

УДК 621.512

## Экспериментальные исследования рабочих процессов малорасходных тихоходных компрессоров при работе на фреоне R600a

Канд. техн. наук С. С. БУСАРОВ\*, И. С. БУСАРОВ, Р. Э. КОБЫЛЬСКИЙ,  
А. А. КАПЕЛЮХОВСКАЯ, Н. Г. СИНИЦИН

Омский государственный технический университет

\*E-mail: bssi1980@mail.ru

*В настоящее время соблюдение экологических норм в холодильной технике часто выходит на первый план. Взамен вредного для озонового слоя фреона R12 часто стали использовать хладагент R600a. В рассматриваемой работе обозначена перспектива использования хладагент R600a в одноступенчатых холодильных машинах с применением тихоходного компрессора. При этом для моделирования рабочих процессов необходимо уточнить модель расчета. Сделать это возможно при проведении экспериментальных исследований и верификации по полученным результатам существующей модели тихоходного компрессора. Были сопоставлены результаты теоретического и натурального эксперимента, при этом разница результатов не превысила 8 %.*

**Ключевые слова:** длинноходовой поршневой компрессор, рабочие процессы, измерение мгновенной температуры и давления газа, экспериментальные исследования поршневых компрессоров, математическая модель, фреон R600a.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 26.06.2024, одобрена после рецензирования 15.08.2024, принята к печати 03.09.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-7-11

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Бусаров С. С., Бусаров И. С., Кобыльский Р. Э., Капелюховская А. А., Синицин Н. Г. Экспериментальные исследования рабочих процессов малорасходных тихоходных компрессоров при работе на фреоне R600a // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 7–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-7-11

## Operating processes of low-flow low-speed compressors on R600a freon

Ph. D. S. S. BUSAROV\*, I. S. BUSAROV, R. E. KOBYSLSKY,  
A. A. KAPELYUKHOVSKAYA, N. G. SINITSYN

Omsk State Technical University

\*E-mail: bssi1980@mail.ru

*Nowadays, environmental compliance in refrigeration technology often comes to the fore. Instead of R12 freon, which is harmful to the ozone layer, R600a refrigerant is often used. The work under consideration indicates the prospect of using R600a refrigerant in single-stage refrigeration machines using a low-speed compressor. At the same time, to simulate work processes, it is necessary to clarify the calculation model. This can be done by conducting experimental studies and verifying the existing model of a low-speed compressor based on the results obtained. The results of the theoretical and natural experiments were compared, and the difference in the results did not exceed 8 %.*

**Keywords:** long-stroke piston compressor, operating processes, measurement of instantaneous temperature and gas pressure, experimental studies of piston compressors, mathematical model, freon R600a.

### Article info:

Received 26/06/2024, approved after reviewing 15/08/2024, accepted 03/09/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-7-11

Article in Russian

### For citation:

Busarov S. S., Busarov I. S., Kobylsky R. E., Kapelyukhovskaya A. A., Sinitsyn N. G. Operating processes of low-flow low-speed compressors on R600a freon. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 4. p. 7-11. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-4-7-11

## Введение

Создание перспективных тихоходных компрессоров и расширение их области применения приводят к тому, что необходимо расширять базу данных рабочих тел с адаптированной под них моделью расчета. Применение тихоходных поршневых машин может быть осуществлено в холодильной технике, особенно при работе с температурами ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , где зачастую из-за отношения давления более 10 применяются двухступенчатые поршневые компрессоры [1]-[6]. К тому же применение тихоходных компрессоров из-за уникального рабочего процесса может позволить реализовать процесс сжатия и конденсации внутри рабочей камеры или, по крайней мере, позволит начать процесс конденсации сразу на выходе компрессора. Такое преимущество перед быстроходными поршневыми аналогами позволит снизить нагрузку на конденсаторный узел [7, 8].

