

УДК 621.512.2

Определение и прогнозирование ресурса самодействующих клапанов*

С.С. Бусаров, Р.Э. Кобыльский, И.С. Бусаров

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Determination and prediction of the automatic valve service life

S.S. Busarov, R.E. Kobylsky, I.S. Busarov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University

Клапаны в поршневом компрессоре — одни из самых уязвимых узлов, от которых во многом зависит его функционирование. Созданная в настоящее время конструкция самодействующих клапанов для тихоходных поршневых компрессоров требует экспериментального исследования для подтверждения прогнозируемого ресурса таких узлов. Предложена методика экспериментальных ресурсных испытаний и стенд для ее реализации. В режимах, характерных для тихоходных поршневых компрессоров, проведены испытания клапанов с эластомерными элементами в течение 5000 ч. Выполнены исследования по определению физико-механических свойств эластомерных элементов. Анализ полученных результатов показал, что для указанного времени эксплуатации параметры остаются неизменными. В дальнейшем запланировано продолжение испытаний с доведением подтвержденного ресурса до 25 000...30 000 ч.

EDN: FELVPN, <https://elibrary/felvpn>

Ключевые слова: тихоходный поршневой компрессор, экспериментальное исследование, утечки газа, эластомерный элемент, ресурс самодействующих клапанов

Valves are among the vulnerable units in a piston compressor, and they significantly influence the system operation. The currently created design of the automatic valves for a low-speed piston compressor requires an experimental research to confirm the predicted service life of such valves. The paper proposes a method for experimental service life testing and a stand for its implementation. Valves with elastomeric elements were tested for 5,000 hours in modes typical for the low-speed piston compressors. Research was carried out to determine physical and mechanical properties of the elastomeric elements. Analysis of the obtained results shows that the parameters remain unchanged for the specified operation time. In the future, it is planned to continue testing and bring the confirmed service life up to 25,000...30,000 hours.

EDN: FELVPN, <https://elibrary/felvpn>

Keywords: low-speed piston compressor, experimental research, gas leaks, elastomeric element, automatic valve service life

* Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 24-29-00272.

Периодичность ремонта технологического оборудования определяется принятым межремонтным циклом (временем между двумя планово-предупредительными ремонтами) или возникновением неисправностей элементов [1–4]. Для снижения энергоемкости технологического процесса разрабатываются и реализуются энергосберегающие мероприятия, направленные на повышение надежности и энергоэффективности технологического оборудования [5–7].

На объектах промышленного и специального назначения применяют различное оборудование, к основным из которых относятся поршневые компрессоры (ПК) для сжатия различного газа.

Так, по данным работы [8], наибольшее влияние на энергоэффективность ПК в период продолжительной эксплуатации оказывает состояние его клапанов.

Согласно статистическим данным, в ПК 4M16-45/35-55 (ООО «Сумский машиностроительный завод»), дизель-компрессоре ДК10-2Р (АО «Компрессор»), ПК типа 5Г (Пензенский завод компрессорного машиностроения) наиболее часто проводят ремонт, очистку или замену самодействующих клапанов (СК), что составляет 30...63 % поломок относительно общего числа ремонтов.

Анализ данных работ [9–12] показал, что общая наработка до отказа СК зависит от их конструкции и условий эксплуатации. Основным фактором, влияющим на ресурс всасывающих и нагнетательных СК, являются скорость посадки СК на седло и удар об ограничитель подъема. При выполнении запорного органа, седла и ограничителя подъема из металла из-за высокой скорости посадки (более 3 м/с) происходит повышенный износ сопрягаемых элементов, приводящий к уменьшению герметичности СК в закрытом состоянии, а следовательно, и интегральных характеристик ПК.

Герметичность СК зависит от его конструктивных особенностей, технологии изготовления и материалов пар сопряжения *седло — запорный орган, ограничитель подъема — запорный орган*. Известно [12], что негерметичность закрытых всасывающих и нагнетательных СК приводит к снижению производительности ступени ПК и нарушению теплового режима ПК, обусловленного нарастанием температуры нагнетаемого газа, вследствие его перетечек из полости нагнетания в рабочий объем цилиндра.

