

УДК 621.65, 621.6.04, 621.52

Работа импульсно-вакуумной системы сбора мелкодисперсных твердых отходов производства

Н.Л. Великанов¹, В.А. Наумов²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта

² Калининградский государственный технический университет

Pulse-vacuum system operation in collecting the industrial fine-dyspersated solid waste

N.L. Velikanov¹, V.A. Naumov²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

² Kaliningrad State Technical University

Твердые отходы многих производств являются весьма токсичными. Их необходимо собирать и утилизировать. Для их сбора используют различное оборудование, включая импульсно-вакуумные системы, широко применяемые в различных отраслях производства. Рассмотрены вопросы работы, физического и математического моделирования импульсно-вакуумной системы сбора полидисперсных твердых токсичных отходов производства. При моделировании приняты следующие допущения: отходы, движущиеся по магистрали в ресивер, имеют форму цилиндра; последний непроницаем для воздуха, а его диаметр равен внутреннему диаметру трубы. Приведены зависимости координаты и скорости движения цилиндра от времени при различных значениях его длины, диаметра трубопровода и длины магистрали. Получены зависимости времени прохождения цилиндром трассы от различных параметров, позволяющие усовершенствовать процесс отбора токсичных отходов из различных бункеров.

EDN: KHPGIY, <https://elibrary/khpgiy>

Ключевые слова: импульсно-вакуумная система, вакуумный насос, ресивер, полидисперсные твердые отходы

Solid wastes originating from many industries are highly toxic. They should be collected and disposed of. Various equipment is used to collect the solid waste, including the pulse-vacuum systems widely applied in various industry sectors. The paper considers issues of operation, as well as of physical and mathematical simulation, of a pulse-vacuum system designed for collecting the polydisperse solid toxic industrial waste. The following assumptions were accepted in simulation: wastes moving along the main line to the receiver were having the shape of a cylinder; the latter was impermeable to air, and its diameter was equal to the pipe internal diameter. Dependences are provided of the cylinder motion coordinates and speed on time for various values of its length, pipeline diameter and pipeline length. Dependences were obtained of the route travel time on various parameters making it possible to improve the process of selecting the toxic waste from various bunkers.

EDN: KHPGIY, <https://elibrary/khpgiy>

Keywords: pulse-vacuum system, vacuum pump, receiver, polydisperse solid waste

Импульсно-вакуумные системы получили широкое распространение в различных отраслях производства.

Цель работы — рассмотреть вопросы работы, физического и математического моделирования импульсно-вакуумной системы сбора токсичных полидисперсных твердых отходов производства.

В статье [1] описаны системы с основным криогенным вакуумным насосом, за которым установлены вспомогательные насосы черновой обработки, включающие в себя криогенный компрессор с вязким потоком, и спиральные насосы. Предложен план работы с длительным импульсом, а также с индуктивным коротким импульсом, гибридным импульсом и вакуумной откачкой с продолжительной выдержкой. Наиболее важным является исследование работы с длительными импульсами.

Особенности проектирования, изготовления и испытания вакуумной камеры для размещения оптического импульсного компрессора лазерной системы описаны в работе [2]. Отмечено, что процессы, связанные с механической обработкой, изготовлением и окончательными испытаниями, существенно влияют на работу вакуумной камеры.

Эффективность утилизации техногенных минеральных образований ограничена высокими требованиями к фракционному составу, медианным размерам и дисперсности частиц, а также несовершенством техники, технологий и отсутствием должной классификации персонала [3]. Жесткие требования стратификации по дисперсии медианных размеров улавливаемых наночастиц сыпучего материала техногенных минеральных образований обусловлены необходимостью поиска способов и технических средств реализации, которые будут эффективными в условиях вероятностного распределения физико-механических, геометрических и кинематических параметров наночастиц.

Результаты исследований по утилизации промышленных отходов, все чаще используемых в промышленности строительных материалов, приведены в работе [4]. Изучено влияние различных химических добавок и мелкодисперсных наполнителей (промышленных отходов) на самоуплотняющиеся бетонные смеси и их реологические, физические и технические свойства [4].