В данной статье рассмотрена работа тихоходного компрессора на фреоне R600a. Экологическая безопасность сегодня выходит на первый план и дело не только в заботе об окружающей среде: у владельцев «чисто» работающего оборудования возникает намного меньше производственных и организационных проблем, в том числе с контролирующими инстанциями, и открываются широкие горизонты для развития и международного партнерства.

Использование изобутана в качестве хладагента R600a началось в начале XX века. Позже его вытеснил фреон R12 (дифтордихлорметан). После принятия Монреальского протокола и приложений к нему, R600a вернулся в сферу холодильного оборудования в 1990-х. Основное преимущество R600a — низкий уровень воздействия на окружающую среду, поскольку у него очень низкий потенциал глобального потепления (GWP), он не разрушает озоновый слой (ODP=0). Его потенциал глобального потепления (GWP) составляет всего три, что значительно ниже, чем у других широко используемых хладагентов, таких как R134a и R404a. Он также энерго-

эффективен при средних температурах. Это делает его более рентабельным в долгосрочной перспективе [9]-[13].

Таким образом, работа посвящена экспериментальным исследованиям при работе тихоходного компрессора на фреоне R600a, целью которых является уточнению существующей математической модели рабочего процесса при работе на вышеуказанном фреоне.

## Цели и задачи исследования

Целью работы является адаптация существующей модели расчета применительно к работе с фреоном R600a.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

1. Собрать стенд с возможностью подачи в рабочую камеру фреона R600a.
2. Провести экспериментальные исследования и получить характеристики рабочего процесса.
3. На основании полученных данных уточнить зависимость для определения коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры.

## Объект исследования

Объектом исследования является тихоходная холодильная компрессорная ступень с следующими параметрами:  $D_{ц} = 50\text{ мм}$  при ходе  $S = 500\text{ мм}$ . Газ поступает при температуре окружающей среды —  $290...295\text{ К}$ , давление несколько выше атмосферного на  $0,05...0,1\text{ МПа}$ . Охлаждение полости цилиндра осуществляется проточной водой с температурой окружающей среды. Рабочая среда — фреон R600a. При сжатии до  $2...3\text{ МПа}$  скорость поршня обеспечивается в диапазоне  $0,25...0,5\text{ м/с}$ .

Испытания проводятся по методике, изложенной в работах [14, 15].

## Экспериментальные исследования

На рис. 1 показана схема стенда с установленными датчиками и системой сбора данных. На рис. 2 представлена фотография стенда в рабочем состоянии.

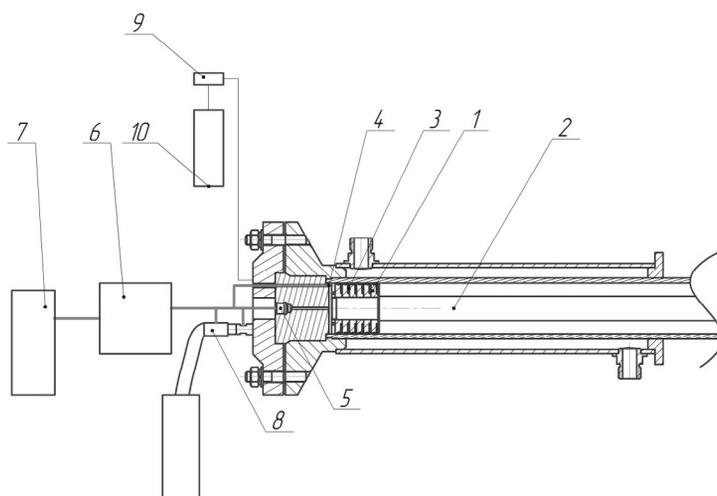


Рис. 1. Схема стенда:

1 — поршень; 2 — шток; 3 — манжеты; 4 — датчик температуры; 5 — датчик давления; 6 — усилитель; 7 — осциллограф; 8 — расходомер; 9 — редуктор; 10 — баллон с фреоном R600a

Fig. 1. Schematic diagram of the stand:

