

Научная статья

УДК 621.512.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>



С.С. Бусаров [✉], К.А. Бакулин

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия

[✉] bssi1980@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БЕССМАЗОЧНЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТИХОХОДНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. Одной из основных задач поршневых компрессорных машин является обеспечение высокой производительности сжимаемого газа. Известно, что наличие мёртвого объёма снижает эффективность работы любого поршневого компрессора, особенно сильное влияние оказывается при значительных величинах отношения давления нагнетания к давлению всасывания. В тихоходных машинах, рассматриваемых в данной работе, степень повышения давления превышает 100, что актуализирует работу над проблемой уменьшения вредного влияния мёртвого объёма на производительность компрессора. Уменьшение мёртвого объёма может быть достигнуто за счёт исключения линейного мёртвого объёма, занимающего большую его часть. Рассмотрены экспериментальные исследования конструкции, в которой на торцевой поверхности поршня, обращённой к клапанной плите, установлен резиновый (эластомерный) диск. Проведённые исследования показали, что применение резинового диска с возможностью касания предлагаемой конструкции поршня клапанной плиты практически полностью исключает линейный мёртвый объём. При этом повышение коэффициента подачи может достигать 20%.

Ключевые слова: тихоходный компрессор, мёртвый объём, линейный мёртвый объём, коэффициент подачи, эффективность рабочего процесса.

Для цитирования:

Бусаров С.С., Бакулин К.А. Повышение производительности бесшмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>S.S. Busarov , K.A. Bakulin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

 bssi1980@mail.ru

INCREASING THE PERFORMANCE OF LUBRICATION-FREE, LOW-FLOW, LOW-SPEED, MEDIUM- AND HIGH-PRESSURE RECIPROCATING COMPRESSORS

Abstract. One of the main tasks of piston compressor machines is to provide high productivity of compressed gas. It is known that the presence of dead volume reduces the operating efficiency of any piston compressor; the effect is especially strong at significant values of the ratio of discharge pressure to suction pressure. In low-speed machines considered in this work, the pressure increase ratio exceeds 100, which actualizes work on the problem of reducing the harmful effect of dead volume on compressor performance. Dead volume can be reduced by eliminating the linear dead volume, which takes up its majority. Experimental studies of a design in which a rubber (elastomer) disc is installed on the end surface of the piston facing the valve plate are considered. The conducted studies showed that the use of a rubber disk with the possibility of touching the proposed design of the valve plate piston almost completely eliminates linear dead volume. In this case, the increase in the feed rate can reach 20%.

Keywords: low-speed compressor, dead volume, linear dead volume, flow rate, workflow efficiency.

Citation:

S.S. Busarov, K.A. Bakulin, Increasing the performance of lubrication-free, low-flow, low-speed, medium- and high-pressure reciprocating compressors, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 82–90, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>

Введение. В поршневых компрессорах основное снижение производительности происходит из-за конструктивных особенностей, которой нет во многих других типах компрессоров, а именно наличие мёртвого объёма [1, 2]. Оставшийся в мёртвом объёме газ после завершения процесса нагнетания начинает расширяться до тех, пор пока давление не упадёт до давления всасывания. Это приводит к потере полезного хода поршня и соответственно к снижению коэффициента подачи. Наиболее значимой составляющей мёртвого объёма является линейный мёртвый объём, снижение значения которого может существенно улучшить показатели эффективности рабочего процесса компрессора.

В данной работе рассмотрен тихоходный поршневой компрессор. Особенностью такого поршневого компрессора является возможность получения повышенного значения отношения величины давления нагнетания к давлению всасывания [3–5]. Так для существующих поршневых компрессоров степень повышения давления в одноступенчатой машине редко превышает значение 6...8 [6, 7]. В тихоходном компрессоре за счёт вытянутой формы цилиндра и длительного процесса сжатия [8] значение степени повышения давления может достигать 100 и более [9]. Однако при этом показатели эффективности рабочего процесса остаются на низком уровне. Повысить коэффициент подачи и индикаторный изотермический КПД возможно за счёт снижения величины мёртвого объёма.

В работе [10] предложено решение по уменьшению линейного мёртвого объёма за счёт установки резинового диска на торцевую поверхность поршня.

