

УДК 621.521, 532.542

doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-52-59

Откачивание воздуха с примесями золотниковым вакуумным насосом

Н.Л. Великанов¹, В.А. Наумов²

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

² Калининградский государственный технический университет

Using a Spool Vacuum Pump for Pumping out air with Impurities

N.L. Velikanov¹, V.A. Naumov²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

² Kaliningrad State Technical University

Вакуумные откачивающие системы получили широкое распространение в различных отраслях науки и техники. Для исследования динамики откачивания воздуха с примесями предложена математическая модель, учитывающая гидравлическое сопротивление трубопровода и фильтра вакуумной откачивающей системы. Определены зависимости скорости откачки воздуха с примесями золотниковым вакуумным насосом PKS-016 от давления на его входе, давления и скорости течения газа вдоль оси трубопровода, массы аргона в рабочей камере от времени. Показано, что при отсутствии сетчатого фильтра и длине трубопровода менее 3 м для расчета можно применять упрощенную математическую модель, полагая равными давления газа в рабочей камере и на входе золотникового вакуумного насоса.

Ключевые слова: золотниковый вакуумный насос, откачка воздуха с примесями, сетчатый фильтр, скорость течения газа

Vacuum pumping systems are widely used in various branches of science and technology. The mathematical model taking into account the hydraulic resistance of the pipeline and the filter of the vacuum pumping system is proposed to study the dynamics of pumping out air with impurities. The dependences of the pumping speed of the spool vacuum pump PKS-016 on the pressure at the pump inlet, the pressure and velocity of gas along the pipeline axis, the mass of argon in the working tank on time are determined. It is shown that in the absence of a mesh filter and a pipeline length of less than 3 m, a simplified mathematical model can be used for the calculation, assuming that the pressures in the working chamber and at the inlet to the spool vacuum pump are equal.

Keywords: spool vacuum pump, pumping air with impurities, mesh filter, gas flow speed

Вакуумные откачивающие системы получили большое распространение в различных отраслях науки и техники. Опубликованы результаты многих экспериментальных и теоретических исследований их работы. Рассмотрено влияние пониженного давления газа на процесс дистилляции. Сформулированы требования к вакуумной системе. Разработана методика расчета механического вакуумного насоса для откачки

парогазовой смеси и рассмотрено влияние откачиваемого газа на скорость откачки.

Центр надежности BASF [1] анализирует и контролирует состояние около 300 важнейших насосов, вакуумных насосов и компрессоров, и ожидается, что в ближайшие годы это число значительно возрастет. В то же время растут требования к интеграции машинных данных в приложения для управления активами. Реше-

ние обеспечивает административная оболочка, которая объединяет вакуумные насосы в информационном мире индустрии 4.0, описывая их функции и предоставляя информацию о них независимо от производителя, типа агрегата и применения [1].

В работах [2, 3] предложены модели для оценки энергетических потребностей вакуумных насосов. Выполнена проверка адекватности модели данным, предоставленным производителями.

В статье [4] модель и локальная реконструкция динамической сетки использованы для изучения переходного поведения кулачкового вакуумного насоса в периоды пуска. Численное исследование проведено для насоса с пятью различными режимами пуска. Анализ полученных результатов показал закономерность колебаний расхода и пульсаций давления в процессе пуска насоса при различных режимах.

В последние десятилетия механические бустерные вакуумные насосы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. В работе [5] проанализированы специальные характеристики насоса, чтобы выявить возможность измерения его производительности с помощью единообразных процедур и в единообразных условиях.

Разработана новая конструкция жидкостно-кольцевого вакуумного насоса, обеспечивающая кинематическое замыкание лопастей вращающейся втулки и лопастей рабочего колеса [6]. Конструкция позволяет снижать динамические нагрузки на компоненты насоса, сглаживать его работу и обеспечивать стабильность формы жидкостного кольца.

В статье [7] рассмотрена работа вакуумной насосной системы при различных режимах.

Одним из перспективных методов очистки и дистилляции воды является метод испарения с применением трансформаторов энергии теплового насоса [8]. В статье [9] описана схема теплового насоса на основе вакуумного компрессорного насоса, используемого для повышения давления. Получены данные о производительности и энергопотреблении установки.