1 — piston; 2 — rod; 3 — cuffs; 4 — temperature sensor; 5 — pressure sensor; 6 — amplifier; 7 — oscilloscope; 8 — flow meter; 9 — reducer; 10 — cylinder with freon R600a

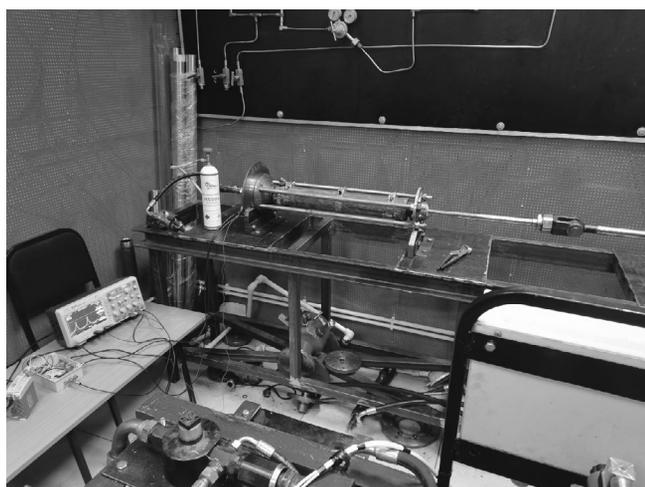


Рис. 2. Внешний вид стенда

Fig. 3. The stand

Работа стенда осуществляется от гидравлического привода, что позволяет обеспечить требуемое усилие и время рабочего цикла. Шток гидравлического цилиндра сообщает поступательное движение поршню. В компрессорную ступень фреон R600a поступает из баллона с избыточным давлением 0,05...0,1 МПа. Мгновенные параметры газа в рабочей камере фиксируются датчиками, сигнал с которых приходит на электронный осциллограф. Сигнал с датчика расхода из ресивера, также приходит на электронный осциллограф [14]. Гидравлическая станция с помощью перепускного дроссельного вентиля позволяет обеспечить требуемое время цикла.

В качестве результатов исследований были получены диаграммы мгновенного давления и температуры. На рис. 3, 4 изображены примеры полученных кривых на экране электронного осциллографа при различных режимах работы ступени. При этом «белая» линия соответствует изменению давления, а «серая» линия — давлению в камере сжатия. На некоторых режимах работы возникают не характерные пики на осциллограммах — это связано с редким заеданием гидравлического привода. Никакого отношения эти всплески к характеристикам рабочего процесса не имеют.

На основании известной математической модели, описывающей рабочий процесс тихоходного компрессора [16], были получены зависимости интегральных характеристик при проведении численного эксперимента. На рис. 5–7 представлены результаты сопоставления экспериментальных данных и данных численного эксперимента.

В используемой математической модели [16] применяемые зависимости носят фундаментальный характер. При этом расчетная зависимость коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности рабочей камеры носит частный характер и требует уточнения для каждого сжимаемого газа отдельно. При проведении сравнения теоретических и экспериментальных данных были уточнены степенные коэффициенты, входящие в уравнение коэффициента теплоотдачи. Таким образом зависимость, характеризующая коэффициент при работе на фреоне R600a, имеет следующий вид:

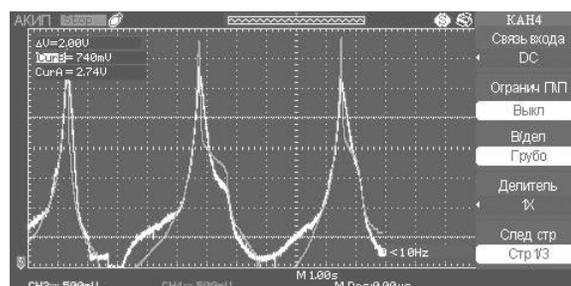


Рис. 3. Осциллограммы давления и температуры в рабочей камере:  $P_n = 2,2$  МПа времени цикла 2 с

