

УДК 621.512

Создание модели расчета рабочих процессов малорасходных тихоходных компрессоров при работе на фреоне R134a^{*}

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

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Development of the operating process computation model for a low-flow low-speed compressor working on the R134a freon

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

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

■ Применение тихоходных компрессоров в холодильной технике привело к необходимости проведения экспериментальных исследований с рабочими телами для последующего создания моделей расчета. Приведены результаты экспериментального исследования при организации рабочего процесса тихоходной компрессорной ступени со сжатием фреона R134a. Выполнены работы по адаптации существующей математической модели расчета рабочих процессов тихоходных компрессорных ступеней, функционирующих на фреоне R134a. Получено уточненное уравнение для коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры, которое позволит проводить теоретические исследования тихоходных компрессоров с таким рабочим телом.

EDN: AWLITG, <https://elibrary/awlitg>

Ключевые слова: тихоходный поршневой компрессор, рабочие процессы, математическая модель, фреон R134a

■ Expansion of the low-speed compressors application scope leads to a need to conduct experimental studies with the working fluids used in the refrigeration equipment for subsequent creation of the computation models. The paper presents results of the experimental studies in organizing an operating process of the low-speed compressor stage with the R134a freon compression. Work was carried out to adapt the existing mathematical model of computing operating processes of the low-speed compressor stages working on the R134a freon. The obtained refined equation for the heat transfer coefficient on the working chamber inner surface would allow future theoretical studies of the low-speed compressors with such working fluid.

EDN: AWLITG, <https://elibrary/awlitg>

Keywords: low-speed piston compressor, working processes, mathematical model, R134a freon

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20010.

Показатели эффективности рабочего процесса малорасходных поршневых компрессоров (ПК) на основе тихоходных ступеней сжатия достаточно высоки и сопоставимы с показателями серийно выпускаемых многоступенчатых ПК [1–3]. Вместе с тем в многоступенчатых ПК получение средних и высоких давлений связано со сложной технологией, наличием ступеней разного типоразмера и промежуточных теплообменных аппаратов, а также с потерями в коммуникациях ПК [4–6].

Указанные негативные факторы отсутствуют в одноступенчатых тихоходных ПК, где давление рабочего тела (РТ) можно повысить в 100–120 раз при температурах, близких к режимам многоступенчатых быстроходных ПК, а в некоторых случаях обеспечивающих более щадящие температурные режимы.

Применение тихоходных компрессоров в холодильной технике потребовало проведения экспериментальных исследований с рабочими телами для последующего создания моделей расчета. Так, предварительные теоретические исследования выявили возможность значительного упрощения технологической схемы холодильной машины при использовании тихоходного ПК [7, 8]. Это обусловлено тем, что режим работы тихоходного ПК обеспечивает низкий показатель политропы сжатия за счет интенсивного охлаждения цилиндра и продолжительного времени сжатия, что позволит иметь низкую температуру РТ в конце процесса сжатия при высоком давлении РТ. Однако параметры РТ могут оказаться левее правой пограничной кривой, что станет причиной частичной конденсации, либо этот процесс может начаться на выходе из ПК.

Схемы холодильной машины с двухступенчатым быстроходным ПК и одноступенчатым тихоходным ПК [9] приведены на рис. 1, где I — первая ступень ПК; II — межступенчатый теплообменный аппарат; III — вторая ступень сжатия; IV — конденсатор; V, VII — дроссели; VI — промежуточный сосуд; VIII — испаритель; T_{W1} и T_{W2} — температура воды на входе в конденсатор и на выходе из него; T_{S1} и T_{S2} — температура рассола на выходе из испарителя и на входе в него.