В ступенях с негерметичными всасывающими СК при сжатии и нагнетании горячий газ будет перетекать из рабочего пространства в полость всасывания, увеличивая температуру газа, всасываемого в цилиндр в следующем рабочем цикле, что впоследствии способствует росту температуры газа в цилиндре в начале и конце процесса сжатия, а следовательно, и температуры нагнетаемого газа. Это будет происходить до того момента, пока не установится новый тепловой режим, и, как следствие, ухудшатся интегральные характеристики ПК.

Самым простым и распространенным методом оценки герметичности СК является статическая продувка [12, 13], по которому находят скорость истечения газа из определенного объема. Утечки газа через закрытые СК определяются условным зазором $\delta_{усл}$, измеряемым в микрометрах. Под условным принято понимать зазор по периметру прилегания запорного органа к седлу СК. Для различных технически исправных СК условный зазор составляет 0,25...1,00 мкм [13].

При открытии и закрытии СК возникают удары запорного органа о седло и ограничитель подъема. Такие динамические нагрузки могут вызывать разрушение запорного органа СК, что влечет за собой рост утечек газа и, как следствие, ухудшение интегральных характеристик ПК. Энергия удара будет зависеть от массы запорного органа и его скорости посадки на седло или ограничитель подъема перед ударом о седло или ограничитель подъема.

Для снижения ударных нагрузок можно уменьшить массу запорного органа и скорости посадки на седло или ограничитель подъема. Принято считать, что средняя скорость посадки запорного органа СК от седла до ограничителя подъема не должна превышать 3 м/с, а от ограничителя подъема до седла — 1 м/с [9, 11, 13].

Наряду с динамическими нагрузками существуют и статические, которые возникают на запорном органе вследствие перепада давления в закрытом СК.

Для обеспечения автономной работы компрессорной установки требуется длительный ресурс ответственных узлов и деталей. Так как одним из самых уязвимых элементов компрессорной установки являются всасывающие и нагнетательные СК, необходимо определить работоспособность и спрогнозировать ресурс разрабатываемого СК.

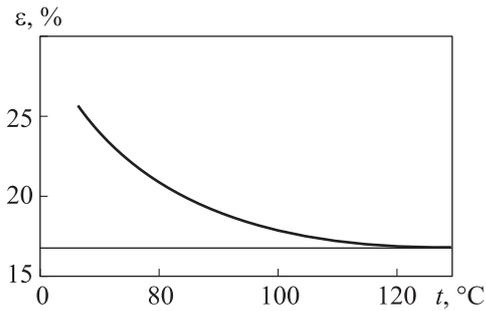


Рис. 1. Кривая долговечности резины

Усталостная (динамическая) выносливость N характеризуется числом циклов многократных деформаций образцов до их разрушения. При испытании переменными параметрами могут быть амплитуда нагрузки, частота и амплитуда деформации.

Существует большое количество методов испытания резины на усталостную выносливость. Широко применяют испытания на многократное растяжение до разрушения образцов резины в виде двухсторонних лопаток.

Стандартизован метод испытания на многократное сжатие до разрушения образцов в виде массивных цилиндров, внутри которых измеряют температуру, характеризующую теплообразование вследствие гистерезисных потерь и затруднений отвода теплоты во внешнюю среду.

Часто проводят испытания резины на сопротивление образованию трещин и их разрастанию в образцах, подвергаемых многократному изгибу и имеющих зоны повышенной концентрации напряжений, где и происходит их разрушение. В первом виде испытаний определяют число циклов деформации до начала разрушения образца (появления на нем первичных трещин), во втором — наблюдают за их ростом до определенного предела повреждения, которое наносят на образец путем прокола или надреза.

Показателем испытаний на многократное растяжение–сжатие является динамическая выносливость, характеризуемая числом циклов деформации до разрушения образца, и определяемая по формуле

$$N = nt,$$

где n — частота деформации, цикл/мин; t — продолжительность испытания до разрушения образца, мин.