В рамках европейской демонстрационной программы разработки дизайна электростанции в работе [10] представлена предварительная проектная конфигурация первичных вакуумных насосных систем.

В статье [11] приведены винтовые вакуумные насосы, функционирующие без фрикцион-

ных элементов в вакуумной камере. Такие насосы можно использовать во всех типах вакуумных процессов.

В публикации [12] исследована динамика откачивания воздуха из рабочей камеры (РК) с помощью низковакуумного водокольцевого насоса. Давления газа в РК и на входе насоса полагались одинаковыми, т. е. не учитывались гидравлические потери в подводящем трубопроводе.

В отличие от водокольцевого насоса, при откачивании загрязненной (запыленной) среды на входе золотникового вакуумного насоса необходимо устанавливать фильтр, который может иметь заметное гидравлическое сопротивление. Так, в работе [13] исследовано гидравлическое сопротивление сетки в трубопроводе. Получена эмпирическая формула для расчета коэффициента гидравлических потерь сетчатого фильтра (СФ)

$$\zeta = 22 / \text{Re} + 1,3(1 - \omega) + (1 - 1/\omega)^2; \quad (1)$$

$$\text{Re} = W\rho d / \mu = Gd / \mu,$$

где Re — число Рейнольдса; ω — пористость СФ ($0,1 < \omega < 0,9$); W — скорость течения газа в трубопроводе; d — внутренний диаметр трубопровода; ρ и μ — плотность и коэффициент динамической вязкости газа; G — массовый расход газа через единицу площади поперечного сечения потока (далее массовый расход), $G = W\rho$.

Цель статьи — учесть гидравлическое сопротивление трубопровода и СФ и применить математическую модель для исследования влияния их характеристик на динамику откачивания воздуха с примесями.

Гидравлическая схема исследованной вакуумной откачивающей системы приведена на рис. 1. Давление газа на выходе p_0 — атмосферное p_a (или близкое к нему). Рассмотрены условия, при которых реализуется турбулентный режим течения газа в трубопроводе.

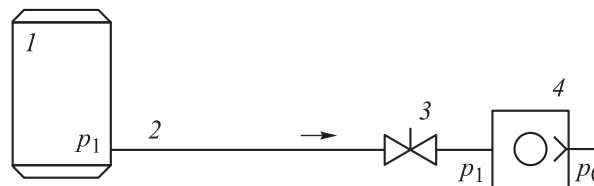


Рис. 1. Гидравлическая схема вакуумной откачивающей системы:

1 — РК; 2 — трубопровод с СФ; 3 — вентиль; 4 — золотниковый вакуумный насос PKS-016

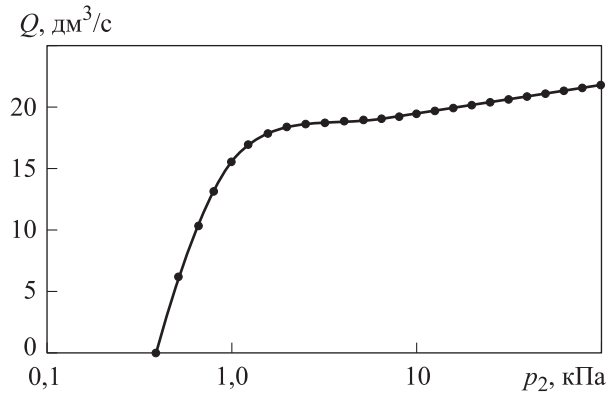


Рис. 2. Зависимости эффективной производительности Q золотникового вакуумного насоса PKS-016 от давления газа на его входе p_2 :
 • — экспериментальные данные;
 — — результаты расчета по формуле (3)

Дифференциальное уравнение откачки воздуха из РК имеет вид

$$V \frac{dp_1}{dt} = f[p_2(t)]k[p_a - p_1(t)] - p_2(t), \quad (2)$$

$$p_1(0) = p_a,$$

где V — объем РК; p_1 — давление газа в РК (или на входе трубопровода); t — время; $f(p_2)$ — зависимость эффективной производительности золотникового вакуумного насоса PKS-016 от давления газа на его входе, полученная по результатам экспериментов (рис. 2) [14]; k — эмпирическая константа, называемая коэффициентом утечки.

