

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТИХОХОДНЫХ ИНТЕНСИВНО ОХЛАЖДАЕМЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

С. С. Бусаров, А. В. Недовенчаный, Р. Э. Кобыльский, И. С. Бусаров

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

Рассмотрены уникальные элементы рабочих процессов тихоходного поршневого компрессора, не свойственные для быстроходных поршневых машин. Экспериментально доказано, что при режимах работы с повышенной температурой газа на входе в тихоходный компрессор (выше температуры охлаждающей среды) в процессе всасывания наблюдается заметное снижение температуры газа. Первую часть цикла в ступени газ охлаждается, и начало процесса сжатия будет происходить с более низкой температуры, чем температура газа в стандартной точке всасывания. Кроме того, экспериментально подтверждено предположение, что при работе тихоходного компрессора на хладагентах возможны режимы работы в области влажного пара, при которых наблюдается конденсация рабочего тела в конце процесса сжатия. Указанные режимы работы могут быть использованы в компактных холодильных машинах малой производительности с уменьшением массогабаритных параметров конденсаторного блока.

Выполненные исследования показали необходимость проведения верификации методики расчета рассматриваемых типов поршневых компрессоров и доработки последних с учетом особенностей протекания рабочих процессов тихоходных поршневых машин.

**Ключевые слова:** длинноходовая поршневая компрессорная ступень, рабочие процессы, экспериментальные исследования, повышенная температура на всасывании, конденсация рабочего тела, индикаторные диаграммы, неопределенность.

**Для цитирования:** Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Кобыльский Р. Э., Бусаров И. С. Экспериментальное исследование особенностей рабочих процессов тихоходных интенсивно охлаждаемых длинноходовых поршневых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиацонно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-25-32. EDN: AORTTX.



© Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Кобыльский Р. Э., Бусаров И. С., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE FEATURES OF THE WORKING PROCESSES OF LOW-SPEED INTENSIVELY COOLED LONG-STROKE PISTON COMPRESSOR STAGES

S. S. Busarov, A. V. Nedovenchany, R. E. Kobylskiy, I. S. Busarov

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

Unique elements of the working processes of a low-speed piston compressor, not typical for high-speed piston machines, are considered. It has been experimentally proven that under operating modes with an elevated gas temperature at the inlet of a low-speed compressor (above the temperature of the cooling medium), a noticeable decrease in the gas temperature is observed during the suction process. That is, the first part of the cycle in the stage, the gas is cooled, and the beginning of the compression process will occur at a lower temperature than the gas temperature at the standard suction point. In addition, the assumption that when a low-speed compressor operates on refrigerants, operating modes in the wet steam region are possible, in which condensation of the working fluid is observed at the end of the compression process, has been experimentally confirmed. Such operating modes can be used in compact low-capacity refrigeration machines with a decrease in the weight and size parameters of the condenser unit.

The conducted studies have shown the need to verify the calculation methodology for the types of piston compressors considered in the article and to refine the latter taking into account the features of the working processes of low-speed piston machines.

**Keywords:** long-stroke piston compressor stage, working processes, experimental studies, increased suction temperature, condensation of the working fluid, indicator diagrams, uncertainty.

**For citation:** Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Kobylskiy R. E., Busarov I. S. Experimental study of the features of the working processes of low-speed intensively cooled long-stroke piston compressor stages. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 25–32. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-25-32. EDN: AORTTX.



© Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Kobylskiy R. E., Busarov I. S., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

В начале 2010 г. исследования преподавателей кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) совместно со специалистами АО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск) показали перспективы разработки поршневого компрессора с линейным приводом. Такой компрессор, как предполагалась изначально, должен был быть менее шумным по сравнению с существующими аналогами за счёт значительно сниженной скорости движения поршня (менее 1 м/с) и относительно длинного цилиндра с нетипично большим отношением величины хода поршня к диаметру цилиндра.

Традиционно параметры ступеней, например, частота вращения коленчатого вала, принимаются по рекомендациям, характерным для компрессоростроения. Наиболее часто используемые компрессорные станции имеют частоту вращения коленчатого вала более 5 об/с. Более того, по приведённым рекомендациям параметр  $\psi$  имеет значения 0,3...0,8. Последние ступени многоступенчатых компрессоров не соответствуют данному параметру, где он может достигать значения 10 и более. В предлагаемых ступенях оба вышеуказанных параметра отличаются по своим значениям.