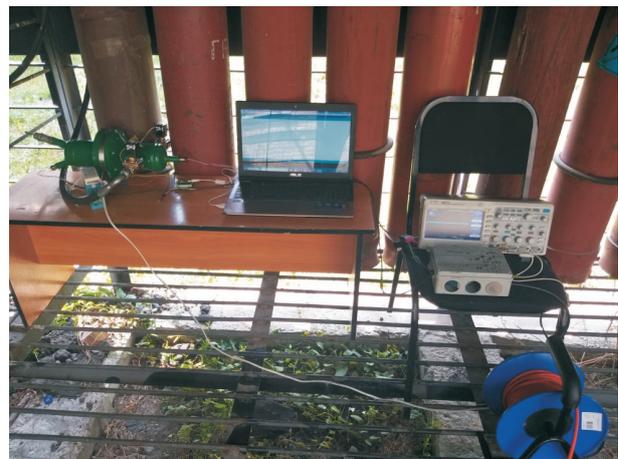
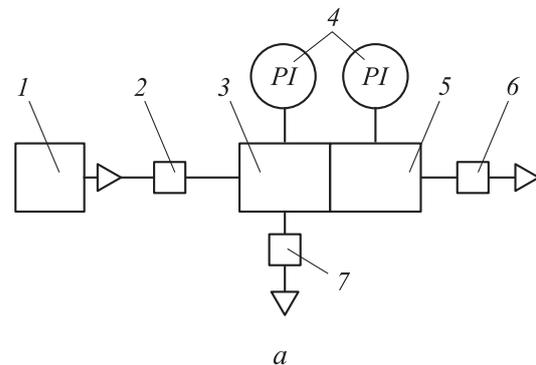
За результаты принимают среднее арифметическое не менее двенадцати значений, отме-

чая пределы измерения показателей и условия испытания: температуру, амплитуду и частоту деформации. Результаты испытаний представляют в виде сводной таблицы.

Известно [14], что если резину испытывают на многократный изгиб при небольшой деформации ϵ (до 30 %), то образец не разрушается в течение 8 ч. Принято считать, что кривая $\epsilon = f(t)$ (где t — температура) асимптотически стремится к горизонтали, т.е. образец будет работать неопределенно долго. Кривая долговечности резины как функция относительной деформации (относительного сжатия) приведена на рис. 1.

На основании изложенного становится актуальной задача проведения экспериментальных ресурсных испытаний СК.

Методика экспериментального исследования. Для испытания СК с эластомерными элементами на ресурс разработан стенд, схема которого приведена на рис. 2, а.



б

Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) стенда для испытания СК с эластомерными элементами на ресурс

Стенд работает следующим образом. Из баллонов 1 со сжатым воздухом газ поступает на электромагнитный клапан 2, который дозированно пропускает воздух в стенд, состоящий из нагнетательной 3 и буферной 5 частей, между которыми установлена клапанная плита с СК. Газ сбрасывается через электромагнитный клапан 7.

Работу ПК — процессы нагнетания и всасывания — имитируют с помощью электромагнитных клапанов 2 и 7. Буферная часть служит для накопления газа, который перетекает через открытые СК из нагнетательной части, т. е. имитирует нагнетательный трубопровод с буферной емкостью. Для поддержания постоянного давления после СК в буферной части установлен предохранительный клапан 6, срабатывающий при давлении 25 атм.

Электромагнитными клапанами 2 и 7 управляет микроконтроллер на базе Arduino. Давление в нагнетательной и буферной частях фиксируют соответствующие датчики 4 серии Д16.

Внешний вид стенда для испытания СК с эластомерными элементами на ресурс показан на рис. 2, б. Разработанный стенд полностью автоматизирован и не требует постоянного присутствия персонала. Испытания проводили в течение 10 месяцев. Общая отработка СК составила 5000 ч.

Чтобы определить работоспособность и спрогнозировать ресурс СК, до и после испытаний выполняли статические продувки СК и исследования структурно-морфологических характеристик и рельефа поверхности эластомерного элемента СК.

Результаты исследования. Согласно статическим продувкам трех различных пар СК, условный зазор остался без изменений в пределах 0,045...0,055 мкм.

Для исследования структурно-морфологических характеристик и рельефа поверхности выбрали три образца одинакового размера. Образцы представляли собой резиновые уплотнения в виде конуса, выполненные из разных синтетических каучуков, используемых в одноступенчатых компрессорных агрегатах высокого и среднего давления для систем жизнеобеспечения. Первый образец изготавливали из синтетического дивинильного каучука (СКД), второй — из синтетического изопренового каучука (СКИ-3), третий — из их композиции (СКД + СКИ-3).

Выбранные материалы детально изучали методом термического анализа в режиме измерения кривых методами термогравиметрии (ТГ), дифференциальной ТГ (ДТГ), дифференциального анализа тепловыделения или теплопоглощения (ДТА).

