

УДК 621.65, 621.516

Энергоэффективность водокольцевых вакуумных насосов

Н.Л. Великанов¹, В.А. Наумов²¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта² Калининградский государственный технический университет

Energy efficiency of water ring vacuum pumps

N.L. Velikanov¹, V.A. Naumov²¹ Immanuel Kant Baltic Federal University² Kaliningrad State Technical University

Вопросы рационального использования энергии актуальны для различных отраслей промышленности. Работа вакуумных систем связана с большим потреблением электроэнергии, основным звеном которых является насосная установка. От правильного выбора параметров насоса зависит энергопотребление всей установки. Описана методика, позволяющая сравнивать различные варианты насосных систем в условиях эксплуатации, приближенных к реальным. Определены производительность и затраченная мощность вакуумного насоса ELRS-6 в зависимости от давления на входе при различных значениях частоты вращения ротора. Показана динамика снижения давления в рабочей камере во времени для различных насосов. Рассчитаны зависимости времени достижения необходимого вакуума и затраченной работы от частоты вращения ротора для разных насосов. Определены затраченные механические работы и частоты вращения ротора для систем, состоящих из одного и нескольких насосов, при которых давление в рабочей камере снизится до заданного значения за определенное время. Разработана методика выбора одного или нескольких водокольцевых вакуумных насосов по критерию энергетической эффективности.

EDN: YNCBZX, <https://elibrary/yncbzx>**Ключевые слова:** энергоэффективность, затраченная мощность, частота вращения ротора, водокольцевые вакуумные насосы

The issues of rational use of energy are relevant for various industries. The operation of vacuum systems is associated with high power consumption, the main link is the pumping unit. The energy consumption of the entire installation depends on the correct choice of pump parameters. A technique is described that makes it possible to compare different variants of pumping systems under operating conditions close to real ones. The following parameters were determined: productivity, power consumption of the ELRS-6 vacuum pump depending on the inlet pressure at different values of the rotor speed. The dynamics of pressure reduction in the working chamber over time for various pumps is presented. The dependences of the time to reach the required vacuum and the work expended on the rotor speed for different pumps are calculated. The following parameters were determined: the mechanical work expended and the rotor rotation speed at which the pressure in the working chamber will decrease to a preset value in a certain time of seconds during operation of one or more pumps. A method has been developed for selecting an option from one or more water ring pumps according to the criterion of energy efficiency.

EDN: YNCBZX, <https://elibrary/yncbzx>**Keywords:** energy efficiency, power consumption, rotor speed, water ring vacuum pumps

Водокольцевые вакуумные насосы (ВКН) получили распространение в различных отраслях промышленности. Вследствие быстрого развития мировой экономики повышается потребность в энергоресурсах [1–4]. Промышленное оборудование влияет на процесс развития мировой экономики, в то же время оно потребляет много энергии. Выбор оборудования зависит от многих факторов: температуры, давления, нагрузки и экономичности. Научно обоснованный выбор оборудования и вспомогательных устройств для ВКН в химической промышленности рассмотрен в работе [5].

Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы — механические объемные турбомашин, которые могут работать как в режиме вакуумного компрессора, так и в режиме вакуумного насоса. Их широко используют для фильтрации, криогенной обработки, реакции, нагнетания газа, конденсации, испарения и конвективной сушки. Несмотря на низкую производительность, эти насосы обладают такими достоинствами, как низкая стоимость, простота, надежность, они улучшают характеристики всасывания и во многих случаях могут стать более эффективным вариантом оборудования. Повышение эффективности позволяет снизить энергопотребление и затраты. В статье [6] показано, что тепловое взаимодействие и явление кавитации являются одними из самых важных проблем, требующих дальнейшего исследования.

Жидкостно-кольцевой вакуумный насос представляет собой газожидкостную ротодинамическую установку, которую уже более ста лет применяют в области перекачки газа. Однако его высокое энергопотребление и низкий коэффициент полезного действия (КПД) являются существенными ограничениями, которые не были эффективно устранены путем оптимизации конструкции.

В работе [7] предложена новая энергоэффективная технология для насоса, где в качестве рабочей жидкости использован раствор ксантановой смолы, снижающий сопротивление полимера, для уменьшения трения о стенки и турбулентных потерь, что повышает эффективность насоса.

Температура рабочей жидкости жидкостно-кольцевого вакуумного насоса оказывает большое влияние на его энергоэффективность. Анализ результатов исследования [8] показал, что с повышением температуры рабочей жидкости

бесполезная мощность увеличивается, а мощность всасывания уменьшается.