Время цикла для тихоходного компрессора можно определить как время, за которое поршень совершает полный цикл и при этом проходит расстояние, равное удвоенному ходу поршня. Если компрессор работает с частотой 0,5 об/с, то он совершает оборот за 2 с — это и есть время цикла. Предложенная ступень получила название длинноходовой тихоходной ступени. Данное название поясняется следующими факторами: параметр  $\psi$  для таких ступеней более 10, что обуславливает её название как длинноходовой и позволяет минимизировать влияние мёртвого объёма, а также развить площадь теплообменной поверхности. Время цикла  $\tau$  при этом должно быть не менее 1 с, то есть ступень тихоходная. Длительное время цикла позволяет осуществить охлаждение газа в процессе его сжатия. Данные параметры будем считать критериями, по которым ступень будет относиться к тихоходным длинноходовым.

Как и у любой конструкции, у тихоходных длинноходовых ступеней есть положительные и отрицательные стороны.

Преимуществами такой конструкции являются возможности:

— получения высоких давлений нагнетания в одной ступени при удовлетворительных температурных режимах работы агрегата;

— обеспечения повышенного ресурса работы поршневых уплотнений за счёт низкой скорости движения поршня;

— обеспечения высокой технологичности, что естественно позволит значительно упростить и удешевить производство;

— высокой степени уравновешенности за счёт реализации различных компоновок при многоцилиндровом исполнении;

— реализации энергоэффективных законов движения поршня.

К отрицательным факторам можно отнести неспособность существующих конструкций поршневых уплотнений и клапанов (работоспособных в быстроходных машинах) обеспечить герметичность рабочей камеры при времени цикла от 2 с и более. Пульсации газа в данных конструкциях, которые часто не учитывают в быстроходных агрегатах особенно при многоцилиндровом исполнении, остаются неизученными. Поршневые усилия имеют большие значения по сравнению с многоступенчатыми конструкциями.

К тому же более длительные процессы увеличат ресурс основных узлов поршневой компрессорной ступени, а именно пониженная скорость движения поршня позволит увеличить долговечность цилиндропоршневых уплотнений, а также уменьшить скорость течения газа в клапанах с уменьшением скоростей посадки запорного органа на седло, что в итоге должно увеличить долговечность самого клапана.

Были проведены исследования в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР). Принципы конструирования и основные технические решения, представленные в современной литературе, оказались непригодными для нового изделия. Первый образец оказался практически неработоспособным в основном из-за утечек через поршневые кольца и металлические клапаны. Оказалось, что при длительном времени цикла наиболее подходящим для цилиндропоршневого уплотнения являются манжеты, а в клапанах на седле обязательно должен быть эластомерный элемент, обеспечивающий повышенную герметичность рабочей камеры.

В итоге данная конструктивная схема с новыми параметрами и режимами работы компрессора позволила создать целое направление исследования в поршневых машинах. Сегодня этой темой на базе разработок сотрудников ОмГТУ заинтересовались ученые из Санкт-Петербурга и производственные предприятия на Урале [1, 2]. Проведен ряд попыток параллельно с ОмГТУ разрабатывать данное направление [3, 4], что говорит об актуальности



Рис. 1. Общий вид стенда испытаний с повышенной температурой на всасывании  
 Fig. 1. General view of the test bench with elevated suction temperature

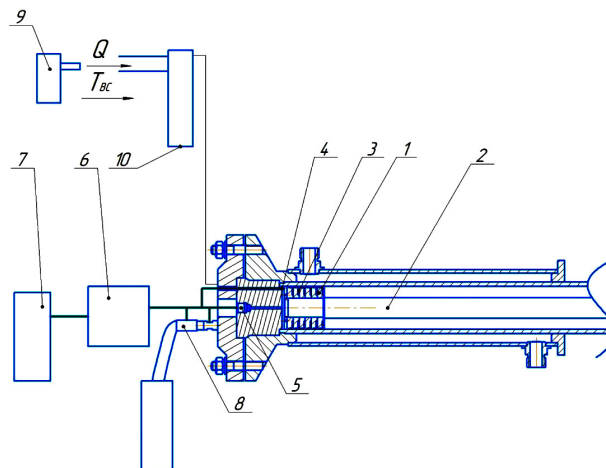


Рис. 2. Схема стенда испытаний с повышенной температурой на всасывании  
 Fig. 2. Schematic diagram of the test bench with elevated suction temperature

проводимых исследований и перспективы предложенной схемы.

В настоящее время проведено большое количество экспериментальных исследований рабочих процессов тихоходных длинноходных компрессоров, позволивших адаптировать и усовершенствовать основные узлы и системы поршневых машин (клапаны, цилиндропоршневые уплотнения, система охлаждения) к новым режимам работы. Основной проблемой, которая ставилась перед разрабатываемой машиной, — повышение ресурса и обеспечение высокой технологичности и энергоэффективности бессмазочных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления для условий длительной автономной эксплуатации. Указанная проблема была решена за счёт обеспечения пониженной скорости движения поршня и, как следствие, пониженных скоростей посадки запорного органа клапан на седло. Была показана возможность расширения диапазона отношений давлений в одной ступени, в десятки раз превосходящее существующие показатели аналогов [5, 6]. Это позволило показать конкурентное преимущество созданных тихоходных компрессоров с повышенным отношением давлений в одной ступени и интенсивным внешним охлаждением перед мембранными и многоступенчатыми поршневыми компрессорами.