В отличие от уравнения (2), в работе [12] принято $p_2 = p_1$.

По данным испытаний [14] подобрана эмпирическая зависимость (см. рис. 2)

$$Q \equiv f(p_2) = \begin{cases} 0 & \text{при } p_2 \leq 0,4; \\ B [1 - e^{-\beta(p_2 - 0,4)}] & \text{при } 0,4 < p_2 < 5; \\ b_0 + b_1(p_2 - 5) + b_2(p_2 - 5)^2 + b_3(p_2 - 5)^3 & \text{при } p_2 \geq 5, \end{cases} \quad (3)$$

где $B = 18,7 \text{ дм}^3/\text{с}$; $\beta = 3,05 \text{ кПа}^{-1}$.

Методы исследования. В общем случае связь между давлениями p_2 и p_1 следует находить с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих нестационарное турбулентное течение газа в трубе. В одномерном приближении такие уравнения использованы во многих публикациях (например, в [15, 16]):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}(\rho W) = 0;$$

$$\rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + W \frac{\partial W}{\partial X} \right) + \frac{\partial p}{\partial X} + A_{\text{тр}} = 0,$$

где X — продольная координата (вдоль оси трубы); $A_{\text{тр}}$ — потери на трение.

К системе уравнений (1) добавляют уравнение теплообмена и уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho RT,$$

где R — газовая постоянная; T — термодинамическая температура.

Исследования выявили возможность квазистационарного метода расчета сжимаемого течения газа в трубе при постоянной температуре. Тогда к дифференциальному уравнению (1) следует добавить алгебраические выражения

$$p_1 + GW_1 = p_2 + GW_2 + \lambda(G) \frac{L}{d} \frac{G}{2} W_{\text{cp}} + \zeta(G, \omega) \frac{G}{2} W_1, \quad (4)$$

$$W_{\text{cp}} = \frac{1}{L} \int_0^L W(X) dX;$$

$$G = \rho_1 W_1 = \rho_2 W_2; \quad p_1 = \rho_1 RT; \quad p_2 = \rho_2 RT; \quad (5)$$

$$W_2 = f(p_2)/S_0; \quad S_0 = \pi d^2/4,$$

где W_1 , W_2 и ρ_1 , ρ_2 — скорости течения и плотности газа в РК и на входе золотникового вакуумного насоса PKS-016 соответственно; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; L — длина трубопровода; W_{cp} — среднее значение скорости течения газа по длине трубопровода.

В низковакуумных системах молекулярный режим течения газа не реализуется. Коэффициенты гидравлического сопротивления по длине трубопровода при турбулентном λ_t и ламинарном λ_l режимах течения газа рассчитывали по известным формулам

$$\lambda_t = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68\mu}{Gd} \right)^{0,25};$$

$$\lambda_l = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{68\mu}{Gd},$$

где Δ — абсолютная эквивалентная шероховатость трубопровода.

С учетом того, что массовый расход газа $G = \text{const}$, коэффициенты гидравлического сопротивления могут зависеть от коэффициента