Эффективность работы вакуумного насоса зависит от температуры циркулирующей в нем воды [9]. Рационализация насосных систем является важнейшей задачей [1–10].

Цель исследования — разработка методики выбора насосной системы, состоящей из одного или нескольких ВКН, по критерию энергетической эффективности.

Рабочие характеристики. Первым этапом работы многих низковакуумных систем, применяемых в различных отраслях, является откачивание воздуха из ресивера. Благодаря преимуществам перед другими агрегатами ВКН чаще применяют в таких системах.

Производители современных ВКН предлагают установить частоту вращения ротора, необходимую заказчику. Анализ ее влияния на показатели ВКН [11, 12] показал, что большая частота вращения ротора обеспечивает высокую производительность ВКН, увеличивая затраченную мощность. При этом изотермный КПД ВКН снижается с ростом частоты вращения ротора. Такой КПД позволяет оценивать энергетическую эффективность одного и того же ВКН при определенных режимах (условиях) работы, но непригоден для сравнения энергетических затрат разных агрегатов даже одного типа. Рациональное использование энергии в рамках отдельных агрегатов, предприятий регионов является актуальной задачей [13–16].

Рассмотрим следующую задачу. Имеется рабочая камера (РК) объемом V , в которой начальное давление воздуха равно атмосферному давлению: $P(0) = P_a$. Необходимо откачать воздух из РК с помощью ВКН, чтобы давление стало равным P_k . ВКН расположен в непосредственной близости от РК, поэтому давление воздуха на входе ВКН можно считать равным давлению в РК. Требуется выбрать агрегат (или несколько агрегатов) из заданного модельного ряда ВКН, чтобы энергетические затраты были наименьшими. Исходя из требований технологического процесса, время откачки не должно превышать заданного значения T .

Так как для решения задачи необходимы рабочие характеристики ВКН, воспользуемся результатами заводских испытаний насосов серии ELRS компании ERSTEVAK [12] — ELRS-2,

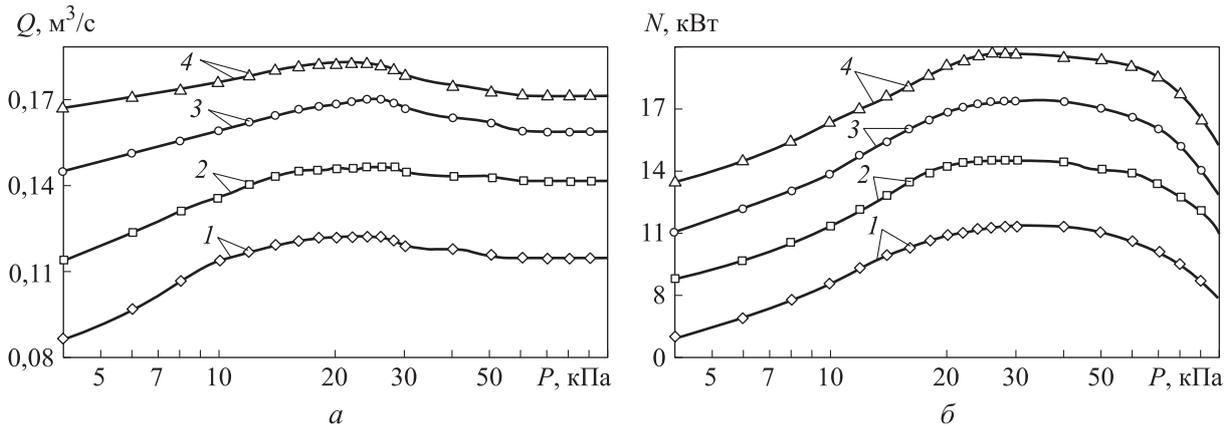


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости производительности Q (а) и затраченной мощности N (б) насоса ELRS-6 от давления на его входе P при частоте вращения ротора $n = 1110$ (1), 1300 (2), 1450 (3) и 1625 мин⁻¹ (4)

ELRS-3, ELRS-5, ELRS-6, ELRS-11 — при различных значениях частоты вращения ротора. Предельное остаточное давление этих ВКН составляет 3,3 кПа (при отсутствии утечек). Изменение частоты вращения ротора обеспечивает ременная передача с высокоточным коническим шкивом. В качестве примера на рис. 1, а и б точками отмечены экспериментальные данные [12], линиями — результаты сплайн-аппроксимации, сравнение которых показывает, что они хорошо согласованы.