Вакуумные системы применяют в транспорте [5], робототехнике [6, 7], жилищно-комму-

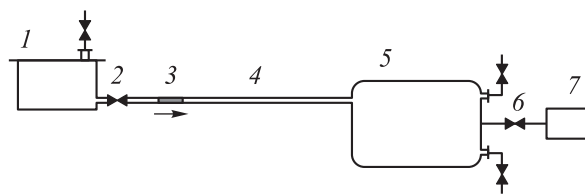


Рис. 1. Принципиальная схема импульсно-вакуумной системы сбора токсичных полидисперсных твердых отходов

нальном и сельском хозяйстве [8–10], при решении общенаучных и промышленных задач [11–15]. Твердые отходы многих производств являются весьма токсичными. Их необходимо собирать и утилизировать. Для их сбора используют различное оборудование.

Рассмотрим работу импульсно-вакуумной системы сбора токсичных полидисперсных твердых отходов, принципиальная схема которой показана на рис. 1.

Импульсно-вакуумная система работает следующим образом. На первом этапе клапан 2 закрыт, а клапан 6 открыт. Вакуумный насос 7 откачивает воздух в ресивере 5 до давления P_0 . Такое же давление устанавливается в магистрали 4. На втором этапе происходит загрузка твердых отходов массой m в бункер 1, где поддерживается давление P_1 такого же уровня, что и атмосферное давление. На третьем этапе клапан 6 закрывают, а клапан 2 открывают. Отходы под действием перепада давления засасываются в магистраль и в форме цилиндра 3 движутся по ней в ресивер, после чего клапан 2 закрывают, и весь цикл повторяют. После заполнения ресивера до определенного уровня его транспортируют на утилизацию отходов.

При математическом моделировании приняты следующие допущения:

- диаметр цилиндра из отходов (далее цилиндр) равен внутреннему диаметру трубы;
- цилиндр, образовавшийся из полидисперсной массы частиц, является непроницаемым для воздуха;
- масса цилиндра

$$m = bS\rho_p,$$

где b — длина цилиндра; S — площадь поперечного сечения цилиндра, $S = 0,25\pi D^2$ (D — его диаметр); ρ_p — насыпная плотность отходов в цилиндре;

- сжатие воздуха в системе магистраль — ресивер (СМР) происходит по адиабате:

$$P_2 V^\gamma = \text{const},$$

где P_2 — давление воздуха в СМР; γ — показатель адиабаты воздуха; V — объем воздуха в СМР, равный сумме объемов ресивера V_p и воздуха в магистрали $V_m(t)$, $V_m(t) = S[L - X(t)]$ (L — длина магистрали; X — координата (расстояние от бункера до переднего торца цилиндра вдоль оси магистрали); t — время от начала третьего этапа);

• сила сухого трения, действующая на цилиндр, определяется по закону Кулона

$$F = gmf,$$

где g — ускорение свободного падения; f — коэффициент трения.

Похожая математическая модель использована в статье [5] при исследовании работы импульсно-поршневой нагнетательной системы. Однако там перепад давления на концах магистрали оставался неизменным во время ее работы, тогда как в рассматриваемой системе давление в ресивере увеличивается по мере вытеснения воздуха цилиндром из магистрали.

Дифференциальные уравнения движения цилиндра с начальными условиями имеют вид

$$m \frac{dW}{dt} = [P_1 - P_2(t)]S - fmg; \quad \frac{dX}{dt} = W; \quad (1)$$

$$W(0) = 0; \quad X(0) = 0,$$

где W — скорость движения цилиндра.

Приведем задачу Коши (1) к безразмерной форме, для чего примем в качестве основных характерных параметров: давление P_1 , длину $X_0 = L$ и ускорение $a_0 = P_1/(\rho_p b)$. Тогда характерным временем будет $t_0 = (X_0/a_0)^{0,5}$, а характерной скоростью движения цилиндра — $W_0 = (X_0 a_0)^{0,5}$. Введем следующие безразмерные величины:

$$p = P_2/P_1; \quad x = X/X_0; \quad \tau = t/t_0; \quad w = W/W_0. \quad (2)$$

Подставляя выражения (2) в формулу (1), получаем задачу Коши в безразмерной форме

$$\begin{aligned} \frac{dw}{d\tau} &= 1 - \Theta(1 + \Psi^\gamma)[1 + \Psi(1-x)]^{-\gamma} - G; \\ \frac{dx}{d\tau} &= w; \quad w(0) = 0; \quad x(0) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где Θ , Ψ , G — критерии подобия,

$$\Theta = P_0/P_1; \quad \Psi = SL/V_p; \quad G = fgb\rho_p/P_1.$$

Согласно системе уравнений (3), задача имеет четыре критерия подобия: γ , Θ , Ψ и G .