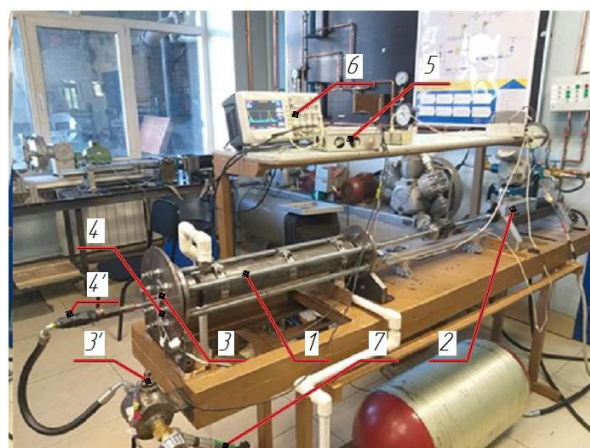


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – тихоходная поршневая ступень, 2 – гидравлический привод, 3,3' – датчик давления, 4,4' – датчик температуры, 5 – система сбора данных, 6 – цифровой осциллограф, 7 – датчик расхода

Fig. 1. Experimental unit: 1 – low-speed piston stage, 2 – hydraulic drive, 3,3' – pressure sensor, 4,4' – temperature sensor, 5 – data acquisition system, 6 – digital oscilloscope, 7 – flow sensor

Проведём эксперимент с данным конструктивным элементом с целью определения влияния изменения конструкции на интегральные характеристики компрессора.

Методы и материалы

Объектом исследования является тихоходный компрессор представляет собой поршневую ступень с гидравлическим приводом: геометрические параметры ступени – диаметр цилиндра 50 мм, ход поршня 500 мм; режим работы – время цикла 2...4 с, давление всасывания 0,1 МПа, давление нагнетания до 10МПа; сжимаемый газ воздух, охлаждение ступени – интенсивное водяное.

Экспериментальный стенд представляет собой компрессор с системой сбора данных, позволяющей определять параметры газа в рабочей камере, давление и температуру нагнетания, а также расход газа.

Фотография стенда представлена на рис. 1.

Эксперимент проводился следующим образом: работа гидравлического привода 2 обеспечивает сжатие газа в тихоходной поршневой ступени 1 (за счёт возвратно-поступательного движения поршня), при выходе на режим система сбора данных 5 обеспечивает поступление сигналов с датчика давления 3 и температуры 4, расположенных в рабочей камере тихоходной поршневой ступени 1, а также датчиков расхода 7 на экран цифрового осциллографа 6. Средняя температура нагнетаемого газа и давление нагнетания определяется соответственно датчиками 4' и 3'. Эксперимент проводился при наличии на торце поршня резинового диска и без него. Фотография поршня 1 с резиновым диском 2 представлена на рис. 2.

Полученные зависимости коэффициента подачи на различных режимах работы представлены на рис. 3–6.

Была проведена оценка погрешности определения измеряемых величин.

Методика определения погрешности измерений представлена в работе [11].

Погрешность измерения величин, определяемых при проведении экспериментальных исследований представлена в работе [12].

Общая погрешность измерений составила (не более): для давления – 1,72%, для температуры – 1,57 %, для расхода – 2%.

Определение коэффициента подачи основано на известной зависимости [13–15]:

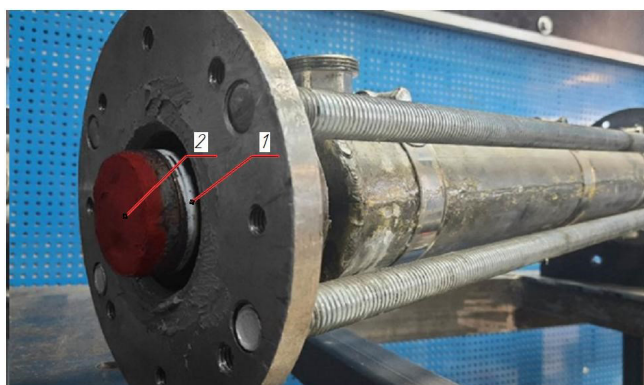


Рис. 2. Вид поршня с резиновым диском: 1 – поршень, 2 – резиновый диск
 Fig. 2. View of a piston with a rubber disk: 1 – piston, 2 – rubber disc

