара, максимальная производительность насоса

When operating a vacuum pump, it is often necessary to pump out liquid vapors or vapor-gas media that can condense in its working cavities. To prevent condensation in displacement pumps including scroll pumps, gas ballast device is used. The maximum tolerable water vapor pressure at the inlet and maximum pump capacity by water vapor are the main parameters of a pump with gas ballast device. The highest water vapor pressure at the inlet and the maximum capacity of the oil-free scroll vacuum pump by water vapor were determined experimentally. For this purpose pumping speed, gas flow through the gas ballast device, and gas temperature at the scroll vacuum pump outlet were measured on a specially designed stand. A method for calculating the partial pressure of water vapor in scroll vacuum pumps using a mathematical model of pumping process is proposed. Experimental and calculated results are in good agreement.

Keywords: scroll vacuum pump, gas ballast, partial pressure, highest pressure of water vapor, maximal pump capacity

Некоторые вакуумные технологические процессы, например, сушка, пропитка и дистилляция [1, 2], предполагают работу насоса в условиях откачки среды повышенной влажности. Поэтому средства для откачки водяного пара (ВП) должны обеспечивать ее эффективность без вреда для насоса.

В процессе сжатия в рабочей полости насоса поднимаются парциальные давления всех компонентов откачиваемой смеси, и при достижении давления насыщения происходит конденсация ВП. Появление жидкости в насосе приводит к его перегреву и росту остаточного давления, а также к коррозии рабочих элементов и сокращению срока службы насоса [3].

Все изложенное относится не только к вакуумным насосам с масляным уплотнением, но и к безмасляным средствам откачки [4], в частности к насосу вакуумному спиральному (НВСп). Конструктивная схема НВСп с односторонним подвижным спиральным элементом приведена на рис. 1.

Для предотвращения конденсации в механических объемных насосах, включая НВСп, применяют газобалластное устройство (ГБУ) [5, 6], которое представляет собой систему подачи балластного газа в рабочую полость насоса, в результате чего процесс нагнетания начинается до момента образования конденсата.

В качестве балластного газа чаще всего используют атмосферный воздух, хотя в наиболее ответственных случаях может быть выбран другой вариант, например, сухой азот.

Основными параметрами насоса с ГБУ являются наибольшее давление ВП на входе и

максимальная производительность по ВП. Эти величины зависят от сочетания большого количества конструктивных и эксплуатационных факторов: расхода потока газа через ГБУ, скорости действия насоса, температур газа на входе и выходе и т. д.

Исследованию процессов, происходящих в вакуумных насосах с масляным уплотнением, посвящено достаточное количество работ. Из безмасляных насосов исследование влияния ГБУ на откачные характеристики проводилось только для многоступенчатого кулачково-зубчатого насоса с первой ступенью типа Рутс [7].

Цель работы — расчетно-экспериментальное исследование влияния потока балластного газа на характеристики НВСп.

Методы исследования. Перечисленные параметры насосов при работе с ВП определяются по методике ГОСТ 32974.1–2016 («Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Общие положения»). В его основе лежит косвенный метод определения наибольшего давления ВП. Этот параметр находится как максимальное давление чистого ВП на входе в насос, при котором не происходит конденсации.

Давление насыщенного ВП на выходе из насоса рассчитывается по формуле

$$p_s = \alpha p_{\text{атм}} - \frac{\alpha p_{\text{атм}}}{\frac{p_{\text{вх}} S_{\text{вх}}}{p_{\text{в}} S_{\text{ГБУ}}} + \frac{p_{\text{а}}}{p_{\text{в}}} + 1}, \quad (1)$$

где α — коэффициент повышения давления при открытии выпускного клапана; $p_{\text{атм}}$ — ат-