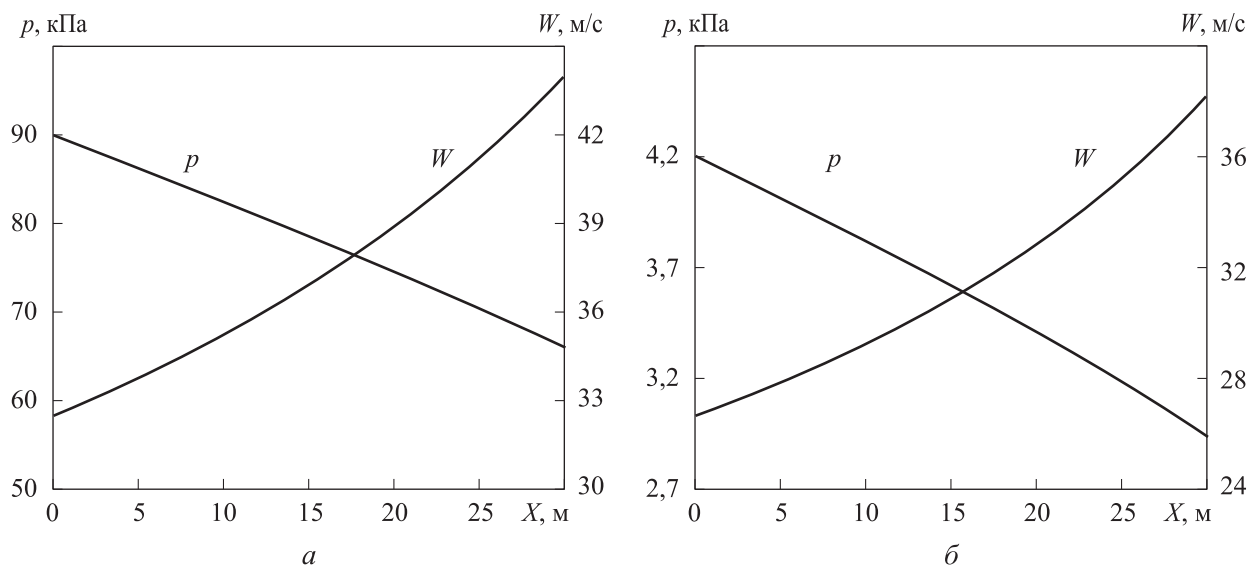


Рис. 3. Изменение давления p и скорости течения газа W вдоль оси трубопровода при длине $L = 30$ м, внутреннем диаметре $d = 25$ мм и пористости СФ $\omega = 0,25$ в разные моменты времени: $a - t = 10$ с; $b - t = 900$ с

динамической вязкости газа μ . Так как рассмотрен изотермический процесс, влияние снижения давления газа на его динамическую вязкость в низковакуумных системах очень мало [17, 18].

Расчеты показали, что с высокой степенью точности среднее значение скорости течения газа по длине трубопровода можно определять по формуле

$$W_{cp} \approx 2W_1W_2(W_1 + W_2).$$

На рис. 3 показано, как уменьшается давление газа и растет скорость его течения вдоль оси транспортного трубопровода. Видно существенное падение давления газа в начале трубопровода из-за гидравлических потерь на СФ.

Результаты исследования и их обсуждение. В качестве примера рассмотрен случай, когда в рабочей камере находится воздух, содержащий аргон с массовой долей $c_1 = 0,15$, при атмосферном давлении и температуре 20 °С. Пусть необходимо снизить массовую долю аргона до $c_k = 0,01$ (1 %).

Молекулярная масса смеси газов

$$M_{cm} = \left(\frac{c_1}{M_1} + \frac{c_2}{M_2} \right)^{-1} = \left(\frac{0,15}{40} + \frac{0,85}{28,9} \right)^{-1} = 30,16 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

где M_1 и M_2 — молекулярные массы аргона и воздуха; c_2 — массовая доля воздуха в смеси.

Газовая постоянная смеси

$$R_{cm} = \frac{R}{M_{cm}} = \frac{8314}{30,16} = 275,7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Плотность смеси газов по уравнению состояния совершенного газа

$$\rho_{cm} = \frac{p}{TR_{cm}} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{293 \cdot 275,7} = 1,254 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Объемные доли компонентов смеси: аргона $v_1 = c_1 M_{cm} / M_1 = 0,113$; воздуха $v_2 = 0,887$.

Коэффициент динамической вязкости двухкомпонентной смеси определим известным методом Уилки [19]:

$$\mu_{cm} = \frac{v_1 \mu_1}{\Phi_{11} v_1 + \Phi_{12} v_2} + \frac{v_2 \mu_2}{\Phi_{21} v_1 + \Phi_{22} v_2}, \quad (6)$$

где μ_1 и μ_2 — коэффициенты динамической вязкости аргона и воздуха, $\mu_1 = 2,215 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_2 = 1,812 \cdot 10^{-5}$ Па·с [20]; Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} , Φ_{22} — вспомогательные коэффициенты,

$$\Phi_{11} = \Phi_{22} = 1;$$

$$\Phi_{12} = \frac{[1 + (\mu_1 / \mu_2)^{0,5} (M_2 / M_1)^{0,25}]^2}{[8(1 + M_1 / M_2)]^{0,5}} = 0,934;$$

$$\Phi_{21} = \frac{[1 + (\mu_2 / \mu_1)^{0,5} (M_1 / M_2)^{0,25}]^2}{[8(1 + M_2 / M_1)]^{0,5}} = 1,057.$$