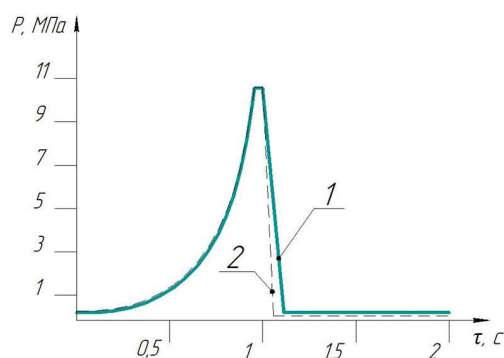


Рис. 3. График изменения мгновенного давления в рабочей камере:
 1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском
 Fig. 3. Graph of changes in instantaneous pressure in the working chamber:
 1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

$$\lambda = \frac{V_e}{V_h}, \quad (1)$$

где V_h – теоретическая производительность, м³/с.

Производительность компрессора определяется показаниями датчика расхода при давлении нагнетания и температуре нагнетания, после этого производится пересчёт полученного значения на условия всасывания компрессора – V_e .

Результаты

На рис. 3 представлены зависимости изменения давления в рабочей камере за время цикла. Видно, что процесс обратного расширения при установке резинового диска имеет более крутую характеристику, что подтверждает уменьшение влияния мёртвого объёма на производительность ступени компрессора.

На рис. 4 представлены зависимости средней температуры сжатого воздуха от величины отношения давления нагнетания к давлению всасывания. В связи с повышением производительности компрессора за счёт практического исключения линейного мёртвого объёма при использовании эластомерного диска, масса газа при сжатии увеличилась, соответственно возросла и температура.

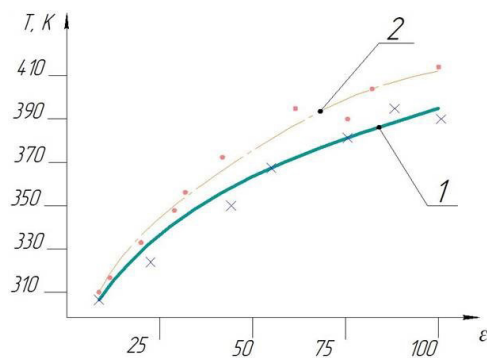


Рис. 4. Зависимость средней температуры газа от величины отношения давления нагнетания к давлению всасывания: 1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском
 Fig. 4. Dependence of the average gas temperature on the ratio of discharge pressure to suction pressure: 1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

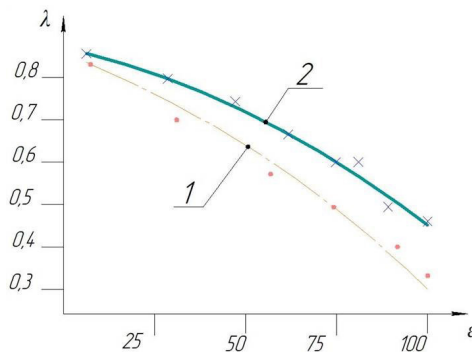


Рис. 5. Графики изменения производительности при рассмотренных конструкциях поршня (время цикла 2 с): 1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском
 Fig. 5. Graphs of changes in performance for the considered piston designs (cycle time 2 s): 1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

На рис. 5, 6 экспериментальные кривые, характеризующие изменение производительности компрессора в случае исключения мёртвого объёма и в случае исходной конструкции компрессора. Установка резинового диска, практически исключает линейный мертвый объём, что ведёт к увеличению производительности на 10...20% в зависимости от режима работы компрессора.

Обсуждение

Полученное значение относительного мёртвого объёма для экспериментальной ступени с диаметром цилиндра 0,05 м и ходом поршня 0,5 м составляет при установке резинового диска – 0,3%. То есть за счёт оставшегося вредного пространства в клапанах и в кольцевом пространстве. Возможно, при деформациях резинового диска, деформируемая часть эластомера частично занимала указанные вредные пространства. При этом фактический мёртвый объём был ещё ниже. При работающем компрессоре точно определить значение мёртвого объёма пока не удаётся.