Пусть базовые значения размерных параметров следующие: $P_1 = 1,0 \cdot 10^5$ Па; $P_2 = 0,3 \cdot 10^5$ Па; $D = 0,3$ м; $S = 0,0707$ м²; $L = 80$ м; $V_p = 4$ м³; $f = 0,8$; $b = 0,85$ м; $\rho_p = 2100$ кг/м³. Тогда критерии подобия $\Theta = 0,3$; $\Psi = 1,414$ и $G = 0,140$, показатель адиабаты воздуха $\gamma = 1,4$.

Задача Коши (3) решена численным методом. Результаты ее решения при различных значениях размерных параметров приведены на рис. 2–6.

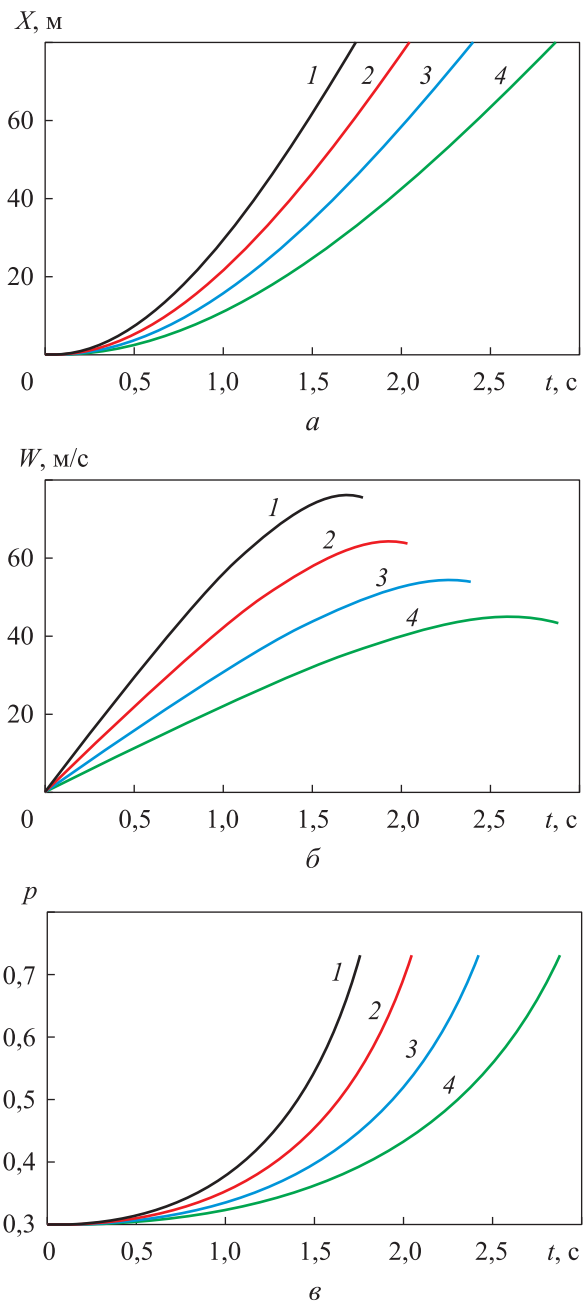


Рис. 2. Зависимости координаты цилиндра X (а), его скорости движения W (б) и безразмерного давления воздуха в ресивере p (в) от времени t при длине цилиндра $b = 0,50$ (1), $0,65$ (2), $0,85$ (3) и $1,10$ м (4)

Увеличение длины цилиндра b при прочих равных условиях приводит к повышению его инерционности. Поэтому, чем длиннее цилиндр, тем медленнее он разгоняется (см. рис. 2, б), вследствие чего возрастает время достижения ресивера (см. рис. 1 и б). Конечное

давление воздуха в ресивере остается неизменным, но время его достижения увеличивается (см. рис. 2, в).