Как видно из рис. 1, а, наибольшая производительность ВКН серии ELRS наблюдается в диапазоне давления на входе $P = 15...25$ кПа, а не при атмосферном давлении, как в ранее рассмотренных ВКН [4]. Зависимость затраченной мощности от давления не является убывающей функцией, как в работе [4], а имеет максимум в области 35 кПа (см. рис. 1, б).

Расчетные исследования. Известно, что в общем случае дифференциальное уравнение откачки воздуха вакуумным насосом из некоторой емкости имеет вид [1–3]

$$V \frac{dP}{dt} = -PQ(P) + S_T + S_{ГВ}, \quad (1)$$

где t — текущее время; $Q(P)$ — зависимость эффективной производительности ВКН от давления на его входе (см. рис. 1, а); S_T — поток натекания, обусловленный утечками; $S_{ГВ}$ — поток газовыделения (ГВ).

В низковакуумных насосах, в том числе водокольцевых, потоком ГВ пренебрегают. Для потока натекания используем обычно принямую для вакуумной техники формулу

$$S_T = \Gamma Q(P_a)(P_a - P),$$

где Γ — безразмерная эмпирическая константа, определяемая по величине P_z ; при которой давление в ресивере прекращает уменьшаться из-за натекания, т. е. выполняется соотношение

$$\Gamma Q(P_a)(P_a - P_z) = P_z Q(P_z). \quad (2)$$

Из соотношения (2) имеем

$$\Gamma = \frac{1}{1-k} \frac{Q(kP_a)}{Q(P_a)},$$

где k — коэффициент утечки, $k = P_z / P_a$.

Подставляя выражение (3) в формулу (1), получаем

$$V \frac{dP}{dt} = \Gamma Q(P_a) P_a - P [Q(P) + \Gamma Q(P_a)]. \quad (3)$$

Задача Коши (3) с начальным условием $P(0) = P_a$ решена численным методом при следующих параметрах: $V = 2,5$ м³; $k = 0,03$; $P_k = 10$ кПа.

Влияние частоты вращения ротора на процесс откачки воздуха из РК показано на рис. 2. Видно, что чем выше частота вращения ротора, тем больше производительность ВКН, и тем меньше время откачки T .

По точкам, отмеченным на рис. 2 и 3, можно определить время, за которое давление в РК снижается от P_a до P_k .

Для четырех насосов серии ELRS на рис. 3 показана динамика снижения давления в РК при частоте вращения ротора $n = 1450$ мин⁻¹.

Для каждого ВКН серии ELRS получены зависимости времени достижения необходимого вакуума T и затраченной механической рабо-

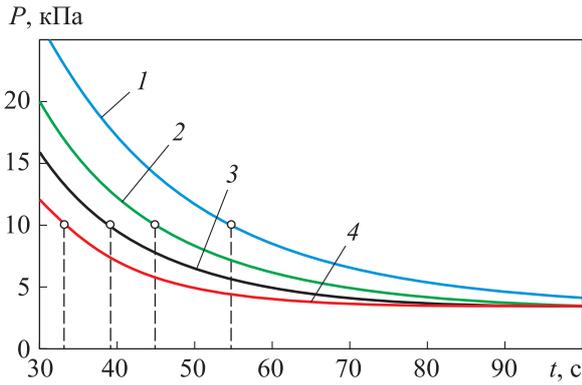


Рис. 2. Зависимости давления в РК P от времени t насоса ELRS-6 при частоте вращения ротора $n = 1110$ (1), 1300 (2), 1450 (3) и 1810 мин⁻¹ (4)

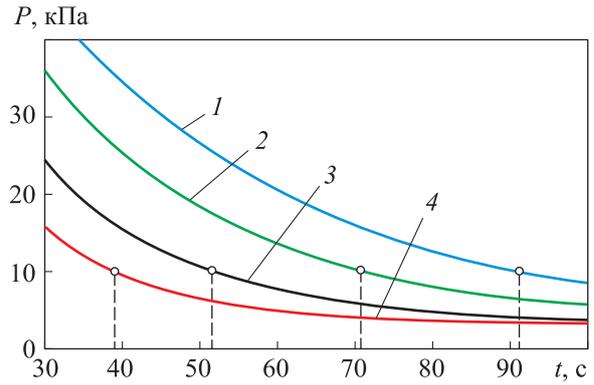


Рис. 3. Зависимости давления в рабочей камере P насосов ELRS-2 (1), ELRS-3 (2), ELRS-5 (3) и ELRS-6 (4) от времени t при частоте вращения ротора $n = 1450$ мин⁻¹