Fig. 3. Oscillograms of pressure and temperature in the working chamber:  $P_n = 2.2$  MPa, cycle time — 2 s

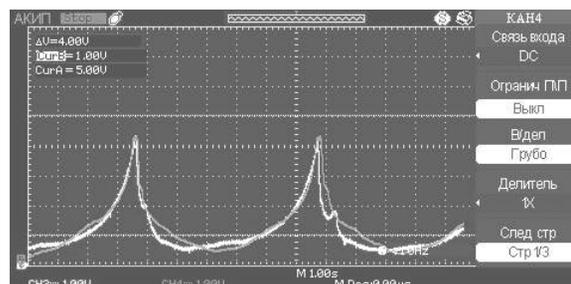


Рис. 4. Осциллограммы давления и температуры в рабочей камере:  $P_n = 1$  МПа и времени цикла 4 с

Fig. 4. Oscillograms of pressure and temperature in the working chamber:  $P_n = 1$  MPa, cycle time — 4 s

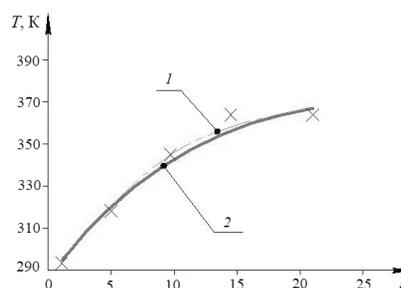


Рис. 5. График изменения средней температуры нагнетаемого R600a от степени повышения давления (время цикла 2 с): 1 — эксперимент; 2 — теория

Fig. 5. Dependency of the average temperature of the injected R600a on pressure increase (cycle time — 2 s): 1 — experiment; 2 — theory

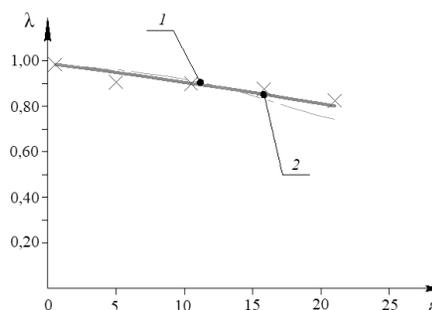


Рис. 6. График изменения коэффициента подачи от степени повышения давления для R600a (время цикла 2 с): 1 — эксперимент; 2 — теория

Fig. 6. Dependency of the volumetric efficiency on pressure increase for R600a (cycle time — 2 s): 1 — experiment; 2 — theory

$$\alpha = \lambda (\rho/\mu)^{0.2} W^{0.8} D_{\text{экв.}}^{0.8} \quad (1)$$

Полученная зависимость в совокупности с допущениями и уравнениями, описанными в работе [16], составляет модель тихоходного компрессора при работе на фреоне R600a.

### Выводы

Разработанный стенд и методика экспериментального исследования позволили получить данные о протекании рабочего процесса при сжатии фреона R600a.

Известная математическая модель (сосредоточенными параметрами рабочего тела) рабочего процесса тихоходного компрессора была верифицирована при работе на фреоне R600a. Что расширило перечень газов, применяемых для моделирования рабочего процесса в составе тихоходного длинноходового компрессора. Разница теоретических и экспериментальных данных не превысила 8,5%.

Данная модель в дальнейшем планируется для проведения параметрического анализа холодильных компрессорных установок с целью определения границы применимости данного технологического оборудования при работе на R600a.