Мембранные компрессоры изначально являлись аналогами тихоходных машин за счёт схожих принципов получения высоких давлений — развитая поверхность теплообмена и пониженная частота вращения коленчатого вала. Однако такие конструкции весьма массивны, а созданные тихоходные машины в разы позволяют снизить массогабаритные параметры. Что касается многоступенчатых поршневых компрессоров, то преимуществом тихоходных компрессоров является упрощение конструкции, исключение межступенчатых коммуникаций и теплообменников. Данные преимущества особенно в стеснённых условиях играют ключевую роль.

Немаловажным стало повышение технологичности конструкции. Все детали тихоходного компрессора являются телами вращения, сам цилиндр может быть изготовлен из готовых трубных профилей.

Выявленные уникальные особенности рабочих процессов поршневых тихоходных длинноходных

компрессоров позволили предположить, что при температуре в стандартной точке всасывания, превышающей температуру окружающей среды, при всасывании возможно снижение температуры газа в полости цилиндра [7, 8]. Кроме этого, было высказано теоретическое предположение о возможности конденсации хладагента в рабочей полости цилиндра на режимах, характерных для холодильных поршневых тихоходных длинноходных компрессоров [9–11]. Однако экспериментального подтверждения эти гипотезы до последнего времени не находили.

Представленные идеи расширили возможные сферы применения тихоходных компрессоров и создали два новых направления исследования с последующей возможной реализацией в производстве — холодильная техника и мобильные транспортные системы.

Таким образом, целью статьи является экспериментальное подтверждение приведённых выше теоретических предположений.

#### Методика эксперимента и результаты

В проведённых экспериментальных исследованиях использован стенд, созданный на кафедре «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, и ступени с отношением хода поршня к диаметру цилиндра более 10 и интенсивным внешним охлаждением.

На рис. 1, 2 представлена схема и фотография экспериментальной установки для исследования рабочих процессов тихоходного компрессора с повышенной температурой в стандартной точке всасывания.

Основные элементы стенда: гидравлический привод, в составе которого насосный агрегат, бак хранения масла, фильтр, дроссель, гидрораспределитель и приводной гидроцилиндр. Гидрораспределитель обеспечивает попеременную подачу жидкости в полости гидроцилиндра. Приводной гидроцилиндр обеспечивает поступательное движение поршня испытуемого компрессора за счёт жёсткой связи. Дроссель позволяет за счёт объема подаваемой жидкости регулировать скорость движения штока гидроцилиндра, обеспечивая требуемое время цикла компрессора. Все элементы расположены на сварной раме.

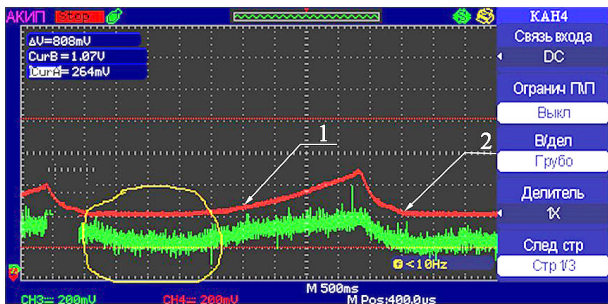


Рис. 3. Данные рабочего процесса  
 Fig. 3. Workflow data

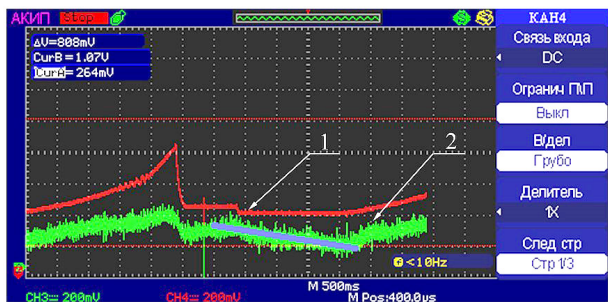


Рис. 4. Данные рабочего процесса  
 Fig. 4. Workflow data

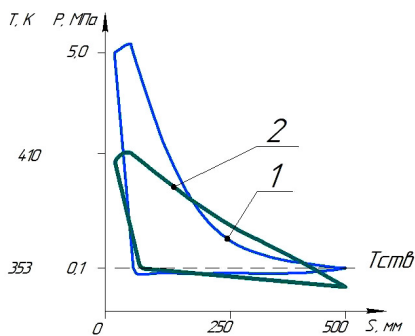


Рис. 5. Совмещённые свернутые температурная и индикаторная диаграммы:  
 1 — диаграмма давления;  
 2 — температурная диаграмма  
 Fig. 5. Combined folded temperature and indicator diagrams:  
 1 — pressure diagram;  
 2 — temperature diagram