То, что в современных холодильных машинах вызывает опасение, а именно образование жидкой фазы в рабочей камере ПК, в тихоходных ПК является целью. Так как благодаря пониженной скорости движения поршня

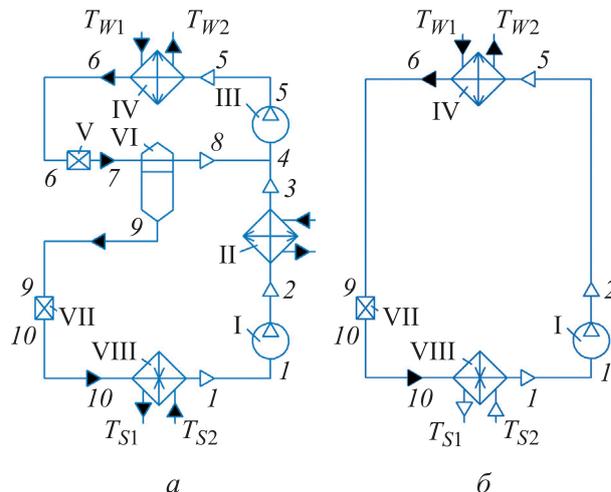


Рис. 1. Схемы холодильной машины с двухступенчатым быстроходным ПК (а) и одноступенчатым тихоходным ПК (б):

- 1–2 — сжатие в первой ступени;
- 2–3 — промежуточное охлаждение;
- 4–5 — сжатие во второй ступени;
- 5–6 — конденсация;
- 6–7, 9–10 — дросселирование;
- 10–1 — испарение

(0,25...0,50 м/с) тихоходный ПК нечувствителен к гидравлическим ударам, появление жидкости в камере сжатия вполне допустимо.

Замена в холодильной машине (см. рис. 1) быстроходного двухступенчатого ПК одноступенчатым тихоходным ПК позволит значительно упростить компрессорный узел, а в некоторых случаях существенно уменьшить его массогабаритные параметры или исключить из схемы.

Применение различных фреонов в холодильной технике сопряжено с возможностью негативного воздействия на внешнюю среду [10–13]. На смену широко применяемому хладагенту R12 пришел фреон R134a без запаха и цвета, не оказывающий вредного влияния на внешнюю среду и не содержащий опасных компонентов.

К основным достоинствам фреона R134A относятся:

- экологичность (нетоксичность благодаря отсутствию в составе хладагента хлора, брома, хлорных и бромистых соединений);
- вхождение в состав группы трудновоспламеняемых веществ (хотя при прямом контакте с пламенем могут выделяться токсины);
- безопасность для людей и внешней среды при возникновении утечек (газ неядовитый и легко удаляемый проветриванием);

- простота до- и перезаправки систем без обязательного предварительного очищения оборудования;

- обладание эффективными физическими свойствами, позволяющими добиваться наилучшей работоспособности;

- отсутствие (официально подтвержденное) влияния на озоновый слой в соответствии с международными нормами (ODP = 0).

Кроме того, фреон R134A способствует долговечности уплотнителей, выполненных из нейлона, неопрена и других материалов, применяемых при герметизации контуров оборудования, так как не разрушает их при контакте. А герметичность — обязательное условие эффективной и безаварийной эксплуатации систем, так как попавший в воздух хладагент в некоторых случаях способен преобразовываться