Как видно из рис. 3, а, чем меньше начальное давление воздуха в ресивере p , тем большей скорости движения W достигает цилиндр,

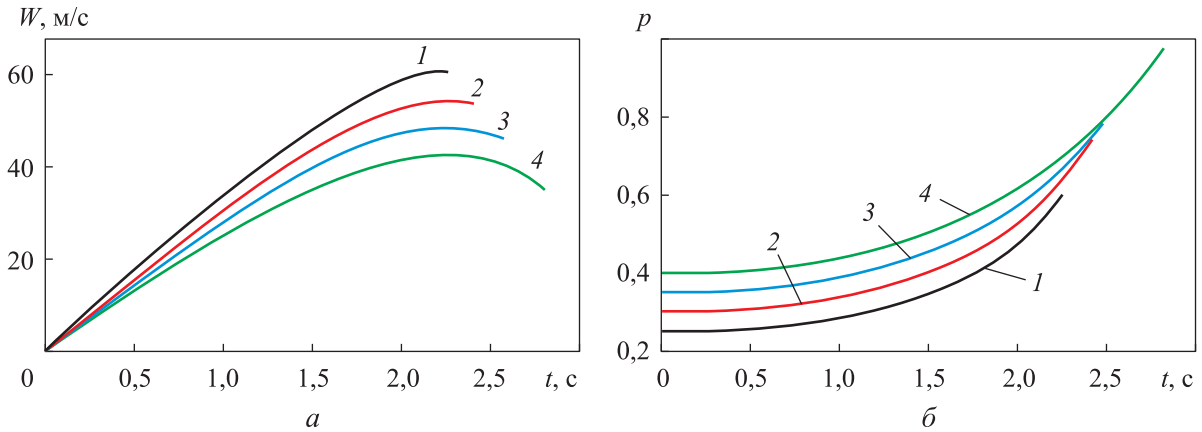


Рис. 3. Зависимости скорости движения цилиндра W (а) и безразмерного давления воздуха в ресивере p (б) от времени t при начальном давлении $P_0 = 25$ (1), 30 (2), 35 (3) и 40 кПа (4)

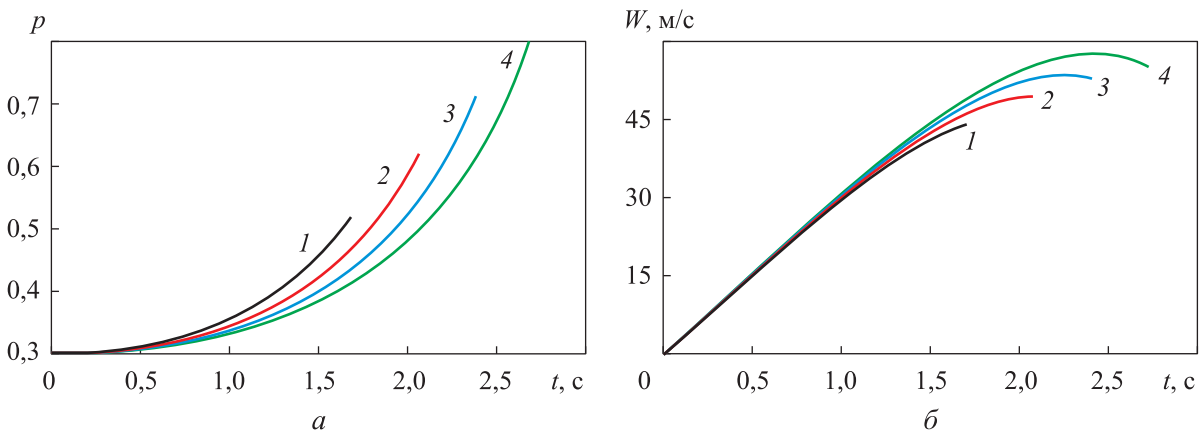


Рис. 4. Зависимости безразмерного давления воздуха в ресивере p (а) и скорости движения цилиндра W (б) от времени t при длине магистрали $L = 40$ (1), 60 (2), 80 (3) и 100 м (4)