Особенностью работы данного стенда является наличие ёмкости 10 на всасывании, где воздух перед поступлением в компрессор подогревается промышленным феном 9. В тихоходном компрессоре шток 2 с поршнем 1 движутся поступательно, при этом уплотнение между поршнем и цилиндром обеспечивает пакет манжет 3. Параметры газа в рабочей камере фиксируются датчиком температуры 4 и датчиком давления 5, данные поступают через систему сбора данных (усилитель сигнала 6 на осциллограф 7). Для определения расхода применяется расходомер 8.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3, 4.

На представленных диаграммах линия 1 показывает изменение давления в рабочей камере, линия

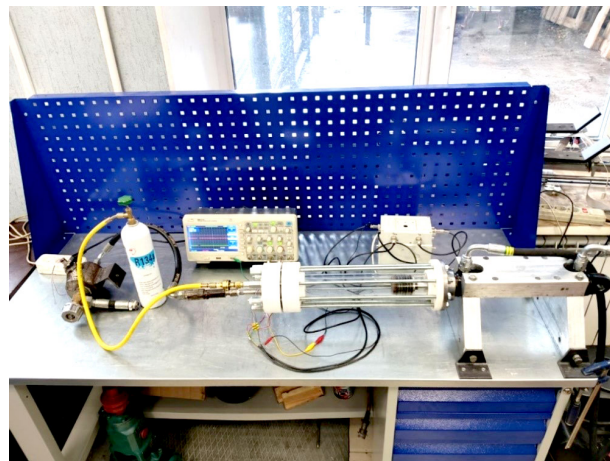


Рис. 6. Общий вид стенда испытаний тихоходного компрессора с двухфазным рабочим телом  
 Fig. 6. General view of the test bench for a low-speed compressor with a two-phase working fluid

2 показывает изменение температуры газа в камере сжатия. В процессе проведения эксперимента на всасывании газ подавался с повышенной температурой относительно температуры окружающего воздуха. Было зафиксировано снижение температуры газа в процессе всасывания (выделенная область на рис. 3 и линия снижения температуры на рис. 4).

При работе с повышенными температурами в стандартной точке всасывания процесс всасывания проходит с охлаждением газа, а не с подогревом. Фактически при рассматриваемых режимах процесс всасывания заменяет теплообменник, который в классических схемах устанавливается перед входом в дожимную ступень компрессора. Более наглядно совмещённые свернутые диаграммы температуры и давления в рабочей камере изображены на рис. 5.

Видно, что при протекании процесса всасывания происходит снижение температуры рабочего тела в камере сжатия. При температуре +80 °C в стандартной точке всасывания температура в начале процесса сжатия может достигать +65 °C. Таким образом, в процессе всасывания газ охлаждается не менее чем на 10...15 °C.

Полученный результат говорит о возможности работы тихоходного компрессора как при повышенных температурах окружающей среды, так и при подаче газа в компрессор с недоохлаждением. Такая ситуация возможна при работе теплообменного оборудования на нерасчётных режимах, связанных с загрязнением поверхности теплообмена или другими факторами. Часто такие варианты работы возможны на мобильных станциях, работающих в полевых условиях.

Для визуализации рабочих процессов тихоходных компрессоров при работе на хладагентах был создан новый стенд с «прозрачной» рабочей камерой, позволяющий проводить фото- и видеосъёмку процессов в рабочей камере.

На рис. 6, 7 представлена схема и фотография экспериментальной установки для исследования рабочих процессов тихоходного компрессора с двухфазным рабочим телом. В состав стенда входит гидравлический привод (состав описан ранее) и ступень компрессора. В данном случае гидропривод находится на отдельной раме, а ступень с гидроцилиндром вынесена на верстак.