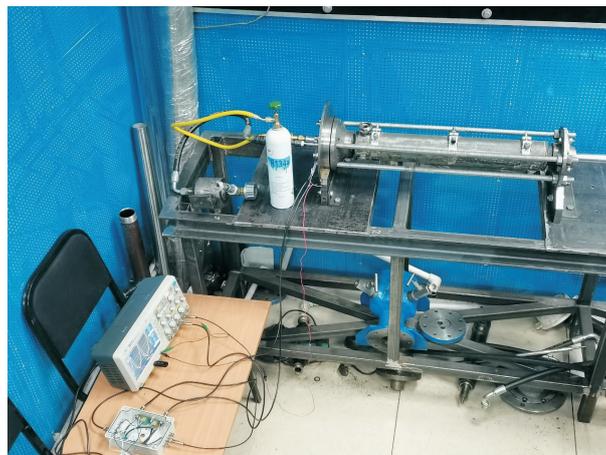
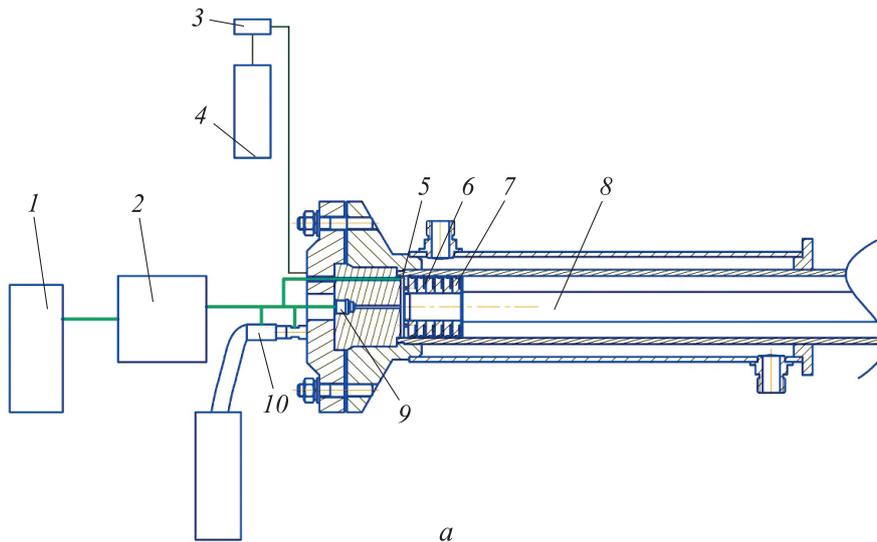
в горючие смеси. Также этот вид фреона индифферентен к полиэфирным смазкам, т. е. срок службы трущихся деталей климатических агрегатов больше, чем у систем, использующих хладагенты другого состава.

Хладагент, востребованный практически во всех областях производства и жизнеобеспечения, применяют как на крупных промышленных предприятиях, так и в быту. Им заправляют различные системы:

- климатические и холодильные агрегаты с герметичным контуром (особенно с центробежными или объемными компрессорными узлами);

- холодильные установки всех типов (бытовые, промышленные, рефрижераторы);

- кондиционеры (для поддержания микроклимата в помещениях и автомобильные);



б

Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментального стенда:

1 — осциллограф; 2 — усилитель; 3 — редуктор; 4 — баллон с фреоном R134a; 5 — датчик температуры; 6 — манжеты; 7 — поршень; 8 — шток; 9 — датчик давления; 10 — расходомер

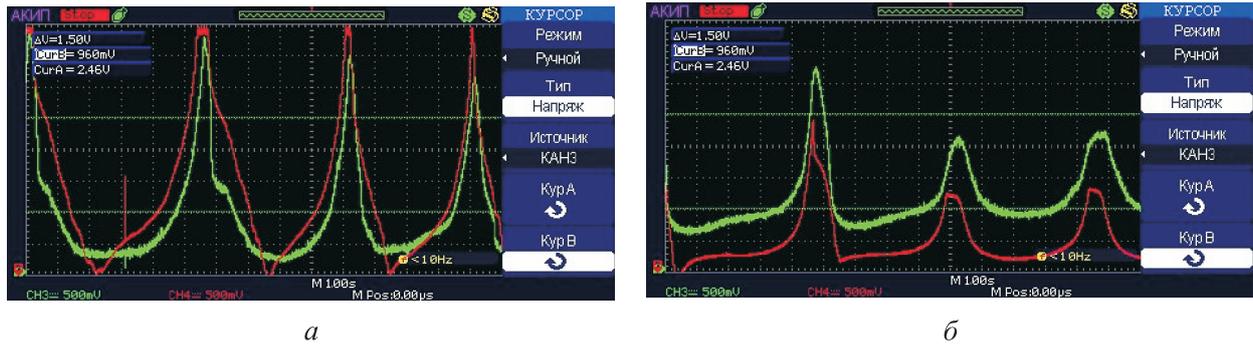


Рис. 3. Экспериментальное распределение давления (—) и температуры (—) фреона R134a в рабочей камере при различных значениях давления нагнетания и времени рабочего цикла:
 а — $p_n = 2$ МПа, $\tau = 2$ с; б — $p_n = 1$ МПа, $\tau = 4$ с