После подстановки значений вспомогательных коэффициентов в выражение (6) найдем

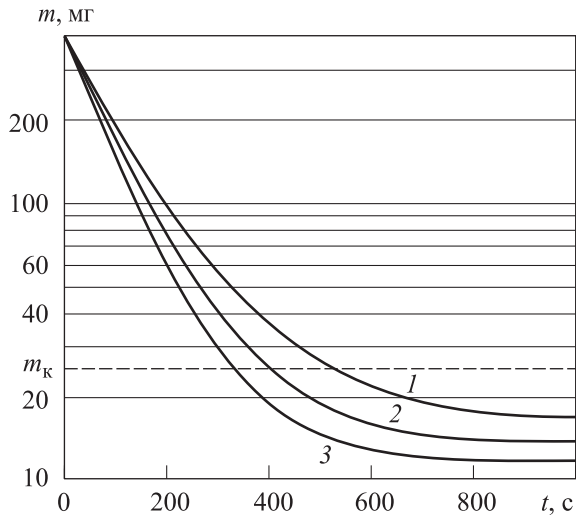


Рис. 4. Зависимости массы аргона в РК m от времени откачки смеси t при длине трубопровода $L = 30$ м, пористости СФ $\omega = 0,20$ и различных значениях диаметра трубопровода: 1 — $d = 25$ мм; 2 — $d = 30$ мм; 3 — $d = 40$ мм

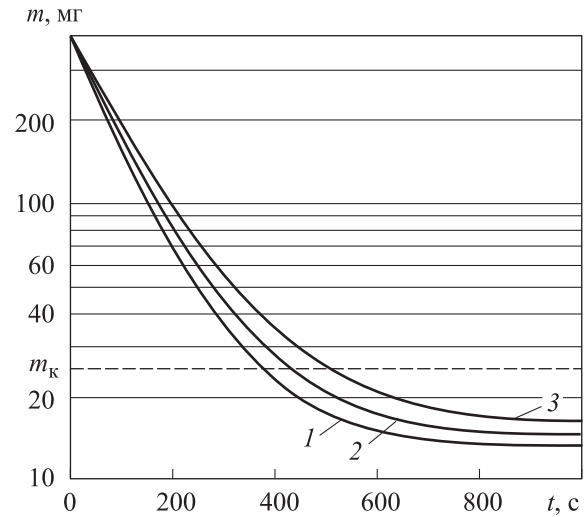


Рис. 6. Зависимости массы аргона в РК m от времени откачки смеси t при диаметре трубопровода $d = 30$ мм, его длине $L = 30$ м и разной пористости СФ: 1 — $\omega = 0$ (без применения СФ); 2 — $\omega = 0,15$; 3 — $\omega = 0,10$

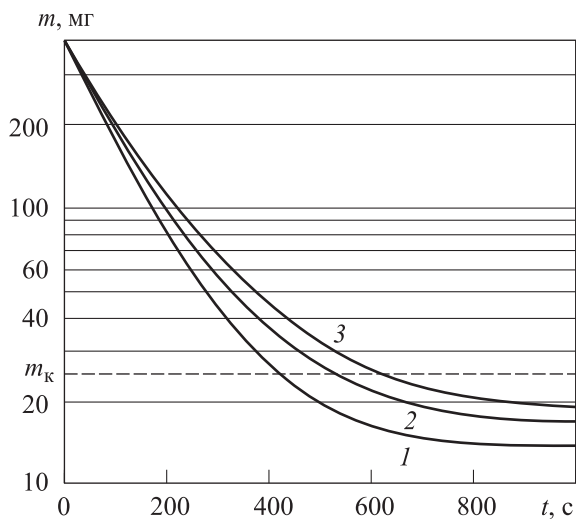


Рис. 5. Зависимости массы аргона в РК m от времени откачки смеси t при диаметре трубопровода $d = 25$ мм, пористости СФ $\omega = 0,20$ и различных значениях длины трубопровода: 1 — $L = 10$ м; 2 — $L = 30$ м; 3 — $L = 50$ м

коэффициент динамической вязкости воздуха $\mu_2 = 1,863 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Объем РК V принят равным 2 м^3 . При этих условиях дифференциальное уравнение (2) решено численным методом с учетом алгебраических соотношений (4), (5). Получены зависимости давления газа в РК p_1 от времени t при различных значениях параметров вакуумной откачивающей системы.