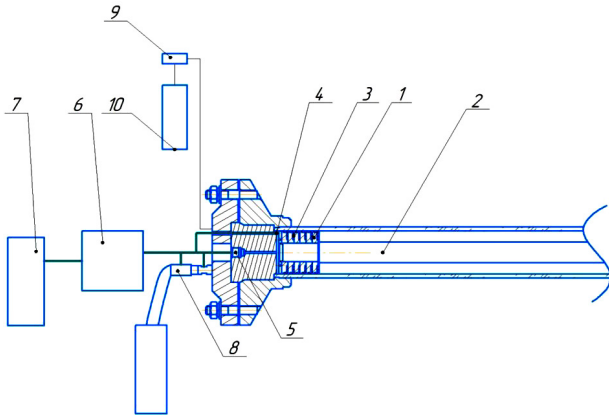


Рис. 7. Схема стенда испытаний тихоходного компрессора с двухфазным рабочим телом  
 Fig. 7. Scheme of the test bench for a low-speed compressor with a two-phase working fluid

Особенностью работы данного стенда является подача хладагента R134a из баллона 10 через редуктор давления 9 на всасывание. В тихоходном компрессоре шток 2 с поршнем 1 движутся поступательно, при этом уплотнение между поршнем и цилиндром обеспечивает пакет манжет 3. Параметры газа в рабочей камере фиксируются датчиком температуры 4 и датчиком давления 5, данные поступают через систему сбора данных (усилитель сигнала 6 на осциллограф 7). Для определения расхода применяется расходомер 8. Для визуализации процессов в рабочей камере цилиндр выполнен из прозрачного оргстекла.

Результаты в виде фотографий, отражающих последовательно процесс сжатия, представлены на рис. 8. Видно, что в процессе нагнетания образуется пар и конденсат на стенках камеры.

Представленные фотографий рабочего процесса рассматриваемой ступени демонстрируют, что частичная конденсация хладагента в данном случае имела место лишь в конце процесса сжатия и в процессе нагнетания. Представленные данные подтвердили возможность конденсации рабочих тел в камере сжатия тихоходного поршневого компрессора, что может быть использовано, как показано в работах [12, 13], для совершенствования малых холодильных машин. Основным преимуществом использования тихоходного поршневого компрессора в составе холодильной машины является возможность получения жидкой фазы в рабочей камере компрессора и направление её без конденсатора непосредственно в расширительное устройство.

Была рассчитана неопределённость основных параметров рабочего тела в камере сжатия. Неопределённость при получении давления [14–19]:

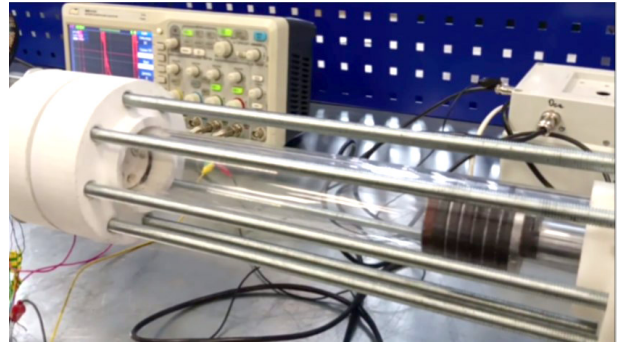
$$\Delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{MH}^2 + \Delta_0^2} \quad (1)$$

где  $\Delta_A$  — паспортная погрешность датчика давления, 1 %;  $\Delta_{MH}$  — класс манометра, 1,5 %;  $\Delta_0$  — паспортная погрешность осциллографа, 3 %.

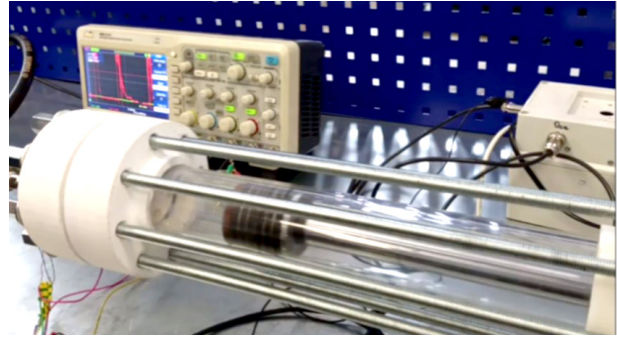
$$\Delta_{\Delta\Delta} = \sqrt{1^2 + 1,5^2 + 3^2} = 3,5 \%$$

Для датчика температуры неопределённость получена по аналогичному выражению

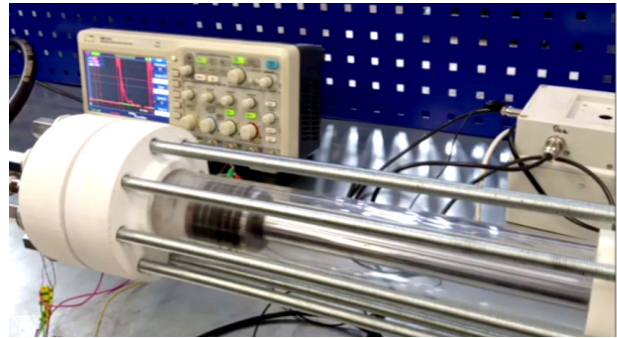
$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_t^2 + \Delta_V^2 + \Delta_F^2}$$