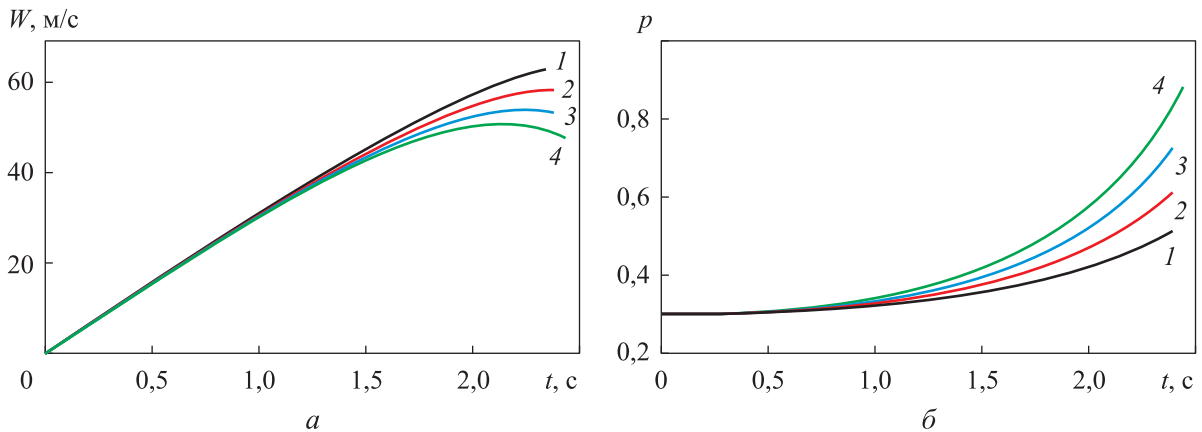


Рис. 5. Зависимости безразмерного давления воздуха в ресивере p (а) и скорости движения цилиндра W (б) от времени t при диаметре трубопровода $D = 0,20$ (1), 0,25 (2), 0,30 (3) и 0,35 м (4)

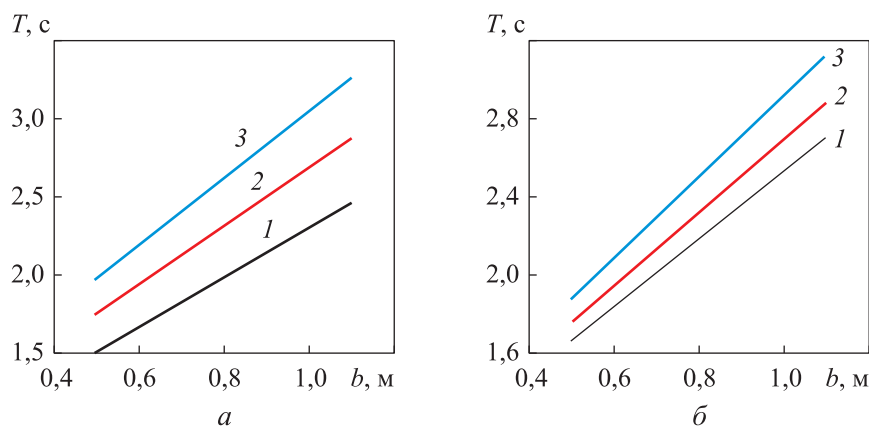


Рис. 6. Зависимости времени прохождения цилиндром трассы T от его длины b при различных значениях длины магистрали (a) и начального давления (b): 1 — $L = 60$ м; 2 — $L = 80$ м; 3 — $L = 100$ м; 4 — $P_0 = 25$ кПа; 5 — $P_0 = 30$ кПа; 6 — $P_0 = 35$ кПа

а следовательно, уменьшается время прохождения трассы T (рис. 6, б). При этом падает, как конечное давление воздуха в ресивере, так и время его достижения (рис. 3, б).

Влияние увеличения длины магистрали L на давление воздуха в ресивере p и скорость движения цилиндра W показано на рис. 4. Видно, что скорость движения цилиндра падает (рис. 4, а), а конечное давление в ресивере растет (рис. 4, б), как и время его достижения (рис. 6, а). Рост давления воздуха в ресивере связан с большим объемом воздуха, который вытесняется из трубы в ресивер.

Возрастание диаметра трубы при прочих равных условиях приводит к росту массы и инерционности цилиндра. Поэтому на рис. 5, а, как и на рис. 2, б, скорость движения цилиндра снижается. При этом увеличивается объем воздуха, который вытесняется из трубы в ресивер, и повышается конечное давление воздуха в ресивере (рис. 5, б).