- торговое холодильное оборудование (системы для витрин, отсеков, киосков);
- кондиционирующие системы с температурой более 0°C .

Также фреон R134A задействован при производстве других хладагентов (R404A, R407C), в состав которых входит как компонент.

Дополнительным доказательством эффективности и всесторонней безопасности фреона R134a является его высокая популярность в развитых странах, а также возрастающая с каждым годом доля применения в бытовой технике.

Цель статьи — экспериментальное исследование тихоходного ПК, функционирующего на фреоне R134a, для уточнения существующей математической модели рабочего процесса ПК.

Объект исследования. Исследование рабочего процесса одноступенчатого тихоходного ПК выполнено на экспериментальном стенде по методике, описанной в публикациях [14, 15]. Заданы следующие условия однозначности: геометрические — диаметр цилиндра 0,05 м, ход поршня 0,5 м; граничные — температура

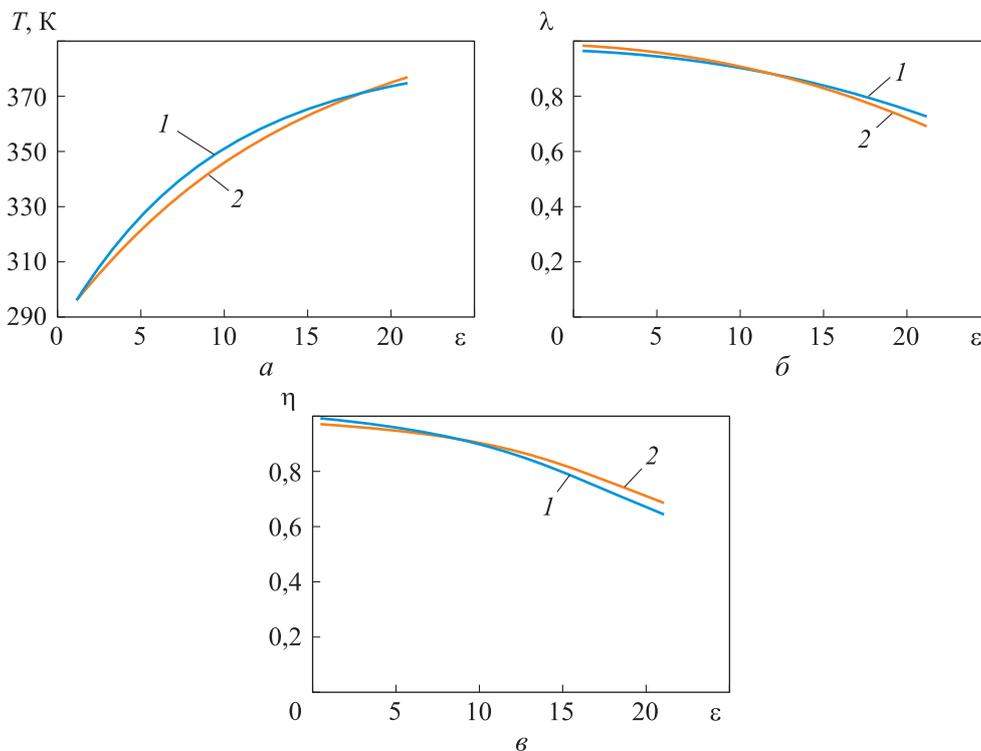


Рис. 4. Экспериментальные (1) и расчетные (2) зависимости средней температуры нагнетаемого фреона R134a T (а), коэффициента подачи λ (б) и индикаторного изотермического КПД η (в) от степени повышения давления ϵ при времени цикла $\tau = 2$ с

охлаждающей среды 290 К, внешняя среда — вода или воздух; физические — РТ — фреон R134a, температура газа на всасывании 290 К, давление всасывания 0,15...0,20 МПа, давление нагнетания до 10 МПа, время рабочего цикла $\tau = 2...4$ с.