ты A от частоты вращения ротора. В качестве примера на рис. 4 приведены указанные зависимости для насосов ELRS-5 и ELRS-6. Точки получены путем решения задачи Коши (5) при заданной частоте вращения ротора, линии — результат их аппроксимация полиномами

$$T \equiv f(n) = a_0 + a_1n + a_2n^2;$$

$$A \equiv \varphi(n) = b_0 + b_1n + b_2n^2,$$

где $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ — эмпирические коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов; например, для насоса ELRS-8 $a_0 = 117,97$ с; $a_1 = -8,486$ с²; $a_2 = 0,1932$ с³; $b_0 = 557,26$ кДж; $b_1 = -25,369$ кДж·с; $b_2 = 1,496$ кДж·с².

Для каждого ВНК определяем частоту n_k , при которой давление в РК снизится от атмосферного давления до $P_k = 10$ кПа за время $T_k = 50$ с, решая уравнение

$$f(n_k) = T_k.$$

Затем рассчитаем за это время затраченную механическую работу $A_k = \varphi(n_k)$. Результаты расчета приведены в табл. 1, где n_0 — частота вращения ротора при работе ВКН с прямым приводом; Q_0 — производительность ВКН при $n = n_0$ и $P = P_a$.

Из табл. 1 следует, что при использовании ВКН большей производительности затраченная механическая работа сначала снижается, достигает наименьшего значения у ELRS-8, а у ELRS-11 начинает возрастать. Это связано с нелинейным характером зависимости затраченной мощности от частоты вращения ротора (см. рис. 1, б и 4).

Для ELRS-2 и ELRS-3 частота вращения ротора, рекомендуемая производителем, не должна превышать $n_{max} = 1750$ мин⁻¹, на которой время снижения давления до 10 кПа будет больше 50 с (76,9 и 63,5 с соответственно). Поэтому данные для насосов ELRS-2 и ELRS-3 не включены в состав табл. 1.

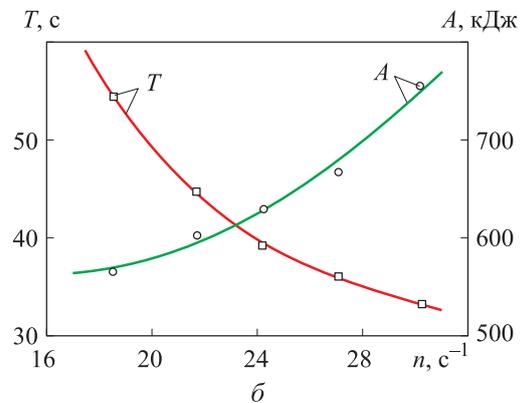
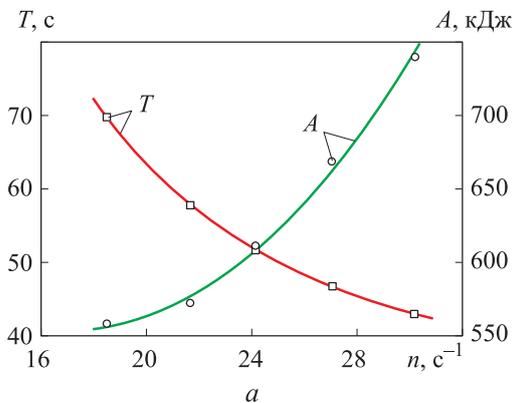


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и аппроксимирующие (линии) зависимости времени достижения необходимого вакуума T и затраченной работы A в насосах ELRS-5 (а) и ELRS-6 (б) от частоты вращения ротора n

Таблица 1

Значения затраченной механической работы и частоты вращения ротора, при которой давление в РК снизится до $P_k = 10$ кПа за время $T_k = 50$ с, если функционирует один насос

Марка ВКН	n_0 , мин ⁻¹	Q_0 , м ³ /ч	n_k , мин ⁻¹	A_k , кДж
ELRS-5	1450	450	1494	620,6
ELRS-6	1450	600	1182	576,1
ELRS-8	980	750	675	461,2
ELRS-11	980	1080	547	518,7

Таблица 2

Значения затраченной механической работы и частоты вращения ротора, при которой давление в РК снизится до $P_k = 10$ кПа за время $T_k = 50$ с, если функционируют K насосов

K	n_k , мин ⁻¹	A , кДж
1	1494/1182	620,6/576,1
2	826/689	566,1/571,4
3	544/431	685,0/614,8

Примечание. В числителе дроби указаны значения для насоса ELRS-5, в знаменателе — для ELRS-6.