Результаты влияния различных параметров на время прохождения цилиндром трассы T приведены на рис. 6, а и б.

Выводы

1. Цилиндр, в форме которого отходы движутся по магистрали в ресивер, при увеличении длины магистрали перемещается с меньшей скоростью, а давление воздуха в ресивере повышается.

2. Удлинение цилиндра при прочих равных условиях приводит к возрастанию его инерционности. Поэтому, чем длиннее цилиндр, тем медленнее он разгоняется, вследствие чего увеличивается время достижения ресивера.

3. Рост диаметра трубы при прочих равных условиях приводит к повышению массы и инерционности цилиндра, вследствие чего скорость его движения падает. При этом возрастает объем воздуха, который вытесняется из трубы в ресивер, и повышается конечное давление воздуха в ресивере.

4. Полученная зависимость времени прохождения цилиндром трассы от различных параметров позволяет усовершенствовать процесс отбора токсичных отходов из различных бункеров.

Литература

- [1] Dremel M., Banerjee I., Shaun H. et al. Vacuum pumping system for ITER's deuterium tritium operational campaign. *Vak. Forschung und Prax.*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 44–48, doi: <http://doi.org/10.1002/vipr.202200791>
- [2] Tripathi P.K., Singh R., Bhatnagar V.K. et al. Design, fabrication, and performance testing of a vacuum chamber for pulse compressor of a 150 TW Ti:sapphire laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2012, vol. 390, art. 012014, doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/390/1/012014>
- [3] Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В. и др. Эффективный способ утилизации мелкодисперсных техногенных отходов горно-металлургического производства. *Вестник ЗабГУ*, 2020, т. 26, № 2, с. 40–49, doi: <http://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-2-40-49>

- [4] Uteпов Y., Akhmetov D., Akhmatshaeva I. et al. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and chemical additives on the properties of self-compacting concrete. *Complex Use of Mineral Resources*, 2019, no. 4, pp. 64–73, doi: <http://doi.org/10.31643/2019/6445.39>
- [5] Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Моделирование работы пневмотранспорта в импульсно-поршневом режиме. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2018, № 3, с. 6–9.
- [6] Сысоев С.Н., Сажин А.В., Романова В.Ю. Методика конструирования вакуумных захватных агрегатных модулей промышленных роботов. *Современные наукоемкие технологии*, 2019, № 11–1, с. 97–101.
- [7] Градецкий В.Г., Князьков М.М., Семенов Е.А. и др. Динамические процессы в вакуумных контактных устройствах роботов вертикального перемещения в водной среде. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2019, т. 20, № 7, с. 417–421, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.20.417-421>
- [8] Жмаков Г.Н. Проектирование напорных и вакуумных наружных систем канализации. *Водоснабжение и санитарная техника*, 2016, № 9, с. 74–79.
- [9] Сычев М.В., Рыбин Г.В. Основные направления проектирования усовершенствованных энергоэффективных жидкостнокольцевых вакуумных насосов в АПК. *Инновационная техника и технология*, 2022, т. 9, № 3, с. 68–73.
- [10] Мазанов Р.Р., Мутуев Ч.М., Аушев Х.М. Вакуум-система автоматизированных насосных станций подкачки оросительных систем. *Проблемы развития АПК региона*, 2019, № 3, с. 93–97.
- [11] Лавринович В.А., Перцев А.А., Рыльская Л.А. Разработка вакуумной дугогасительной камеры для одноразрывного вакуумного выключателя на 110 Кв. *Электричество*, 2021, № 4, с. 58–64, doi: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-4-58-64>
- [12] Кравченко С.В., Нестеров С.Б., Романько В.А. и др. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-598>
- [13] Амлингер Х., Рот Х., Мельц Б. Эффективные многоступенчатые вакуумные насосные станции для вакуумирования стали. *Черные металлы*, 2015, № 12, с. 37–43.
- [14] Базиненков А., Каменихин А. *Технические средства получения и измерения давления вакуумной технологической среды*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 64 с.
- [15] Клеснски К., Мерье Ф., Этинген Л. Эффективные вакуумные системы для науки и промышленности. *Наноиндустрия*, 2014, № 2, с. 8–12.