Термические превращения (деградацию материалов, композиций и изделий на основе резин, полимеров, пластических композиций и т. д.) оценивали методом термического анализа, исследуя термоустойчивость и процессы термоокисления.

Термоустойчивость определяется начальной и максимальной температурами процесса химического разложения объекта с потерями массы и протекающими тепловыми эффектами или процесса физического характера без потери массы, но с выраженными тепловыми эффектами (плавлением, кристаллизацией, термомеханической деформацией, пластификацией и др.). Термоокисление характеризуется начальной и максимальной температурами процесса горения объекта с выраженным экзотермическим тепловым эффектом.

При изучении указанных свойств образцов применяли синхронный термический анализатор STA 449C Jupiter (NETZSCH) в режиме ТГ–ДТГ–ДТА. Эксперимент проводили в окислительной среде при скорости нагрева 10...1000 °С/мин. Охлаждение происходило естественным путем. Образцы мелко измельчали. Масса навесок составляла 40...80 мг, чувствительность весов — 0,1 мкг, дрейф массы при 1000 °С — 1 мкг/ч. Все расчеты выполняли с помощью программного обеспечения Proteus фирмы NETZSCH.

Результаты исследования в виде кривых ТГ–ДТГ–ДТА для первого–третьего образцов приведены на рис. 3, а–в.

Анализ результатов количественного термического анализа образцов позволяет заключить следующее:

- кривые ТГ–ДТГ–ДТА первого и второго образцов подобны по характеристикам термоустойчивости в пределах погрешности измерений, у третьего образца они значительно отличаются от двух других;
- динамика протекания термоокисления (горения) в образцах имеет незначительные различия, что особенно видно в области высокой температуры (700...1000 °С).

Измерения проводили на атомно-силовом микроскопе MFP-3DSA (Asylum Research)