Экспериментальное исследование. Экспериментальный стенд, схема и внешний вид которого показаны на рис. 2, работает следующим образом. После пуска гидравлической станции приводной гидроцилиндр подает рабочую жидкость то в одну, то в другую полость, обеспечивая поступательное движение системы шток — поршень. Переключение в гидрораспределителе осуществляется подачей сигналов с концевых датчиков (герконов). На всасывание фреон R134a поступает из баллона через редуктор под давлением 0,15...0,20 МПа. Показания, получаемые с датчиков через усилитель, выводятся на электронный осциллограф. Более подробно методика измерения с описанием датчиков и погрешностей измерения изложена в работе [14].

Примеры результатов экспериментального исследования — распределения давления и температуры фреона R134a в рабочей камере при различных значениях давления нагнетания p_n и времени рабочего цикла τ приведены на рис. 3, а и б.

Обработанные данные экспериментального исследования по определению средней температуры нагнетаемого фреона R134a T , коэффи-

циента подачи λ и индикаторного изотермического коэффициента полезного действия (КПД) η приведены на рис. 4, а–в. Там же показаны расчетные данные. При этом проведена верификация математической модели, созданной для моделирования тихоходных ПК [16].

На основании экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента теплотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры при сжатии фреона R134a

$$\alpha = \lambda(\rho/\mu)^{0,33} W^{0,33} D_{\text{экв}}^{0,67},$$

где ρ , μ и W — плотность, динамическая вязкость и условная скорость течения фреона R134a соответственно; $D_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр цилиндра в рабочей камере.

Это уравнение можно использовать в математической модели рабочего процесса тихоходного ПК [16].

Выводы

1. Анализ результатов экспериментального исследования позволил получить модель расчета рабочего процесса холодильных тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней сжатия, функционирующих на фреоне R134a.

2. Предлагаемую модель расчета можно использовать для теоретического исследования и создания оптимальной конструкции холодильного тихоходного ПК с рабочим телом R134a.

Литература

- [1] Юша В.Л., Бусаров С.С., Васильев В.К. и др. Теоретическая оценка возможности замены многоступенчатых малорасходных поршневых компрессоров на одноступенчатые. *Омский научный вестник*, 2015, № 3, с. 66–69.
- [2] Громов А.Ю. *Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов*. Дисс. ... канд. тех. наук. Казань, КНИТУ, 2017. 213 с.
- [3] Недовенчаный А.В. *Повышение энергетической и динамической эффективности поршневого малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидроприводом*. Дисс. ... канд. тех. наук. Омск, ОмГТУ, 2020. 232 с.
- [4] Пластинин П.И. *Поршневые компрессоры. Т. 2. Основы проектирования. Конструкции*. Москва, КолосС, 2013. 711 с.
- [5] Щерба В.Е. *Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия*. Москва, Юрайт, 2023. 323 с.
- [6] Юша В.Л. *Системы охлаждения и газораспределения объемных компрессоров*. Новосибирск, Наука, 2006. 236 с.
- [7] Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Капелюховская А.А. Возможность замены двухступенчатых холодильных компрессоров тихоходными. *Вестник Международной академии холода*, 2024, № 2, с. 30–35.