Таким образом, при установке одного ВКН наиболее энергетически эффективным в рассматриваемых условиях будет выбор ELRS-8.

Проверим, какие энергетические затраты будут, если заменить выбранный насос несколькими ВКН меньшей производительности. Если последние одинаковы, а потерями в соединительной магистрали пренебречь, то поставленную задачу можно заменить задачей об откачке воздуха меньшим насосом из РК объемом V/K , где K — количество таких насосов. После чего умножить затраченную механическую работу каждого насоса на K . Результаты такого расчета приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что в обоих рассмотренных случаях замена одного насоса ELRS-8 на три ВКН меньшей производительности является нецелесообразной, так как приведет к увеличению энергетических затрат. Наименьшие энергетические затраты получены при замене одного насоса ELRS-8 двумя ELRS-5.

Выводы

1. Исследованы характеристики ВКН серии ELRS при решении задач откачки воздуха из РК определенного объема для достижения заданного давления за лимитированный промежуток времени. Варьировалась частота вращения ротора, в качестве критерия эффективности выступал энергетический показатель — затраченная механическая работа.

2. В общем случае при росте частоты вращения ротора производительность ВКН увеличивается, время откачки уменьшается, но также меняются и энергетические показатели его работы. Эффективность ВКН нелинейно зависит от частоты вращения ротора. Предложенная методика позволяет учесть эти явления и выбрать наиболее эффективный ВКН для решения конкретной задачи. Необходимым условием является наличие рабочих характеристик насосов при различных частотах вращения ротора. Методика позволяет не только выбрать ВКН, обеспечивающий наилучшую энергетическую эффективность, но и оценить целесообразность замены одного насоса несколькими ВКН меньшей производительности.

3. Чтобы повысить точность оценки, математическую модель можно усовершенствовать путем учета газодинамических процессов в соединительной магистрали.

Литература

- [1] Jagtap S.P., Pawar A.N. Energy efficiency evaluation in pumping system. *Mod. Mech. Eng.*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 171–180, doi: <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2013.34024>
- [2] Наумов В.А., Великанов Н.Л. Этапы работы вакуумной рыбонасосной установки. *Рыбное хозяйство*, 2020, № 2, с. 108–112, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-2-108-112>
- [3] Великанов Н.Л., Наумов В.А. Транспортирование серной кислоты вакуумной установкой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 11, с. 81–90, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-11-81-90>
- [4] Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Газодинамика вакуумно-импульсной сушки пищевых продуктов. *Вестник КрасГАУ*, 2023, № 7, с. 191–199, doi: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-7-191-199>
- [5] Yu H.M. Analysis on selection of water ring vacuum pumps in the chemical industry. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 325–326, pp. 1435–1439, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.1435>

- [6] Mahmood M.A.S., Rodionov Yu. V., Nikitin D. et al. A comprehensive review of liquid ring vacuum pumps and compressors for improving global efficiency and energy saving. *AJSE*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 26–36, doi: <https://doi.org/10.53799/ajse.v21i1.272>
- [7] Zhang Y., Zhou F., Li J. et al. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory. *Vacuum*, 2020, vol. 172, art. 109076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109076>
- [8] Li J., Zhou F., Zhang Y. et al. Effect of working fluid temperature on energy dissipation characteristics of liquid ring vacuum pump. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 236-A, art. 121469, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121469>
- [9] Feng Q., Chen L., Wang X. et al. Application and analysis of water ring vacuum pumps reform based on characteristic curve. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 592, art. 012094, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/592/1/012094>
- [10] Koseoglu B., Yüksel O. Energy efficiency optimization on centrifugal pumps: a content analysis. *1st Int. Congress on Ship and Marine Technology*, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311706614_Energy_Efficiency_Optimization_on_Centrifugal_Pumps_A_Content_Analysis
- [11] Великанов Н.Л., Наумов В.А. Анализ характеристик водокольцевых вакуумных насосов большой производительности. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2024, № 2, с. 45–48.
- [12] Насосы ERSTVAK серии ERLS. *erstvak.com: веб-сайт*. URL: <https://erstvak.com/brands/erstevak-seriya-elrs/> (дата обращения: 20.12.2024).
- [13] Климаш В.С., Соколовский М.А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов. *Электротехнические системы и комплексы*, 2020, № 1, с. 34–40, doi: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40)
- [14] Самохин Д.В. Методика автоматизированной оценки эффективности применения адаптивных комплексов энергосбережения на предприятиях. *Электротехнические системы и комплексы*, 2023, № 4, с. 60–66.
- [15] Таваров С.Ш., Ившина К.В. Моделирование режима работы городской электрической сети. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2022, № 1, с. 10–14, doi: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2022-1-10-14>
- [16] Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю. и др. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2020, № 5, с. 10–18, doi: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>