### Литература

1. Юша В. Л., Бусаров С. С., Васильев В. К., Недовенчаный А. В., Громов А. Ю., Чижиков М. А. Теоретическая оценка возможности замены многоступенчатых малорасходных поршневых компрессоров на одноступенчатые // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 66–69.
2. Громов А. Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов. Омск, 2017. 213 с.
3. Недовенчаный А. В. Повышение энергетической и динамической эффективности малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидроприводом. Омск, 2020. 232 с.
4. Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. Основы проектирования. Конструкции. М.: КолосС, 2008. 711 с.
5. Щерба В. Е. Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия: учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. М.: Издательство Юрайт, 2023. 323 с.
6. Юша В. Л. Системы охлаждения и газораспределения объемных компрессоров. Новосибирск: Наука, 2006.
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. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-30-35.
8. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Капелюховская А. А. Обоснование возможности конденсации газов в бесмасляных тихоходных холодильных компрессорах // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 1. С. 21–27. DOI: 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 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-595
10. Строммен И., Бредесен А. М. и др. Холодильные установки, кондиционеры и тепловые насосы для XXI века // Холодильный бизнес. 2000. № 5. С. 8–10.

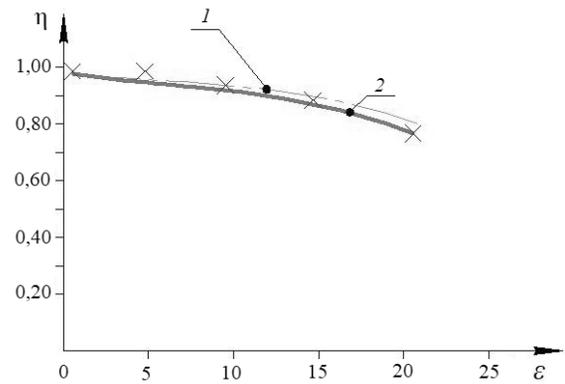


Рис. 7. График изменения индикаторного изотермического КПД от степени повышения давления для R600a (время цикла 2 с): 1 — эксперимент; 2 — теория  
Fig. 7. Dependency of the indicated isothermal efficiency on pressure increase for R600a (cycle time — 2 s): 1 — experiment; 2 — theory

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

### References

1. Yusha V. L., Busarov S. S., Vasiliev V. K., Nedovenchanny A. V., Gromov A. Yu., Chizhikov M. A. Theoretical assessment of the possibility of replacing multistage low-flow reciprocating compressors with single-stage ones. Omsk Scientific Bulletin. 2015. No. 3 (143). pp. 66–69. (in Russian)
2. Gromov A. Yu. Development of piston stages with linear drive for low-consumption compressor units and research of their working processes. Omsk, 2017. 213 p. (in Russian)
3. Nedovenchanny A. V. Increasing the energy and dynamic efficiency of a low-consumption single-stage compressor unit with a linear hydraulic drive. Omsk, 2020. 232 p. (in Russian)
4. Plastinin P. I. Reciprocating compressors. Fundamentals of design. Constructions. M.: KolosS, 2008. 711 p. (in Russian)
5. Shcherba V. E. Theory, calculation and design of volumetric reciprocating compressors: a textbook for universities. 2nd ed., add. M.: Yurayt Publishing House, 2023. 323 p. (in Russian)
6. Yusha V. L. Cooling and gas distribution systems of volumetric compressors. Novosibirsk: Nauka, 2006. (in Russian)
7. Busarov S. S., Nedovenchanny A. V., Kapeluxovskaya A. A. Possibility of replacing two-stage refrigeration compressors with low-speed ones. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 4. p. 30–35. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-30-35. (in Russian)
8. Busarov S. S., Nedovenchanny A. V., Kapelyukhovskaya A. A. Substantiation of the possibility of gas condensation in oil-free low-speed refrigerating compressors. *Refrigerating equipment*. 2023. Vol. 112, No. 1. pp. 21–27. DOI: 10.17816/RF513731. (in Russian)
9. Voronov V. A., Leonov V. P., Rosenoer T. M. Two-stage refrigeration cycle with a carbon dioxide expander. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. № 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-595. (in Russian)
10. Strommen I., Bredesen A. M. et al. Youth institutions, congressmen and modern companies for the XXI century. *Youth business*. 2000. No. 5. pp. 8–10. (in Russian)