- [8] Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Капелюховская А.А. Обоснование возможности конденсации газов в бесшмазочных тихоходных холодильных компрессорах. *Холодильная техника*, 2023, т. 112, № 1, с. 21–27, doi: <https://doi.org/10.17816/RF513731>
- [9] Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Двухступенчатый холодильный цикл с детандером на диоксиде углерода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-595>
- [10] Строммен И., Бредесен А.М., Петерсен Й. и др. Холодильные установки, кондиционеры и тепловые насосы для XXI века. *Холодильный бизнес*, 2000, № 5, с. 8–10.
- [11] Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И. и др. *Холодильные машины*. Санкт-Петербург, Политехника, 2006. 944 с.
- [12] Бабакин Б.С. и др. Хладагенты и их воздействие на окружающую среду. *Молочная промышленность*, 2016, № 6, с. 12–14.
- [13] Akhmed H.J., Khalifa A.H., Khalaf D.Z. Performance investigation of vapor compression cycle with a variable speed compressor and refrigerant injection. *J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 63–76.
- [14] Yusha V.L., Karagusov V.I., Busarov S.S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors. *Chem. Petrol. Eng.*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 177–182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0020-5>
- [15] Бусаров С.С., Юша В.Л. Экспериментальная оценка индикаторного коэффициента подачи поршневой длинноходовой компрессорной ступени. *Компрессорная техника и пневматика*, 2020, № 3, с. 39–41.
- [16] Бусаров С.С., Гошля Р.Ю., Громов А.Ю. и др. Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора. *Компрессорная техника и пневматика*, 2016, № 6, с. 6–10.

References

- [1] Yusha V.L., Busarov S.S., Vasilyev V.K. et al. A theoretical estimate of possibility of replacing low consumption multi-stage reciprocating compressors. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2015, no. 3, pp. 66–69. (In Russ.).
- [2] Gromov A.Yu. *Razrabotka porshnevyykh stupeney s lineynym privodom dlya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov i issledovanie ikh rabochikh protsessov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of piston stages with a linear drive for low-flow compressor units and research of their working processes. Kand. tech. sci. diss.]. Kazan, KNITU Publ., 2017. 213 p. (In Russ.).
- [3] Nedovenchanyy A.V. *Povyshenie energeticheskoy i dinamicheskoy effektivnosti porshneвого maloraskhodnogo odnostupenchatogo kompressornogo agregata s lineynym gidroprivodom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase of energy and dynamic efficiency of the piston low-flow single-stage compressor unit with a linear hydraulic drive. Kand. tech. sci. diss.]. Omsk, OmGTU Publ., 2020. 232 p. (In Russ.).
- [4] Plastinin P.I. *Porshnevyye kompressory. T. 2. Osnovy proektirovaniya. Konstruktsii* [Piston compressors. Vol. 2. Fundamentals of design. Constructions]. Moscow, KolosS Publ., 2013. 711 p. (In Russ.).
- [5] Shcherba V.E. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye porshnevyykh kompressorov obemnogo deystviya* [Theory, calculation and design of reciprocating compressors of volumetric action]. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 323 p. (In Russ.).
- [6] Yusha V.L. *Sistemy okhlazhdeniya i gazoraspredeleniya obemnykh kompressorov* [Cooling and gas distribution systems for positive displacement compressors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 236 p. (In Russ.).
- [7] Busarov S.S., Nedovenchanyy A.V., Kapelyukhovskaya A.A. Possibility to replace two-stage refrigeration compressors with low-speed compressors. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], 2024, no. 2, pp. 30–35. (In Russ.).
- [8] Busarov S.S., Nedovenchanyy A.V., Kapelyukhovskaya A.A. Substantiation of the possibility of gas liquefaction in oil-free low-speed refrigeration compressors. *Kholodilnaya tekhnika*