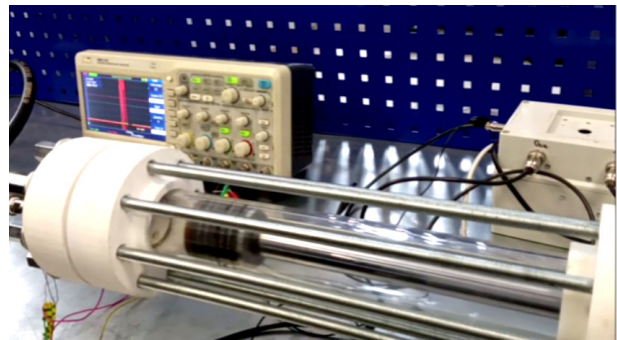
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Визуализация появления жидкой фазы хладагента R134a при сжатии:  
 а — начало сжатия; б — сжатие;  
 в — нагнетание и конденсация хладагента;  
 г — начало всасывания

Fig. 8. Visualization of liquid phase appearance of R134a refrigerant at compression: а — beginning of compression; б — compression; в — injection and condensation of refrigerant; г — beginning of suction

где  $\Delta_t$  — погрешность термометра, 0,1 %;  $\Delta_V$  — погрешность вольтметра, 0,3 %;  $\Delta_F$  — погрешность расчёта по полученной интерполированной формуле, учитывающей нелинейную зависимость напряжения от температуры, 1,5 %.

Таким образом, погрешность измерения мгновенной температуры воздуха в рабочей камере экспериментальной ступени с электромеханическим приводом составит

$$\delta_T = \sqrt{3^2 + 0,1^2 + 0,3^2 + 1,5^2} = 3,37 \text{ \%}.$$

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили возможность реализации не типичных для поршневых компрессоров процессов в общем случае.

### Выводы и заключение

Совершенствование узлов и систем тихоходных поршневых компрессоров позволило решить основную проблему, которая, как казалось, является исчерпывающей — создание долговечных поршневых компрессоров с повышенным отношением давлений в одной ступени сжатия.

Однако проводимые до настоящего времени исследования позволили предположить значительное расширение областей применения тихоходных компрессоров, например, в холодильной технике и мобильных установках.

Настоящие экспериментальные исследования позволили подтвердить предполагаемые результаты и показали, что работа тихоходного компрессора может выходить за рамки современного представления о работе поршневых машин. В каждом конкретном случае требуется отдельный подход, а также создание математических моделей, описывающих работу тихоходного компрессора для обеспечения точного прогнозирования результатов.

Ведутся работы по верификации полученных данных и созданию моделей, возможно, и единого программного продукта для описания работы тихоходного компрессора во всех исследуемых в настоящее время направлениях.

### Благодарности / Acknowledgements

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

The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20010.

### Список источников / References

1. Прилуцкий И. К., Наумчик И. В. Помощник М. В. [и др.]. Прогноз текущих и интегральных параметров ступени компрессора с линейным приводом при переменном ходе поршня и постоянной теоретической производительности // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 3. С. 6–12. EDN: BLKPZQ.

Prilutsky I. K., Naumchik I. V., Pomoshchnik M. V. [et al.]. Prognoz tekushchikh i integral'nykh parametrov stupeni kompressora s lineynym privodom pri peremennom khode porshnya i postoyannoy teoreticheskoy proizvoditel'nosti [Forecast of current and integral parameters of a compressor stage with a linear drive with a variable piston stroke and constant theoretical performance]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressors & Pneumatics*. 2023. No. 3. P. 6–12. EDN: BLKPZQ. (In Russ.).

2. Прилуцкий И. К., Молодова Ю. И., Галяев П. О. [и др.]. Особенности процессов теплообмена в ступенях малорасходных машин объёмного действия с различными механизмами движения // Вестник Международной академии холода. 2017. № 4. С. 30–40. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-30-40. EDN: YOOIAP.

Prilutsky I. K., Molodova Yu. I., Galyaev P. O. [et al.]. Osobennosti protsessov teploobmena v stupenyakh maloraskhodnykh mashin ob"yemnogo deystviya s razlichnymi mekhanizmami dvizheniya [Peculiarities of heat exchange processes in the stages of small-scale machines of volume action with different mechanisms of movement]. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2017. No. 4. P. 30–40. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-4-30-40. EDN: YOOIAP. (In Russ.).

3. Садвакасов Д. Х., Чернов Г. И., Евдокимов В. С., Райковский Н. А. Анализ влияния скорости поршня на работу холодильного компрессора, работающего в области влажного пара // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 4. С. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-26-31. EDN: MDPDPP.