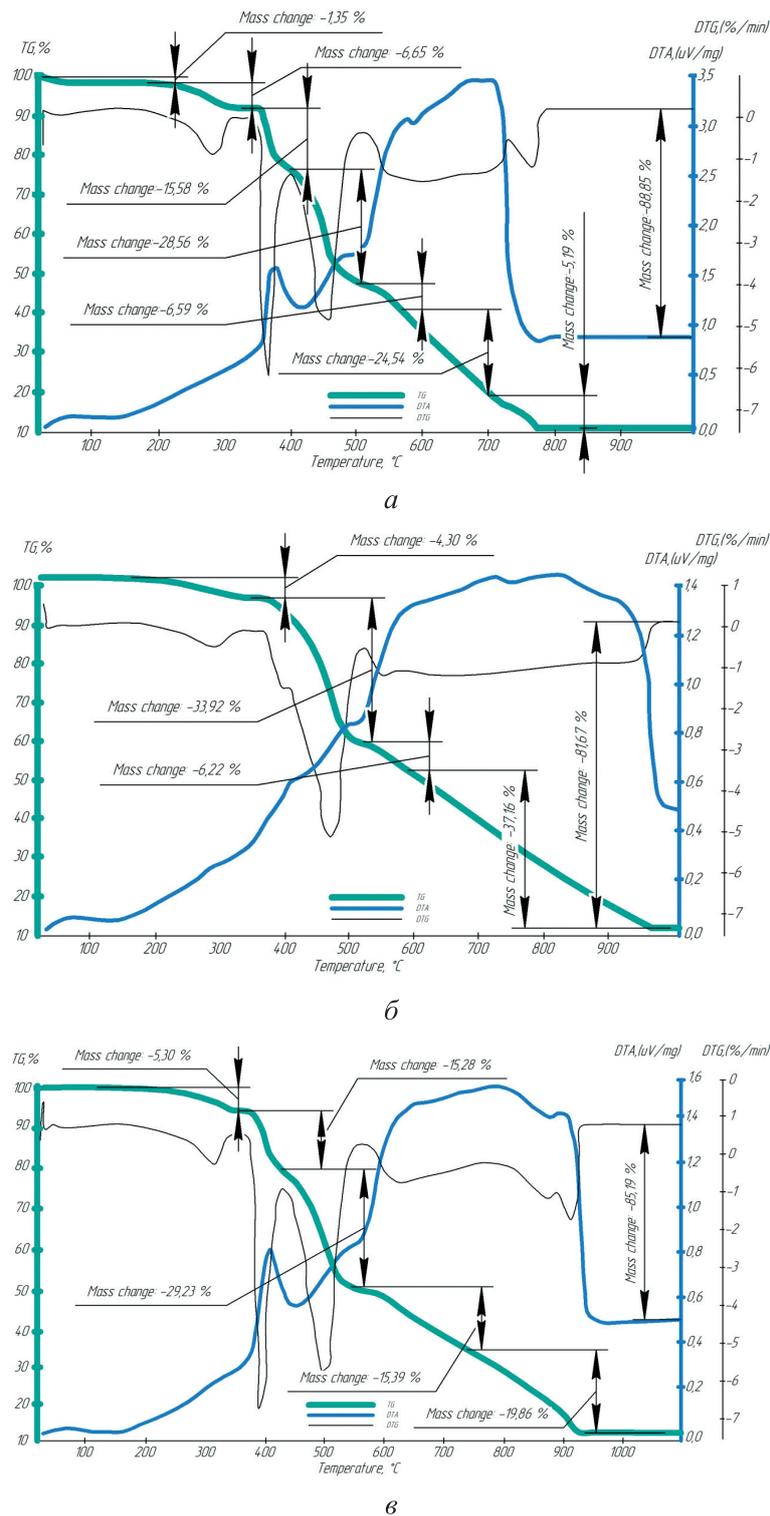


Рис. 3. Кривые ТГ–ДТГ–ДТА для первого (а), второго (б) и третьего (в) образцов

в полуконтактном режиме сканирования на воздухе (при относительной влажности 50 % и температуре 23 °С), используя зондовый датчик НА_НР (NT-MDTSI) с резонансной частотой 380 кГц.

Результаты исследования поверхности первого образца приведены на рис. 4, где а и б — обзорное топографическое изображение площадью 30×30 мкм² и рассчитанные по нему параметры шероховатости поверхности; в, г и д, е