- [Refrigeration Technology], 2023, vol. 112, no. 1, pp. 21–27, doi: <https://doi.org/10.17816/RF513731> (in Russ.).
- [9] Voronov V.A., Leonov V.P., Rozenoer T.M. Two-stage cooling cycle with expander based on carbon dioxide. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 1, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-595> (in Russ.).
- [10] Strommen I., Bredesen A.M., Petersen Y. et al. Refrigeration, air conditioning and heat pumps for the 21st century. *Kholodilnyy biznes*, 2000, no. 5, pp. 8–10. (In Russ.).
- [11] Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I. et al. *Kholodilnye mashiny* [Refrigeration machines]. Sankt-Petersburg, Politekhnik Publ., 2006. 944 p. (In Russ.).
- [12] Babakin B.S. et al. Cooling agents and their effects on the environment. *Molochnaya promyshlennost* [Dairy Industry], 2016, no. 6, pp. 12–14. (In Russ.).
- [13] Akhmed H.J., Khalifa A.H., Khalaf D.Z. Performance investigation of vapor compression cycle with a variable speed compressor and refrigerant injection. *J. Mech. Eng.*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 63–76.
- [14] Yusha V.L., Karagusov V.I., Busarov S.S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors. *Chem. Petrol. Eng.*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 177–182, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0020-5>
- [15] Busarov S.S., Yusha V.L. Experimental evaluation of the indicator feed rate of a long-stroke piston compressor stage. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2020, no. 3, pp. 39–41. (In Russ.).
- [16] Busarov S.S., Goshlya R.Yu., Gromov A.Yu. et al. Mathematical modelling of heat exchange processes in the working chamber of a low-speed stage of a reciprocating compressor. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors & Pneumatics], 2016, no. 6, pp. 6–10. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.07.2024

Информация об авторах

БУСАРОВ Сергей Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: bsi1980@mail.ru).

БУСАРОВ Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, старший преподаватель 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).

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).

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: bsi1980@mail.ru).

BUSAROV Igor Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Senior 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).

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).

КАПЕЛЮХОВСКАЯ Александра Александровна — старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология». ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: shipunovaa@mail.ru).

KAPELYUKHOVSKAYA Alexandra Alexandrovna — Senior 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: shipunovaa@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Бусаров С.С., Бусаров И.С., Кобыльский Р.Э., Капелюховская А.А. Создание модели расчета рабочих процессов малорасходных тихоходных компрессоров при работе на фреоне R134a. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 86–93.

Please cite this article in English as:

Busarov S.S., Busarov I.S., Kobylsky R.E., Kapelyukhovskaya A.A. Development of the operating process computation model for a low-flow low-speed compressor working on the R134a freon. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 86–93.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию М.С. Селезневой
«Динамический системный синтез
моделей алгоритмического обеспечения
навигационных комплексов
летательных аппаратов»**

Рассмотрены навигационные комплексы современных беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов. Представлены модели погрешностей навигационных комплексов и схемы их алгоритмической коррекции. Исследованы линейные и нелинейные алгоритмы оценивания, управления, комплексирования и построения прогнозирующих моделей, применяемые для повышения точности навигационной информации. Разработаны адаптивный нелинейный фильтр Калмана, редуцированный нелинейный алгоритм управления и алгоритм самоорганизации с комплексным ансамблем критериев селекции. Для дальнейшего совершенствования алгоритмического обеспечения навигационных комплексов предложена концепция динамического системного синтеза моделей, используемых в алгоритмах коррекции. Разработаны численные критерии степени наблюдаемости, управляемости переменных состояния моделей и критерии степени параметрической идентифицируемости, использованные для формирования моделей с улучшенными качественными характеристиками. При построении самоорганизующихся моделей использован способ управления ансамблем критериев селекции, обеспечивающий формирование моделей с желаемым качеством в зависимости от целевого применения моделей в различных режимах полета. Представлено алгоритмическое обеспечение навигационного комплекса летательного аппарата авианосного базирования.

Для специалистов в области навигации и систем управления летательными аппаратами.

По вопросам приобретения обращайтесь:

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