Это позволило рассчитать динамику изменения массы аргона в РК исходя из следующих соображений. В начальный момент (при атмосферном давлении) масса аргона в РК $m_0 = \rho_{\text{см}} V c_1 = 376,2$ г, а должно остаться в 15 раз меньше, т. е. $m_k = 25,1$ г.

Можно считать, что масса аргона в РК при изотермическом откачивании будет снижаться прямо пропорционально давлению:

$$m(t) = m_0 p_1(t) / p_a.$$

Влияние параметров вакуумной откачивающей системы на динамику снижения массы аргона в РК показано на рис. 4–6. Как видно из рис. 4, при диаметре трубопровода $d = 40$ мм необходимая концентрация будет достигнута за 5,6 мин, а при $d = 25$ мм — за 8,8 мин. При $d = 25$ мм увеличение длины трубопровода с 10 до 50 м приводит к возрастанию времени откачки смеси газов с 7,0 до 10,6 мин.

Вывод

Если отсутствует СФ и длина трубопровода меньше 3 м, то разница между давлениями в РК и на входе в золотниковый вакуумный насос не превышает 5%. В этом случае можно применять для расчета упрощенную модель, полагая в дифференциальном уравнении (1) эти давления равными.

Литература

- [1] Müller J., Schuhmann R. Verwaltungsschalen als Wegbereiter für das Pumpen-Monitoring Umfassende Überwachung von Pumpen und Vakuumpumpen. *ATP magazine*, 2020, no. 1–2, pp. 66–71, doi: <https://doi.org/10.17560/atp.v62i1-2.2467>
- [2] Brendelberger S., von Storch H., Bulfin B. et al. Vacuum pumping options for application in solar thermochemical redox cycles — assessment of mechanical-, jet- and thermochemical pumping systems. *Sol. energy*, 2017, vol. 141, pp. 91–102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.023>
- [3] Nicholas N., Shaffer B. All-metal scroll vacuum pumps for tritium processing systems. *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, no. 3, pp. 366–372, doi: <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1712988>
- [4] Li Y.B., Guo D.S., Li X.B. The effect of startup modes on a vacuum cam pump. *Vacuum*, 2019, vol. 166, pp. 170–177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.05.009>
- [5] Sun F., Liu K., Xu T. et al. Progress of establishing a standard for measuring the performance of mechanical booster vacuum pump by ISO TC 112. *Vacuum*, 2018, vol. 150, pp. 41–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.01.024>
- [6] Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V. et al. Novel construction of liquid ring vacuum pumps. *Chem. Petrol. Eng.*, 2019, vol. 55, no. 5–6, pp. 473–479, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00648-z>
- [7] Salakhov R., Ermakov A., Khismatullin R. Researching of a vacuum pump system based on the numerical computations. *Amazonia investiga*, 2019, vol. 8, no. 23, pp. 286–298.
- [8] Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Specifics of the application of mechanical vacuum pumps in vacuum distillation units used in chemical and oil and gas industries. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2141, art. 030011, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5122061>
- [9] Malafeev I.I., Marinyuk B.T., Il'in G.A. Development, calculation and experimental study of a heat pump for vacuum water distillation systems. *Chem. Petrol. Eng.*, 2019, vol. 54, no. 9–10, pp. 658–665, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00530-y>
- [10] Giegerich T., Day C., Gliss C. et al. Preliminary configuration of the torus vacuum pumping system installed in the DEMO lower port. *Fusion Eng. Des.*, 2019, vol. 146-B, pp. 2180–2183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.147>
- [11] Burgmann W., Goehler K. Modern vacuum pumps for the vacuum degassing of steel in small and large vacuum-degassing units. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 5–/6, pp. 516–525, doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9762-5>
- [12] Naumov V.A., Velikanov N.L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 537, no. 3, art. 032029, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032029>
- [13] Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. Hydrodynamic drag of lattices in straight pipelines. *Russ. Engin. Res.*, 2014, vol. 34, no. 9, pp. 554–556, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14090159>
- [14] Одноступенчатые золотниковые вакуумные насосы серии PKS. *vactron.org: веб-сайт*. URL: <https://vactron.org/index.php/vakuumnnye-nasosy> (дата обращения: 14.11.2021).
- [15] Краев В.М., Янышев Д.С. Проблемы расчета переходных процессов в при турбулентном течении в каналах электроустановок ЛА. *Труды МАИ*, 2010, № 37. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=13415>
- [16] Курбатова Г.И., Ермолаева Н.Н. Программные комплексы расчета параметров транспортировки газа и оледенения морских трубопроводов на арктическом шельфе. *Вестни газовой науки*, 2019, № 2, с. 80–80.
- [17] Jousten K. *Handbook of vacuum technology*. Wiley, 2016. 1050 p.
- [18] Mattox D.M. *The foundations of vacuum coating technology*. William Andrew, 2018. 378 p.
- [19] ГОСТ Р 8.770–2011. Коэффициент динамической вязкости сжатого газа с известным компонентным составом. Метод расчетного определения. Москва, Стандартинформ, 2019. 24 с.
- [20] Кикоин И.К., ред. *Таблицы физических величин*. Москва, Атомиздат, 1976. 1008 с.