11. Холодильные машины: Учебник для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: 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 // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 16 (2). P. 63–76.
14. *Yusha V. L., Karagusev V. I., Busarov S. S.* Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors. // Chemical and petroleum engineering. 2015. Vol. 51. No. 3. p. 177–182.
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., Недовенчаный А. В., Бусаров И. С., Титов Д. С.* Математическое моделирование процессов теплообмена в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора // Компрессорная техника и пневматика. 2016. № 6. С. 6–10.
11. Refrigerating machines: A textbook for students of higher education institutions specializing in «Low temperature engineering and physics» / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevsky; Under the general editorship of L. S. Timofeevsky. St. Petersburg: Polytechnic, 2006. 944 p. (in Russian)
12. Babakin B. S. et al. Refrigerants and their environmental impact. Dairy industry. 2016. No. 6. pp. 12–14. (in Russian)
13. Akhmed H. J., Khalifa A. H., Khalaf D. Z. Performance Investigation of Vapor Compression Cycle with a Variable Speed Compressor and Refrigerant Injection. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 16 (2). P. 63–76.
14. Yusha V. L., Karagusev V. I., Busarov S. S. Modeling the work processes of slow-speed, long-stroke piston compressors. *Chemical and petroleum engineering*. 2015. Vol. 51. No. 3. p. 177–182.
15. Busarov S. S., Yusha V. L. Experimental evaluation of the indicator feed coefficient of a reciprocating long-stroke compressor stage. *Compressor technology and pneumatics*. 2020. No. 3. pp. 39–41. (in Russian)
16. Busarov S. S., Goshlya R. Yu., Gromov A. Yu., Nedovenchanoy A. V., Busarov I. S., Titov D. S. Mathematical modeling of heat transfer processes in the working chamber of a low-speed stage of a reciprocating compressor. *Compressor technology and pneumatics*. 2016. No. 6. pp. 6–10. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Бусаров Сергей Сергеевич

К. т. н., доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», Омский государственный технический университет, 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, bssi1980@mail.ru. AuthorID (РИНЦ): 610336, AuthorID (SCOPUS): 51560987400

#### Бусаров Игорь Сергеевич

Ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», Омский государственный технический университет, 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, SPIN-код: 5775–5330, AuthorID (SCOPUS): 57191038188

#### Кобыльский Роман Эдуардович

Ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», Омский государственный технический университет, 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, AuthorID (РИНЦ): 3985–1096, AuthorID (SCOPUS): 57220077521

#### Капелюховская Александра Александровна

Старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология», Омский государственный технический университет, 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11, shipunovaa@mail.ru. SPIN-код: 2410–8153, AuthorID: 684484

#### Синицин Никита Глебович

Студент Нефтехимического института, Омский государственный технический университет, 644050, Россия, г. Омск, пр. Мира, 11

### Information about authors

#### Busarov Sergey S.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology, Omsk State Technical University, 644050, Russia, Omsk, Mira pr., 11, bssi1980@mail.ru. AuthorID (РИНЦ): 610336, AuthorID (SCOPUS): 51560987400

#### Busarov Igor S.

Assistant of the Department of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology, Omsk State Technical University, 644050, Russia, Omsk, Mira pr., 11, SPIN-код: 5775–5330, AuthorID (SCOPUS): 57191038188

#### Kobylsky Roman E.

Assistant of the Department of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology, Omsk State Technical University, 644050, Russia, Omsk, Mira pr., 11, AuthorID (РИНЦ): 3985–1096, AuthorID (SCOPUS): 57220077521

#### Kapelyukhovskaya Aleksandra A.

Senior Lecturer of the Department of Refrigeration and Compressor Engineering and Technology, Omsk State Technical University, 644050, Russia, Omsk, Mira pr., 11, shipunovaa@mail.ru. SPIN-код: 2410–8153, AuthorID: 684484

#### Sinitsyn Nikita G.

Student of the Petrochemical Institute, Omsk State Technical University, 644050, Russia, Omsk, Mira pr., 11