Sadvakasov D. Kh., Chernov G. I., Evdokimov V. S., Raikovskiy N. A. Analiz vliyaniya skorosti porshnya na rabotu kholodil'nogo kompressora, rabotayushchego v oblasti vlazhnogo para [The analysis of the effect of piston speed on the operation of a refrigeration compressor operating in the area of wet steam]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 4. P. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-26-31. EDN: MDPDPP. (In Russ.).

4. Садвакасов Д. Х., Райковский Н. А., Чернов Г. И., Евдокимов В. С. Разработка упрощенной математической модели рабочих процессов тихоходного поршневого компрессора в области влажного пара для холодильных установок // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2024. № 3 (150). С. 118–135. EDN: ALNETV.

Sadvakasov D. Kh., Raykovskiy N. A., Chernov G. I., Evdokimov V. S. Razrabotka uproshchennoy matematicheskoy modeli rabochikh protsessov tikhokhodnogo porshnevoogo kompressora v oblasti vlazhnogo para dlya kholodil'nykh ustanovok [Development of the working process simplified mathematical model of the wet steam low-speed piston compressor for the refrigeration units]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2024. No. 3 (150). P. 118–135. EDN: ALNETV. (In Russ.).

5. Бусаров С. С. Создание и совершенствование бесмасляных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2023. 325 с. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_012860386/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012860386/) (дата обращения: 15.02.2025).

Busarov S. S. Sozdaniye i sovershenstvovaniye bessmazochnykh porshnevnykh kompressorov srednego i vysokogo davleniya na baze maloraskhodnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Creation and improvement of grease-free reciprocating compressors of medium and high pressure on the basis of low-speed long-stroke stages]. Омск, 2023. 325 p. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_012860386/](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012860386/) (accessed: 15.02.2025). (In Russ.).

6. Бусаров С. С., Юша В. Л. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408. EDN: YRNOVN.

Busarov S. S., Yusha V. L. Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney [Prospects for creating low-flow compressor units with medium and highpressurebased on unified low-speed long-stroke stages]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science*

and Technology. Vol. 24, no. 4. P. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408. EDN: YRNOVN. (In Russ.).

7. Юша В. Л., Бусаров С. С. Теоретический анализ температурных режимов длинноходовой тихоходной поршневой компрессорной ступени при интенсивном внешнем охлаждении цилиндра и повышенной температуре газа в стандартной точке всасывания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2025. № 4. С. 76–90. EDN: VCHJVU.

Yusha V. L., Busarov S. S. Teoreticheskiy analiz temperaturnykh rezhimov dlinnokhodovoy tikhokhodnoy porshnevoy kompressornoy stupeni pri intensivnom vneshnem okhlazhdenii tsilindra i povyshennoy temperature gaza v standartnoy toчке vsasyvaniya [Theoretical analysis of the temperature conditions for a long-stroke low-speed piston compressor stage under the intensive external cylinder cooling and increased gas temperature at the standard suction point]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2025. No. 4. P. 76–90. EDN: VCHJVU. (In Russ.).

8. Юша В. Л., Бусаров С. С. Особенности рабочих режимов дожимных поршневых компрессоров на базе тихоходной длинноходовой компрессорной ступени в составе мобильных компрессорных станций // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 1. С. 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-29-38. EDN: XKTMJH.

Yusha V. L., Busarov S. S. Osobennosti rabochikh rezhimov dozhimnykh porshnevyykh kompressorov na baze tikhokhodnoy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni v sostave mobil'nykh kompressornykh stantsiy [Peculiarities of operating modes of booster piston compressors based on a low-speed long-stroke compressor stage in mobile compressor stations]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-29-38. EDN: XKTMJH. (In Russ.).

9. Юша В. Л., Бусаров С. С., Сухов Е. В. Оценка эффективности парокompрессионных холодильных машинах с квазиизотермическим сжатием природных хладагентов // Казахстан-холод 2018: сб. докл. VIII Междунар. науч.-техн. конф. Алматы: Изд-во АТУ, 2018. С. 210–215.

Yusha V. L., Busarov S. S., Sukhov Ye. V. Otsenka effektivnosti parokompresionnykh kholodil'nykh mashin s kvaziizotermicheskim szhatiyem prirodnykh khladagentov [Evaluation of the effectiveness of steam compression refrigeration machines with quasi-isothermal compression of natural refrigerants]. *Kazakhstan-kholod*. 2018. Almaty, 2018. P. 210–215. (In Russ.).

10. Yusha V. L., Chernov G. I., Sadvakasov D. H. The efficiency theoretical analysis of the ammonia refrigeration cycle based on the compression in the wet vapor region. *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285. 030078. DOI: 10.1063/5.0029565.