Заключение

Использование запатентованного решения по исключению линейного мёртвого пространства подтвердило, что улучшить показатели производительности тихоходных компрессоров можно за счёт установки резинового диск на торце поршня, при этом практически исключается линейный

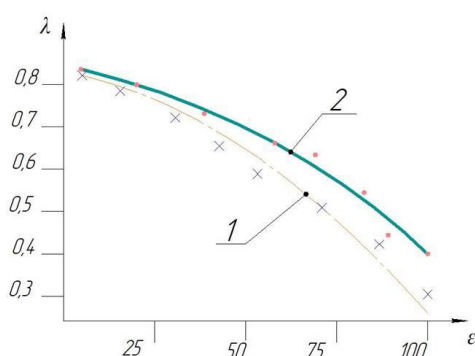


Рис. 6. Графики изменения производительности при рассмотренных конструкциях поршня (время цикла 4 с):
1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском

Fig. 6. Graphs of changes in performance for the considered piston designs (cycle time 4 s):
1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

мёртвый объём. Коэффициент подачи при этом можно увеличить до 20% и в проведённых исследованиях данный параметр достигал значения 0,6 при степени повышения давления 100. При этом дальнейшие исследования будут направлены на подбор материала диска и обоснования ресурсных показателей предложенной конструкции, а также создания модели расчёта, учитывающую наличие резинового диска на поршне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Юша В.Л. Научно-технологические предпосылки совершенствования и промышленного освоения малорасходных компрессорных агрегатов на базе длинноходовых поршневых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39
- [2] Котлов А.А. Математический анализ работы двухступенчатого дожимающего компрессора, предназначенного для сжатия метана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405
- [3] Бусаров С.С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней / С.С. Бусаров, В.Л. Юша // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 80–89.
- [4] Юша В.Л. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания / В.Л. Юша, С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный, Р.Ю. Гошля // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18
- [5] Yusha V.L. Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases [tekst] // Chemical and Petroleum Engineering – 2018. – Vol. 54, pp. 593–597.
- [6] Котлов А.А., Бураков А.В. Сравнительный анализ работы одноступенчатого поршневого компрессора, сжимающего различные газы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 4. С. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35

- [7] **Прилуцкий А.И.** Теплообмен в ступенях машин объёмного действия. Современный подход / А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий, Д.Н. Иванов, А.С. Демаков // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – № 2. – С. 16–23.
- [8] **Бусаров С.С.** Эволюция конструкций тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней и актуальность их развития // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 12. – С. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469
- [9] **Недовенчанный А.В.** Повышение энергетической и динамической эффективности поршневого малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидроприводом: дис. канд. техн. наук / А. В. Недовенчанный. – Омск, 2020. – 232 с.
- [10] Патент № 2694104 Российская Федерация, МПК F04B 39/04 (2006.01), F04B 53/14 (2006.01). Поршневой компрессор: № 2018132179: заявл. 07.09.2018; опубл. 09,07,2019/ В.Л. Юша, С.С. Бусаров, А.В. Недовенчанный [и др.]; заявитель ОмГТУ. – 5с.: ил. – Текст: непосредственный.
- [11] **Грановский В.С.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.С. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- [12] **Бусаров С.С.** Экспериментальная оценка влияния частоты вращения коленчатого вала на амплитуду пульсаций давления в газовых коммуникациях малорасходных поршневых компрессоров / С.С. Бусаров, А.В. Недовенчанный, К.А. Бакулин, Н.Г. Синицин, А.А. Панютнич // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 21–26. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-21-26
- [13] **Кузнецов Л.Г.** Повышение герметичности поршневых компрессоров и детандеров / Л.Г. Кузнецов, Ю.И. Молодова, А.И. Прилуцкий // Холодильная техника. – 1999, № 9, – с. 24–25.
- [14] **Юша В.Л.** Системы охлаждения и газораспределения объёмных компрессоров. – Новосибирск: Наука, 2006. – 286 с.
- [15] **Прилуцкий И.К.** Разработка, исследование и создание поршневых компрессоров и детандеров для криогенной техники: дисс. на соиск.уч. степ, д.т.н., – Л., 1991. – 401 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.
E-mail: bssi1980@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