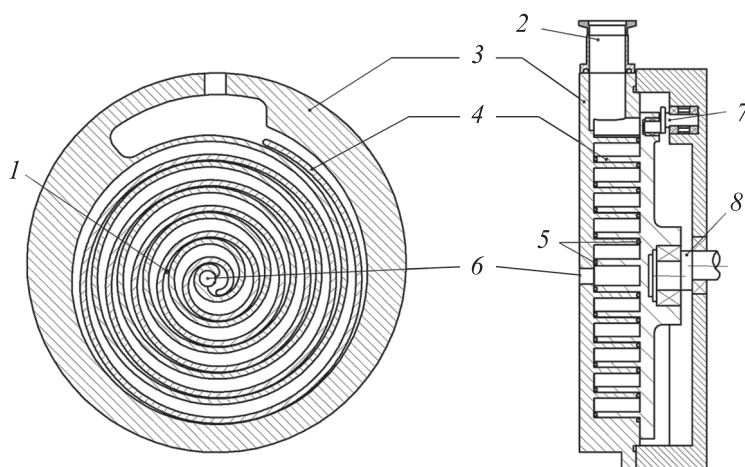


Рис. 1. Конструктивная схема НВСп с односторонним подвижным спиральным элементом:
1 — отверстие ГБУ; 2 — входной патрубок; 3 и 4 — неподвижная и подвижная спираль;
5 — торцевые уплотнители; 6 — выпускное отверстие; 7 — противоповоротное устройство; 8 — вал

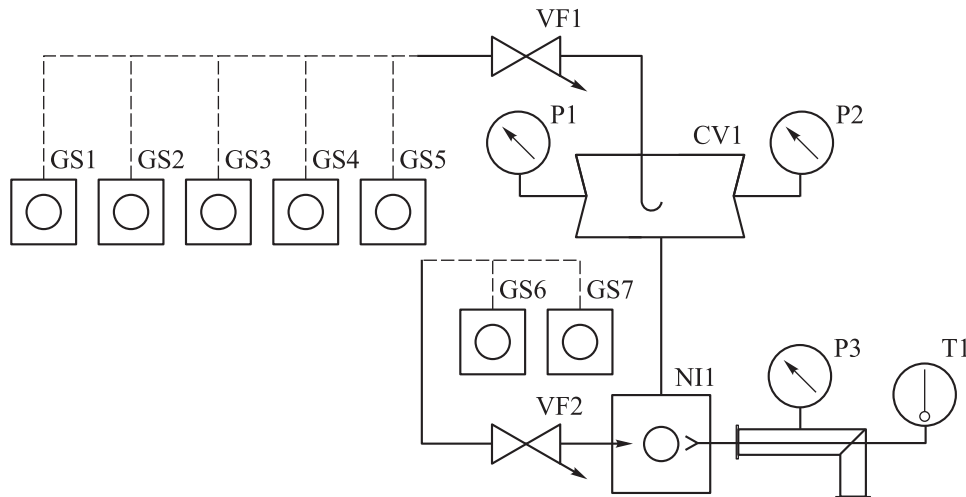


Рис. 2. Вакуумная схема стенда экспериментальных испытаний ГБУ НВСП: CV1 — измерительная камера; P1–P3 — вакуумметры; VF1, VF2 — натекатели; GS1–GS3, GS6, GS7 — газовые счетчики; GS4, GS5 — регуляторы расхода газа; T1 — термопара; NI1 — исследуемый насос

мосферное давление; $p_{вх}$ и $S_{вх}$ — давление и быстрота действия насоса на его входе; $p_{в}$ — парциальное давление воздуха в атмосфере; $S_{ГБУ}$ — объемный расход газа через ГБУ; $p_{а}$ — парциальное давление ВП в атмосферном воздухе.

Температура насыщенного ВП определяется выражением

$$T_s = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{R}{L} \ln \frac{p_s}{p_{T_0}}}, \quad (2)$$

где T_0 — температура ВП на входе в насос; R — универсальная газовая постоянная; L — энергия молярного испарения; p_{T_0} — давление насыщенного ВП при температуре T_0 .

Производительность насоса по ВП вычисляется как

$$m_w = \frac{p_{в\max} S_{вх} \mu_{в}}{RT_{вх}}, \quad (3)$$

где $p_{в\max}$ — наибольшее давление ВП на входе в насос; $\mu_{в}$ — молярная масса воды; $T_{вх}$ — температура газа на входе в насос.

Согласно методике, приведенной в ГОСТ 32974.1–2016, параметры, входящие в состав уравнений (1)–(3), определяются в результате экспериментов. Для проведения экспериментальных испытаний ГБУ НВСП создан стенд [8], вакуумная схема которого показана на рис. 2.

Поток газа на входе в насос, устанавливаемый натекателем VF1, измерялся газовыми счетчиками и регуляторами расхода газа GS1–GS5, давление в вакуумной камере — деформационно-термопарными вакуумметрами P1 и P2. Для определения температуры и давления на выходе из насоса установлен угловой патрубок, в котором закреплена хромель-копелевая термопара [8]. С помощью натекателя VF2 регулировался поток балластного газа, измеряемый газовыми счетчиками GS6 и GS7.