References

- [1] Dremel M., Banerjee I., Shaun H. et al. Vacuum pumping system for ITER's deuterium tritium operational campaign. *Vak. Forschung und Praxis*, 2022, vol. 34, no. 5, pp. 44–48, doi: <http://doi.org/10.1002/vipr.202200791>
- [2] Tripathi P.K., Singh R., Bhatnagar V.K. et al. Design, fabrication, and performance testing of a vacuum chamber for pulse compressor of a 150 TW Ti:sapphire laser. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2012, vol. 390, art. 012014, doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/390/1/012014>
- [3] Makarov V.N., Ugolnikov A.V., Makarov N.V. et al. Efficient method of recycling of finely dispersed man-made wastes of mining and metallurgical production. *Vestnik ZabGU [Transbaikalian State University Journal]*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 40–49, doi: <http://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-2-40-49> (in Russ.).
- [4] Uteпов Y., Akhmetov D., Akhmatshaeva I. et al. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and chemical additives on the properties of self-compacting concrete. *Complex Use of Mineral Resources*, 2019, no. 4, pp. 64–73, doi: <http://doi.org/10.31643/2019/6445.39>
- [5] Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Simulation of pneumatic transport in a pulse-piston mode. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*, 2018, no. 3, pp. 6–9. (In Russ.).
- [6] Sysoev S.N., Sazhin A.V., Romanova V.Yu. Design method of vacuum gripping aggregate modules of industrial robots. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, 2019, no. 11–1, pp. 97–101. (In Russ.).

- [7] Gradetskiy V.G., Knyazkov M.M., Semenov E.A. et al. Dynamic processes in vacuum contact devices of robots for vertical motion in the water environment. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 417–421, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.20.417-421> (in Russ.).
- [8] Zhmakov G.N. Designing pressure and vacuum public sewers. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Technique], 2016, no. 9, pp. 74–79. (In Russ.).
- [9] Sychev M.V., Rybin G.V. The main directions of designing improved energy-efficient liquid ring vacuum pumps in the agro-industrial complex. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya* [Innovative Machinery and Technology], 2022, vol. 9, no. 3, pp. 68–73. (In Russ.).
- [10] Mazanov R.R., Mutuev Ch.M., Aushev Kh.M. Vacuum system of automated pump stations pumping irrigation systems. *Problemy razvitiya APK regiona* [Development Problems of Regional Agro-Industrial Complex], 2019, no. 3, pp. 93–97. (In Russ.).
- [11] Lavrinovich V.A., Pertsev A.A., Rylskaya L.A. Development of the vacuum arc chute for a 110 kV single-break vacuum circuit breaker. *Elektrichestvo*, 2021, no. 4, pp. 58–64, doi: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-4-58-64> (in Russ.).
- [12] Kravchenko S.V., Nesterov S.B., Romanko V.A. et al. Approaches to creation of complex systems for trying-out and testing of spacecrafts. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-598> (in Russ.).
- [13] Amlinger Kh., Rot Kh., Melts B. Efficient multi-stage vacuum pumping stations for steel vacuumisation. *Chernye metally*, 2015, no. 12, pp. 37–43. (In Russ.).
- [14] Bazinenkov A., Kamenikhin A. *Tekhnicheskie sredstva polucheniya i izmereniya davleniya vakuumnoy tekhnologicheskoy sredy* [Technical means for obtaining and measuring pressure of vacuum process medium]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 64 p. (In Russ.).
- [15] Klesnski K., Merye F., Etingen L. Effective vacuum systems for science and industry. *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2014, no. 2, pp. 8–12. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 08.10.2023

Информация об авторах

ВЕЛИКАНОВ Николай Леонидович — доктор технических наук, профессор, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий». Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236041, Калининград, Российская Федерация, ул. Александра 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 Nikolai Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Professor of Educational and Scientific Cluster "Institute of High Technologies". Immanuel Kant Baltic Federal University (236041, Kaliningrad, Russian Federation, Alexander Nevsky street, 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. Работа импульсно-вакуумной системы сбора мелкодисперсных твердых отходов производства. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 54–60.

Please cite this article in English as:

Velikanov N.L., Naumov V.A. Pulse-vacuum system operation in collecting the industrial fine-dyspersated solid waste. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 4, pp. 54–60.