References

- [1] Jagtap S.P., Pawar A.N. Energy efficiency evaluation in pumping system. *Mod. Mech. Eng.*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 171–180, doi: <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2013.34024>
- [2] Naumov V.A., Velikanov N.L. Stages of vacuum fish-pump unit operation. *Rybnoe khozyaystvo* [Fisheries], 2020, no. 2, pp. 108–112, doi: <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-2-108-112> (in Russ.).
- [3] Velikanov N.L., Naumov V.A. Transportation of sulfuric acid with vacuum unit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, no. 11, pp. 81–90, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-11-81-90> (in Russ.).
- [4] Naumov V.A., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Gas dynamics of vacuum-pulsed drying food products. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KSAU], 2023, no. 7, pp. 191–199, doi: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-7-191-199> (in Russ.).
- [5] Yu H.M. Analysis on selection of water ring vacuum pumps in the chemical industry. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 325–326, pp. 1435–1439, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.1435>
- [6] Mahmood M.A.S., Rodionov Yu. V., Nikitin D. et al. A comprehensive review of liquid ring vacuum pumps and compressors for improving global efficiency and energy saving. *AJSE*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 26–36, doi: <https://doi.org/10.53799/ajse.v21i1.272>
- [7] Zhang Y., Zhou F., Li J. et al. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory. *Vacuum*, 2020, vol. 172, art. 109076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109076>

- [8] Li J., Zhou F., Zhang Y. et al. Effect of working fluid temperature on energy dissipation characteristics of liquid ring vacuum pump. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 236-A, art. 121469, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121469>
- [9] Feng Q., Chen L., Wang X. et al. Application and analysis of water ring vacuum pumps reform based on characteristic curve. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 592, art. 012094, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/592/1/012094>
- [10] Koseoglu B., Yüksel O. Energy efficiency optimization on centrifugal pumps: a content analysis. *1st Int. Congress on Ship and Marine Technology*, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311706614_Energy_Efficiency_Optimization_on_Centrifugal_Pumps_A_Content_Analysis
- [11] Velikanov N.L., Naumov V.A. Analysis of characteristics of water-ring vacuum pumps of high-performance. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*, 2024, no. 2, pp. 45–48. (In Russ.).
- [12] Nasosy ERSTVAK serii ERLS. *erstvak.com: website*. URL: <https://erstvak.com/brands/erstevak-seriya-elrs/> (accessed: 20.12.2024).
- [13] Klimash B.C., Sokolovskiy M.A. Improving the energy efficiency of a lifting crane complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1, pp. 34–40, doi: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40) (in Russ.).
- [14] Samokhin D.V. Methodology for automated assessment of adaptive energy saving complex effectiveness at enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2023, no. 4, pp. 60–66. (In Russ.).
- [15] Tavarov S.Sh., Ivshina K.V. Simulation modeling of urban power grid operation mode. *Energobezopasnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2022, no. 1, pp. 10–14, doi: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2022-1-10-14> (in Russ.).
- [16] Brykalov S.M., Balyberdin A.S., Trifonov V.Yu. et al. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energobezopasnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2020, no. 5, pp. 10–18, doi: <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 09.01.2025

Информация об авторах

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий». Балтийский федеральный университет им. И. Канта (36041, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: monolit8@yandex.ru).

НАУМОВ Владимир Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства. Калининградский государственный технический университет (236000, Калининград, Российская Федерация, Советский пр-т, д. 1, e-mail: van-old@mail.ru).

Information about the authors

VELIKANOV Nikolay Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Educational Scientific Cluster Institute of High Technologies. Immanuel Kant Baltic Federal University (36041, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevsky St., Bldg. 14, e-mail: monolit8@yandex.ru).

NAUMOV Vladimir Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management. 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. Энергоэффективность водокольцевых вакуумных насосов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 11, с. 72–78.

Please cite this article in English as:

Velikanov N.L., Naumov V.A. Energy efficiency of water ring vacuum pumps. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 11, pp. 72–78.