В качестве объектов исследования использованы японские спиральные вакуумные насосы ISP-250 фирмы Anest Iwata [9] и отечественный насос НВСП-12 производства АО «Вакууммаш» [10].

Результаты исследования и их обсуждение.

Полученные экспериментальные зависимости быстроты действия насоса S_n и объемного расхода балластного газа через ГБУ $S_{ГБУ}$ от давления на входе в насос $p_{вх}$ приведены на рис. 3.

Экспериментальные зависимости температуры газа на выходе из насоса от давления на входе в насос для НВСП и ISP-250 показаны на рис. 4. Там же приведены построенные по формуле (2) зависимости температуры насыщенного ВП от давления $p_{вх}$ для НВСП и ISP-250. Согласно методике, приведенной в ГОСТ 32974.1–2016, точка пересечения этих графиков определяет наибольшее давление ВП на входе в насос.

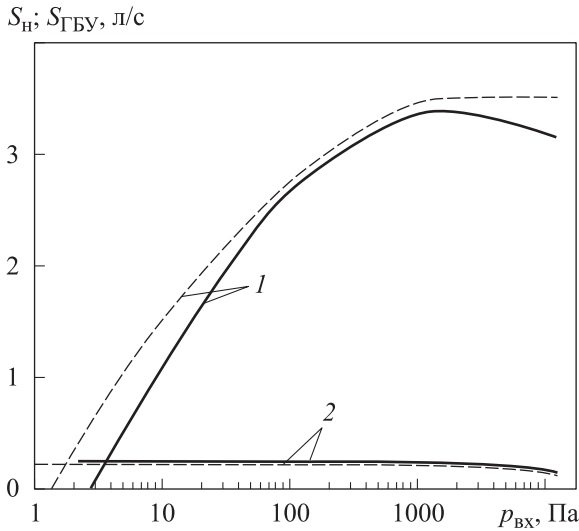


Рис. 3. Экспериментальные зависимости быстроты действия S_n (1) и объемного расхода балластного газа через ГБУ $S_{ГБУ}$ (2) от давления на входе в насос $p_{вх}$: — НВСп-12; ---- ISP-250

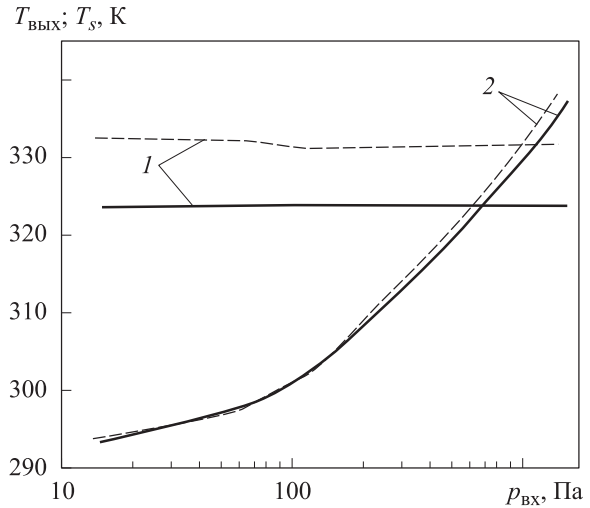


Рис. 4. Зависимости температур газа на выходе из насоса $T_{ввых}$ (1) и насыщенного ВП T_s (2) от давления на входе в насос $p_{вх}$: — НВСп; ---- ISP-250

Значения наибольшего давления ВП на входе в насос и его производительности по ВП указаны в таблице.

Наибольшее значение давления ВП на входе в насос может быть получено и расчетным путем. Для этого математическая модель рабочего процесса НВСп, приведенная в работе [11], была дополнена расчетом давления ВП в рабочей полости.

Зависимость массы ВП в рабочей полости от угла поворота спирали φ можно найти исходя из дифференциального уравнения сохранения массы

$$\frac{dm_{в(n)}}{d\varphi} = \left(W_{вх} M_{вх} + W_{ГБУ} M_{ГБУ} + W_{ввых} M_{ввых} + \frac{m_{в(n-1)}}{m_{г(n-1)}} M_{n-1} + \frac{m_{в(n+1)}}{m_{г(n+1)}} M_{n+1} - \frac{m_{в(n)}}{m_{г(n)}} M_n \right) \frac{1}{\omega},$$