References

- [1] Müller J., Schuhmann R. Verwaltungsschalen als Wegbereiter für das Pumpen-Monitoring Umfassende Überwachung von Pumpen und Vakuumpumpen. *ATP magazine*, 2020, no. 1–2, pp. 66–71, doi: <https://doi.org/10.17560/atp.v62i1-2.2467>
- [2] Brendelberger S., von Storch H., Bulfin B. et al. Vacuum pumping options for application in solar thermochemical redox cycles — assessment of mechanical-, jet- and thermochemical pumping systems. *Sol. energy*, 2017, vol. 141, pp. 91–102, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.023>
- [3] Nicholas N., Shaffer B. All-metal scroll vacuum pumps for tritium processing systems. *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, no. 3, pp. 366–372, doi: <https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1712988>
- [4] Li Y.B., Guo D.S., Li X.B. The effect of startup modes on a vacuum cam pump. *Vacuum*, 2019, vol. 166, pp. 170–177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.05.009>
- [5] Sun F., Liu K., Xu T. et al. Progress of establishing a standard for measuring the performance of mechanical booster vacuum pump by ISO TC 112. *Vacuum*, 2018, vol. 150, pp. 41–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.01.024>
- [6] Rodionov Yu.V., Selivanov Yu.T., Nikitin D.V. et al. Novel construction of liquid ring vacuum pumps. *Chem. Petrol. Eng.*, 2019, vol. 55, no. 5–6, pp. 473–479, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00648-z>
- [7] Salakhov R., Ermakov A., Khismatullin R. Researching of a vacuum pump system based on the numerical computations. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 23, pp. 286–298.
- [8] Gordeeva U.S., Demikhov K.E., Ochkov A.A. Specifics of the application of mechanical vacuum pumps in vacuum distillation units used in chemical and oil and gas industries. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2141, art. 030011, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5122061>
- [9] Malafeev I.I., Marinyuk B.T., Il'in G.A. Development, calculation and experimental study of a heat pump for vacuum water distillation systems. *Chem. Petrol. Eng.*, 2019, vol. 54, no. 9–10, pp. 658–665, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00530-y>
- [10] Giegerich T., Day C., Gliss C. et al. Preliminary configuration of the torus vacuum pumping system installed in the DEMO lower port. *Fusion Eng. Des.*, 2019, vol. 146-B, pp. 2180–2183, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.147>
- [11] Burgmann W., Goehler K. Modern vacuum pumps for the vacuum degassing of steel in small and large vacuum-degassing units. *Metallurgist*, 2013, vol. 57, no. 5–6, pp. 516–525, doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-013-9762-5>
- [12] Naumov V.A., Velikanov N.L. Simulation of operational characteristics of the water-ring vacuum pumps. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 537, no. 3, art. 032029, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032029>
- [13] Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. Hydrodynamic drag of lattices in straight pipelines. *Russ. Engin. Res.*, 2014, vol. 34, no. 9, pp. 554–556, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X14090159>
- [14] *Odnostupenchatye zolotnikovye vakuurnye nasosy serii PKS* [Single-stage slide valve vacuum pump of PKS series]. *vactron.org: website*. URL: <https://vactron.org/index.php/vakuurnye-nasosy> (accessed: 14.11.2021). (In Russ.).
- [15] Kraev V.M., Yanyshv D.S. Problem of transitional process by turbulent flow in aerospace engines channels. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=13415> (In Russ.).
- [16] Kurbatova G.I., Ermolaeva N.N. Software systems for computation of the gas transportation parameters and offshore pipelines glaciation on the arctic shelf. *Vesti gazovoy nauki*, 2019, no. 2, pp. 80–80. (In Russ.).
- [17] Jousten K. *Handbook of vacuum technology*. Wiley, 2016. 1050 p.
- [18] Mattox D.M. *The foundations of vacuum coating technology*. William Andrew, 2018. 378 p.
- [19] GOST R 8.770–2011. *Koeffitsient dinamicheskoy vyazkosti szhatogo gaza s izvestnym komponentnym sostavom. Metod raschetnogo opredeleniya* [State standard GOST R 8.770–2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Natural gas. The coefficient of