БАКУЛИН Константин Александрович – студент, Омский государственный технический университет, без степени.
E-mail: Konstantin_bakulin_2001@mail.ru

REFERENCES

- [1] **V.L. Yusha**, Nauchno-tekhnologicheskiye predposylki sovershenstvovaniya i promyshlennogo osvoyeniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov na baze dlinnokhodovykh porshnevykh stupeney // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С.24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39
- [2] **A.A. Kotlov**, Matematicheskiy analiz raboty dvukhstupenchatogo dozhimayushchego kompressora, prednaznachennogo dlya szhatiya metana // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405

- [3] **S.S. Busarov**, Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney / S.S. Busarov, V.L. Yusha // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – T. 24, № 4. – S. 80–89.
- [4] **V.L. Yusha**, Eksperimentalnoye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevnykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya / V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyy, R.Yu. Goshlya // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2018. T. 2, № 2. S. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18
- [5] **V.L. Yusha**, Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases [tekst] // Chemical and Petroleum Engineering–2018. – Vol. 54, pp. 593–597.
- [6] **A.A. Kotlov, A.V. Burakov**, Sravnitelnyy analiz raboty odnostupenchatogo porshneвого kompressora, szhimayushchego razlichnyye gazy // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2019. T. 3, № 4. S. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35
- [7] **A.I. Prilutskiy**, Teploobmen v stupenyakh mashin ob'yemnogo deystviya. Sovremennyy podkhod / A.I. Prilutskiy, I.K. Prilutskiy, D.N. Ivanov, A.S. Demakov // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. – 2009. – № 2. – S. 16–23.
- [8] **S.S. Busarov**, Evolyutsiya konstruksiy tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney i aktualnost ikh razvitiya // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – Vyp. 12. – S. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469
- [9] **A.V. Nedovenchanyy**, Povysheniye energeticheskoy i dinamicheskoy effektivnosti porshneвого maloraskhodnogo odnostupenchatogo kompressornogo agregata s lineynym gidroprivodom: dis. kand. tekhn. nauk / A.V. Nedovenchanyy. – Omsk, 2020. – 232 s.
- [10] Patent № 2694104 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F04B 39/04 (2006.01), F04B 53/14 (2006.01). Porshnevoy kompressor: № 2018132179: zayavl. 07.09.2018: opubl. 09.07.2019 / V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyy [i dr.]; zayavitel OmGTU. – 5s.: il. – Tekst: neposredstvennyy.
- [11] **V.S. Granovskiy**, Metody obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmereniyakh / V.S. Granovskiy, T.N. Siraya. – L.: Energoatomizdat, 1990. – 288 s.
- [12] **S.S. Busarov**, Eksperimentalnaya otsenka vliyaniya chastoty vrashcheniya kolenchatogo vala na amplitudu pulsatsiy davleniya v gazovykh kommunikatsiyakh maloraskhodnykh porshnevnykh kompressorov / S.S. Busarov, A. V. Nedovenchanyy, K.A. Bakulin, N.G. Sinitsin, A.A. Panyutich // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2022. T. 6, № 2. S. 21–26. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-21-26
- [13] **L.G. Kuznetsov**, Povysheniye germetichnosti porshnevnykh kompressorov i detanderov / L.G. Kuznetsov, Yu.I. Molodova, A.I. Prilutskiy // Kholodilnaya tekhnika. – 1999, № 9, – s. 24–25.
- [14] **V.L. Yusha**, Sistemy okhlazhdeniya i gazoraspredeleniya obyemnykh kompressorov. – Novosibirsk: Nauka, 2006. – 286 s.
- [15] **I.K. Prilutskiy**, Razrabotka, issledovaniye i sozdaniye porshnevnykh kompressorov i detanderov dlya kriogennoy tekhniki: diss. na soisk.uch. step, d.t.n., – L., 1991. – 401 s.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey S. BUSAROV – *Omsk State Technical University.*

E-mail: bssi1980@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

Konstantin A. BAKULIN – *Omsk State Technical University*.
E-mail: Konstantin_bakulin_2001@mail.ru

Поступила: 23.11.2023; Одобрена: 18.12.2023; Принята: 19.12.2023.
Submitted: 23.11.2023; Approved: 18.12.2023; Accepted: 19.12.2023.