где $m_{в(n)}$, $m_{в(n-1)}$, $m_{в(n+1)}$ — массы ВП в соответствующих полостях; n — номер полости; $W_{вх}$, $W_{ГБУ}$ и $W_{ввых}$ — массовая доля воды на входе, в ГБУ и на выходе соответственно; $M_{вх}$, $M_{ГБУ}$ и $M_{ввых}$ — массовый расход газа на входе, в ГБУ и на выходе соответственно; $m_{г(n-1)}$, $m_{г(n)}$,

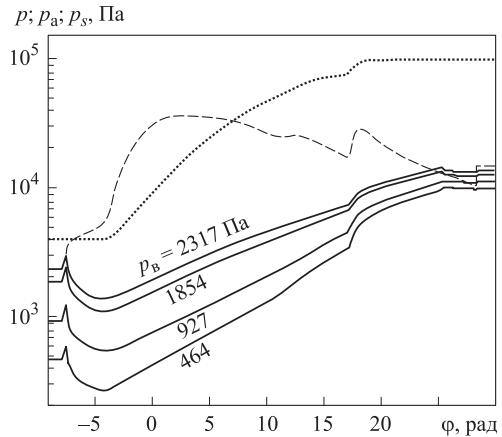


Рис. 5. Расчетные зависимости параметров от угла поворота спирали φ : — полного давления p ; — — — — давления насыщения ВП p_s ; ---- — парциального давления p_a при $p = 4000$ Па и различных значениях давления ВП на входе p_v

$m_{г(n+1)}$ — полные массы газа в соответствующих полостях; M_{n-1} , M_{n+1} , M_n — массовые расходы газа в соответствующих полостях; ω — угловая скорость ротора.

Результатом расчета являются зависимости полного давления ВП, парциального давления ВП и температуры газа в рабочей полости от угла поворота спирали [12]. По известной тем-

Значения наибольшего давления ВП на входе в насос и производительности насоса по ВП

| Объект исследования | Номинальная быстрота действия, м ³ /ч | Наибольшее давление ВП, Па | Производительность насоса по ПВ, г/сут |
|---------------------|--|----------------------------|--|
| НВСп-12 | 12,0 | 750 | 1420 |
| ISP-250 | 12,5 | 1000 | 1996 |

пературе может быть получено давление насыщения в полости насоса (рис. 5). Пересечение графиков полного давления ВП и давления насыщения ВП означает появление конденсата в рабочей полости.

Как видно из рис. 5, при давлении ВП на входе $p_v < 800$ Па линии парциального давления ВП не пересекаются с линией давления насыщения. Следовательно, это давление является наибольшим давлением ВП, что соответствует значению, полученному экспериментально.

Выводы

1. Получены значения потока балластного газа и производительности по ВП для отечественных и зарубежных безмасляных спиральных насосов.

2. Показано, что математическая модель расчета парциального давления ВП позволяет определять влияние различных параметров на эксплуатационные характеристики спиральных насосов с ГБУ без дополнительных экспериментов.

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] Хоффман Д., Сингх Б., Томас Дж. *Справочник по вакуумной технике и технологиям*. Москва, Техносфера, 2011. 736 с.
- [3] Пузанков С.М., Тюрин А.В., Новоженин О.А., Райков А.А., Гаврилов А.В., Якупов Р.Р. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния газобалласта на характеристики спирального вакуумного насоса. *Вакуумная техника и технология. Матер. 8-й Росс. студенческой науч.-техн. конф.*, Казань, 17–20 апреля 2017, Казань, Изд-во КНИТУ, 2017, с. 133–134.
- [4] Демихов К.Е., Никулин Н.К. Безмасляные средства откачки для низкого и среднего вакуума. *Конверсия в машиностроении*, 2007, № 4–5, с. 78–80.
- [5] Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., ред. *Вакуумная техника: справочник*. Москва, Машиностроение, 2009. 590 с.
- [6] Фролов Е.С., Автономова И.В., Васильев В.И., Пластинин П.И., Никулин Н.К. *Механические вакуумные насосы*. Москва, Машиностроение, 1989. 288 с.
- [7] Laurenson L., Turrell D. The performance of a multistage dry pump operating under non-standard conditions. *Vacuum*, 1988, vol. 38(8–10), pp. 665–668, doi: 10.1016/0042-207x(88)90438-1
- [8] Бурмистров А.В., Гаврилов А.В., Саликеев С.И., Тюрин А.В., Пузанков С.М. Стенд исследования процесса откачки конденсируемых паров вакуумными насосами с газобалластным устройством. *Компрессорная техника и пневматика*, 2016, № 2, с. 17–20.
- [9] *Dry Scroll Vacuum Pumps*. USA, Anest Iwata, 2020. URL: <http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/> (accessed 15 October 2020).
- [10] Капустин Е.Н., Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Этапы разработки типоразмерного ряда отечественных безмасляных спиральных вакуумных насосов. *Вакуумная техника и технология*, 2015, т. 25, № 2, с. 176–180.
- [11] Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И., Бронштейн М.Д., Аляев В.А. Математическое моделирование процесса откачки конденсируемых паров безмасляным спиральным вакуумным насосом. *Вестник технологического университета*, 2015, т. 18, № 10, с. 147–149.
- [12] Якупов Р.Р., Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И. Расчет процесса теплообмена в математической модели спирального вакуумного насоса. *Компрессорная техника и пневматика*, 2017, № 4, с. 39–42.