11. Юша В.Л., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В. Влияние компоновки системы газораспределения на герметичность тихоходных длинноходовых поршневых компрессорных ступеней низкого, среднего и высокого давления // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 11. С. 89–100. EDN: KWIWNV.

Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanuy A.V. Vliyaniye komponovki sistemy gazoraspredeleniya na germetichnost' tikhokhodnykh dlinnokhodovykh porshnevyykh kompressornykh stupeney nizkogo, srednego i vysokogo davleniya [Gas distribution system layout effecting tightness of the long-stroke low-speed piston compressor stages at low, medium and high pressures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024. No. 11. P. 89–100. EDN: KWIWNV. (In Russ.).

12. 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: 10.17816/RF513731. EDN: NZHAGI.

Busarov S. S., Nedovenchanny A. V., Kapelyukhovskaya A. A. Obosnovaniye vozmozhnosti kondensatsii gazov v bessmazochnykh tikhokhodnykh kholodil'nykh kompressorakh [Substantiation of the possibility of gas condensation in low-speed oil-free refrigerating compressors]. *Kholodil'naya tekhnika. Refrigerating Equipment*. 2023. Vol. 112, no. 1. P. 21–27. DOI: 10.17816/RF513731. EDN: NZHAGI. (In Russ.).

13. Бусаров С. С., Недовенчаный А. В., Капелюховская А. А. Моделирование рабочих процессов в тихоходных поршневых компрессорах компактных холодильных установок // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 22–27. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-22-27. EDN: TRFHUJ.

Busarov S. S., Nedovenchany A. V., Kapelukhovskaya A. A. Modelirovaniye rabochikh protsessov v tikhokhodnykh porshnevyykh kompressorakh kompaktnykh kholodil'nykh ustanovok [Modeling of working processes in low-speed reciprocating compressors of compact refrigeration units]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 4. P. 22–27. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-22-27. EDN: TRFHUJ. (In Russ.).

14. Гетманов В. Г. Метрология, стандартизация, сертификация для систем пищевой промышленности. Москва: ДеЛи принт, 2006. 181 с. ISBN 5-94343-124-1.

Getmanov V. G. Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya dlya system pishchevoy promyshlennosti [Metrology, standardisation, certification for food industry systems]. Moscow, 2006. 181 p. ISBN 5-94343-124-1. (In Russ.).

15. Зайдель А. Н. Погрешности измерения физических величин / под ред. Ж. И. Алферова. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.

Zaydel' A. N. Pogreshnosti izmereniya fizicheskikh velichin [Errors in measuring physical quantities] / Ed. by Zh. I. Alferova. Leningrad, 1985. 112 p. (In Russ.).

16. Грановский В. С., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.

Granovskiy V. S., Siraya T. N. Metody obrabotki eksperimental'nykh dannykh pri izmereniyakh [Methods for processing experimental data in measurements]. Leningrad, 1990. 288 p. (In Russ.).

17. Bland M. J., Altman D. G. Statistics Notes: Measurement error. *BMJ*. Vol. 313. P. 744. DOI: 10.1136/bmj.313.7059.744.

18. Cochran W. G. Errors of Measurement in Statistics. *Technometrics*. Vol. 10, no. 4. 1968. P. 637–66. DOI: 10.2307/1267450. URL: <http://www.jstor.org/stable/1267450> (accessed: 10.02.2025).

19. Krstev I., Helwig A., Müller G. Detection of random vapour concentrations using an integrating diamond gas sensor. *Sensors and Actuators B Chemical*. 2014. Vol. 195. P. 603. DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.093.

**БУСАРОВ Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Омского государственного технического университета, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Адрес для переписки: bssi1980@mail.ru

**НЕДОВЕНЧАНЫЙ Алексей Васильевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Адрес для переписки: lonewolf\_rus88@mail.ru

**КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович**, ассистент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 3985-1096

AuthorID (SCOPUS): 57220077521

**БУСАРОВ Игорь Сергеевич**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Адрес для переписки: habr86@mail.ru

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 31.03.2025; одобрена после рецензирования 18.05.2025; принята к публикации 30.05.2025.

**BUSAROV Sergey Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 610336

AuthorID (SCOPUS): 51560987400

Correspondence address: bssi1980@mail.ru

**NEDOVENCHANY Aleksey Vasilievich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 762474

AuthorID (SCOPUS): 57191035621

Correspondence address: lonewolf\_rus88@mail.ru

**KOBYLSKIY Roman Eduardovich**, Assistant of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 3985-1096

AuthorID (SCOPUS): 57220077521

**BUSAROV Igor Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Refrigeration and Compressor Equipment and Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN code: 5775-5330

AuthorID (SCOPUS): 57191038188

Correspondence address: habr86@mail.ru

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 31.03.2025; approved after reviewing 18.05.2025; accepted for publication 30.05.2025.