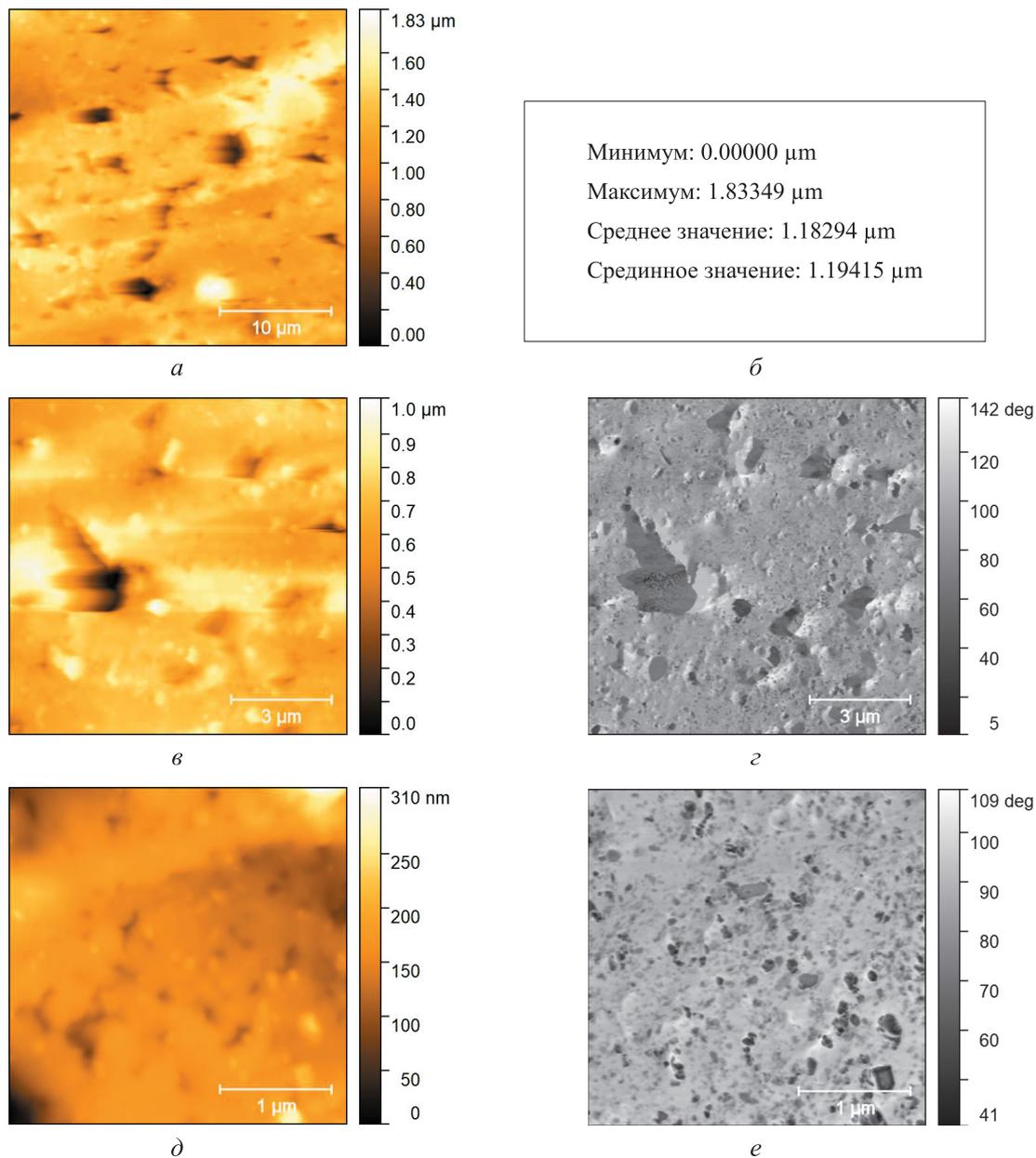


Рис. 4. Результаты исследования поверхности первого образца

топографические и фазово-контрастные изображения площадью 10×10 и 3×3 мкм² соответственно. На фазово-контрастных изображениях темные участки соответствуют местам расположения частиц твердого наполнителя

Для второго и третьего образцов получены аналогичные результаты.

Выводы

1. Анализ результатов исследования показал, что все образцы различаются по шероховатости поверхности и фазово-контрастным изображениям. Наименьшую шероховатость имеет тре-

тий образец. Для всех образцов характерно равномерное распределение частиц наполнителя в матрице. Наличие трещин не зафиксировано. Геометрические характеристики эластомерного элемента не изменены.

2. Результаты экспериментального исследования в течение 5000 ч при условиях эксплуатации, соответствующих таковым для тихоходного ПК, подтвердили возможность применения эластомерных элементов в СК воздушных и газовых ПК.

3. В дальнейшем запланированы экспериментальные исследования до ресурса 25 000...30 000 ч.

Литература

- [1] Щерба В.Е. *Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия*. Москва, Юрайт, 2023. 323 с.
- [2] Байков И.Р., Китаев С.В., Файрушин Ш.З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2015, № 3, с. 28–30.
- [3] Котлов А.А. *Математическая модель воздушного поршневого компрессора среднего давления для решения задач энергоаудита*. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2011. 138 с.
- [4] Калекин В.С., Калекин Д.В., Неведченко А.Н. Математическая модель поршневого пневмодвигателя с самодействующими клапанами. *Омский научный вестник*, 2013, № 3, с. 72–76.
- [5] Кавтарадзе Р.З. *Локальный теплообмен в поршневых двигателях*. Москва, Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
- [6] Карташов Э.М. *Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел*. Москва, Высшая школа, 2001. 549 с.
- [7] Busarov S.S., Yusha V.L., Goshlya R.Yu. et al. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor. *Procedia Eng.*, 2016, pp. 297–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.706>
- [8] Чичинадзе А.В., ред. *Основы трибологии (трение, износ, смазка)*. Москва, Машиностроение, 2001. 664 с.
- [9] Бусаров С.С., Юша В.Л., Недовенчаный А.В. и др. Ресурс работы тихоходных длинноходовых ступеней компрессорных агрегатов и возможные пути его увеличения. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2019, т. 3, № 1, с. 42–47, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49>
- [10] Меренков Д.Ю. *Совершенствование грибковых клапанов поршневых и мембранных микрокомпрессоров*. Омск, ОмГТУ, 2004. 215 с.
- [11] Ваняшов А.Д., Кабаков А.Н., Коваленко С.В. Результаты исследования газодинамических характеристик самодействующих клапанов поршневых компрессорных и расширительных машин. *Компрессорная техника и пневматика*, 2004, № 5, с. 27–30.
- [12] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет*. Москва, КолосС, 2006. 456 с.
- [13] Юша В.Л., Бусаров С.С., Бусаров И.С. Оценка негерметичности самодействующих клапанов с эластомерными конструктивными элементами и её влияния на рабочий процесс тихоходных поршневых компрессорных ступеней. *Компрессорная техника и пневматика*, 2018, № 3, с. 9–13.
- [14] Гарифуллин Ф.А., Ибляминов Ф.Ф. *Конструкционные резины и методы определения их механических свойств*. Казань, КГТУ, 2000. 77 с.