References

- [1] Khablanyan M.Kh., Saksaganskiy G.L., Burmistrov A.V. *Vakuumnaya tekhnika. Oborudovaniye, proyektirovaniye, tekhnologii, ekspluatatsiya. Ch. 1. Inzhenerno-fizicheskiye osnovy* [Vacuum technology. Equipment, design, technologies, operation. Part 1. Engineering and physical bases]. Kazan, KNITU publ., 2013. 232 p.
- [2] Khoffman D., Singh B., Tomas Dzh. *Spravochnik po vakuumnoy tekhnike i tekhnologiyam* [Handbook of vacuum engineering and technologies]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2011. 736 p.
- [3] Puzankov S.M., Tyurin A.V., Novozhenin O.A., Raykov A.A., Gavrilov A.V., Yakupov R.R. Theoretical and experimental study of the effect of gas ballast on the characteristics of a spiral vacuum pump. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. Mater. 8 Ross. studencheskoy nauch.-tekhn. konf.* [Vacuum equipment and technology. Materials of the 8th Russian student scientific and technical conference]. 2017, Kazan, pp. 133–134.
- [4] Demikhov K.E., Nikulin N.K. Oil-free pumping means for low and medium vacuum. *Konversiya v mashinostroyenii*, 2007, no. 4–5, pp. 78–80 (in Russ.).
- [5] *Vakuumnaya tekhnika: spravochnik* [Vacuum technology: guide]. Ed. Demikhov K.E., Panfilov Yu.V. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2009. 590 p.
- [6] Frolov E.S., Avtonomova I.V., Vasil'yev V.I., Plastinin P.I., Nikulin N.K. *Mekhanicheskiye vakuumnyye nasosy* [Mechanical vacuum pumps]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1989. 288 p.
- [7] Laurenson L., Turrell D. The performance of a multistage dry pump operating under non-standard conditions. *Vacuum*, 1988, vol. 38(8–10), pp. 665–668, doi: 10.1016/0042-207x(88)90438-1
- [8] Burmistrov A.V., Gavrilov A.V., Salikeyev S.I., Tyurin A.V., Puzankov S.M. Stand for studies of condensed vapor pump process by vacuum pump with gas ballast device. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2016, no. 2, pp. 17–20 (in Russ.).
- [9] *Dry Scroll Vacuum Pumps*. USA, Anest Iwata, 2020. Available at: <http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/> (accessed 15 October 2020).
- [10] Kapustin E.N., Burmistrov A.V., Salikeyev S.I. Stages of development of a standard-size range of domestic oil-free spiral vacuum pumps. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 176–180 (in Russ.).
- [11] Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeyev S.I., Bronshteyn M.D., Alyayev V.A. Mathematical modeling of the process of pumping out condensed vapors by an oil-free spiral vacuum pump. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 10, pp. 147–149 (in Russ.).
- [12] Yakupov R.R., Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeyev S.I. A heat exchange process calculation method inside scroll vacuum pumps for mathematic models. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2017, no. 4, pp. 39–42 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.11.2020

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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тюрин А.В., Бурмистров А.В., Райков А.А., Саликеев С.И. Исследование процесса откачки конденсируемых паров безмасляными спиральными вакуумными насосами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 2, с. 34–40, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-34-40

Please cite this article in English as:

Tyurin A.V., Burmistrov A.V., Raykov A.A., Salikeev S.I. Experimental Study of Pumping Condensable Vapors by Oil Free Vacuum Scroll Pumps. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 2, pp. 34–40, doi: 10.18698/0536-1044-2021-2-34-40

Information about the authors

TYURIN Alexey Viktorovich — post-graduate student, 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 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).

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).