dynamic viscosity of compressed gas with a known component composition. The method of calculation]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 24 p. (In Russ.).

[20] Kikoin I.K., ed. *Tablitsy fizicheskikh velichin* [Tables of physical quantities]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 1008 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.01.2022

Информация об авторах

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой машиноведения и технических систем. Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236029, Калининград, Российская Федерация, ул. Озерова, д. 57, e-mail: monolit8@yandex.ru).

НАУМОВ Владимир Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой водных ресурсов и водопользования. Калининградский государственный технический университет (236000, Калининград, Российская Федерация, Советский пр-т, д. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Information about the authors

VELIKANOV Nikolai Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Science and Technical Systems. Immanuel Kant Baltic Federal University (236029, Kaliningrad, Russian Federation, Ozerova St., Bldg. 57, e-mail: monolit8@yandex.ru).

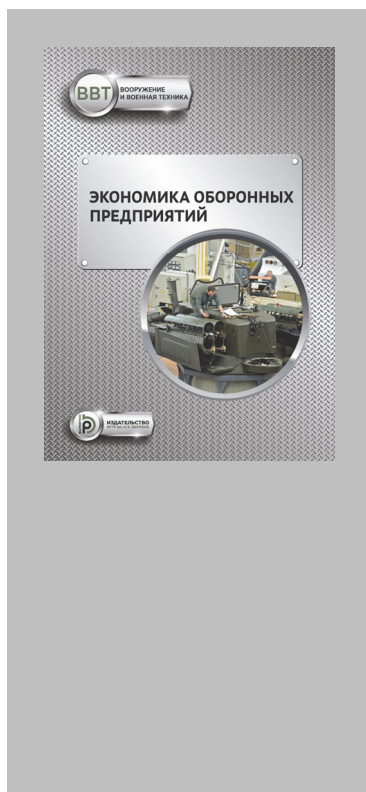
NAUMOV Vladimir Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Water Resources and Water Use. Kaliningrad State Technical University (236000, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Великанов Н.Л., Наумов В.А. Откачивание воздуха с примесями золотниковым вакуумным насосом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 52–59, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-52-59

Please cite this article in English as:

Velikanov N.L., Naumov V.A. Using a Spool Vacuum Pump for Pumping out air with Impurities. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6, pp. 52–59, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-52-59



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебник
под редакцией В.В. Селиванова**

«Экономика оборонных предприятий»

**Авторы: М.В. Гордин, Ю.Д. Ильин,
В.В. Селиванов, Е.А. Старожук**

В систематизированном виде изложены вопросы состояния и развития предприятий оборонно-промышленного комплекса во взаимосвязи с задачами военной экономики Российской Федерации. Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана студентам, обучающимся по специальности «Боеприпасы и взрыватели», а также многочисленным публикациям, посвященным исследованиям и разработкам вооружения, военной и специальной техники и боеприпасов.

Для студентов и аспирантов технических университетов и машиностроительных вузов, курсантов военных училищ, слушателей и адъюнктов военных академий.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>