References

- [1] Shcherba V.E. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye porshnevyykh kompressorov obemnogo deystviya* [Theory, calculation and design of reciprocating positive displacement compressors]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 323 p. (In Russ.).
- [2] Baykov I.R., Kitaev S.B., Fayrushin Sh.Z. Diagnostics of reciprocating compressors' technical conditions. *Energobezopasnost i energosberezhenie* [Energy Safety and Energy Economy], 2015, no. 3, pp. 28–30. (In Russ.).
- [3] Kotlov A.A. *Matematicheskaya model vozdushnogo porshnhevogo kompressora srednego davleniya dlya resheniya zadach energoaudita* [Mathematical model of a medium pressure air piston compressor for solving energy audit problems]. Sankt-Petersburg, SPbGPU Publ., 2011. 138 p. (In Russ.).
- [4] Kalekin V.S., Kalekin D.V., Nefedchenko A.N. Mathematical model of piston pneumatic engine with self-acting valves. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2013, no. 3, pp. 72–76. (In Russ.).
- [5] Kavtaradze R.Z. *Lokalnyy teploobmen v porshnevyykh dvigatelyakh* [Local heat exchange in piston engines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 592 p. (In Russ.).
- [6] Kartashov E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of heat conduction of solid bodies]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 549 p. (In Russ.).

- [7] Busarov S.S., Yusha V.L., Goshlya R.Yu. et al. The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor. *Procedia Eng.*, 2016, pp. 297–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.706>
- [8] Chichinadze A.V., ed. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p. (In Russ.).
- [9] Busarov S.S., Yusha V.L., Nedovenchanyy A.V. et al. Service life of low-speed long-running stages of compressor units and possible ways of its increase. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroenie* [Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering], 2019, vol. 3, no. 1, pp. 42–47, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49> (in Russ.).
- [10] Merenkov D.Yu. *Sovershenstvovanie gribkovykh klapanov porshnevnykh i membrannykh mikrokompressorov* [Improvement of mushroom valves of piston and membrane micro-compressors]. Omsk, OmGTU Publ., 2004. 215 p. (In Russ.).
- [11] Vanyashov A.D., Kabakov A.N., Kovalenko S.V. Results of investigation of gas-dynamic characteristics of self-acting valves of piston compressor and expansion machines. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2004, no. 5, pp. 27–30. (In Russ.).
- [12] Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory. T. 1. Teoriya i raschet* [Piston compressors. Vol. 1. Theory and calculation.]. Moscow, KolosS Publ., 2006. 456 p. (In Russ.).
- [13] Yusha V.L., Busarov S.S., Busarov I.S. Evaluation of leakage of self-acting valves with elastomeric structural elements and its influence on the working process of slow-speed piston compressor stages. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2018, no. 3, pp. 9–13. (In Russ.).
- [14] Garifullin F.A., Ibyaminov F.F. *Konstruksionnye reziny i metody opredeleniya ikh mekhanicheskikh svoystv* [Structural rubbers and methods of determining their mechanical properties]. Kazan, KGTU Publ., 2000. 77 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 12.04.2024

Информация об авторах

БУСАРОВ Сергей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: bssi1980@mail.ru).

КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович — аспирант кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: roman.kobilsky@gmail.com).

БУСАРОВ Игорь Сергеевич — ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: habr86@mail.ru).

Information about the authors

BUSAROV Sergei Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Refrigerating and Compressor Engineering and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: bssi1980@mail.ru).

KOBYLSKY Roman Eduardovich — Postgraduate, Department of Refrigerating and Compressor Engineering and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: roman.kobilsky@gmail.com).

BUSAROV Igor Sergeevich — Assistant Lecturer, Department of Refrigerating and Compressor Engineering and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: habr86@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Бусаров И.С. Определение и прогнозирование ресурса самодействующих клапанов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 1, с. 76–83.

Please cite this article in English as:

Busarov S.S., Kobylsky R.E., Busarov I.S. Determination and prediction of the automatic valve service life. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 1, pp. 76–83.