

ВЫБОР СПОСОБА СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ В РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ДЛЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ РОТАЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПРЕССОРАХ

Н. А. Кудла^{1,2}, А. В. Бураков²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

² АО НПО «Компрессор»,
Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, пр. Большой Сампсониевский, 64

В статье рассмотрен один из способов снижения трения, используемый для вновь разрабатываемых ротационных компрессоров в рамках работ по импортозамещению. Проанализирован опыт применения ротационных холодильных компрессоров, выявлены основные факторы, определяющие холодопроизводительность. Выявлены применяемые в авиаракетостроении и энергетике методы снижения трения и повышения ресурса механических элементов и узлов с использованием металлических и неметаллических материалов, проанализированы наиболее перспективные материалы и тенденции развития. Выбран для изучения достаточно распространенный способ снижения трения, основанный на эффекте безызносности. На базе уже известных результатов предложено техническое решение на основе эффекта безызносности для снижения трения холодильного компрессора с катящимся ротором.

Ключевые слова: компрессор, холодильный, ротационный, эффективность, эффект безызносности, компрессор с катящимся ротором, металлоплакирующая.

Введение

На основании анализа материалов, приведенных в обзорных статьях, в отечественной промышленности создается и эксплуатируется холодильное оборудование, в составе которого применяются иностранные компрессоры. Компрессоры ротационного типа (РК), с экономической точки зрения, выгодно используются в автономных системах с малой холодопроизводительностью, до 3 кВт. Объем глобального рынка компрессоров ротационного типа в 2020 г. составил 194,32 млн шт. А в 2021 г. составил 212,31 млн шт., что на 9,3 % больше показателя предыдущего года. Производство ротационных компрессоров сосредоточено в основном в Азии, прежде всего — в Китае, а также в Таиланде, Японии, Малайзии и Индии. Среди ведущих брендов ротационных компрессоров можно выделить: Guangdong Meizhi Compressor Company (GMCC), Gree (Landa), Rechi, Panasonic, Mitsubishi Electric, Highly, LG, Samsung и AVIC (Sanyo). У производителей в линейке продукции разрабатываются модификации по холодопроизводительности, мощности двигателя, применяемому хладагенту, параметрам электропитания. Область применения компрессоров ротационного типа охватывает кондиционеры воздуха, тепловые насосы и холодильное оборудование. Запрос рынка на ротационные компрессоры высокой мощности привел к разработке двояных моделей [1]. На фоне социально-экономических преобразований отечественный рынок перенасытился импортной техникой, и, как следствие уменьшилась потребность в профильных специалистах-разработчиках, проектировщиках, отсутствуют созидательные изменения в учебном процессе. Для сохранения должного уровня подготовки специали-

стов необходимо способствовать развитию научно-технического потенциала профильных институтов и предприятий, выявлять и продвигать инновационные, прорывные разработки в области генерации холода и совершенствования компрессорных технологий [2]. Производство ротационных холодильных компрессоров в Российской Федерации не освоено, и в нынешних геополитических обстоятельствах отечественные производители холодильных установок сталкиваются с ограничением поставок широко применявшихся иностранных комплектующих, материалов и технологического оборудования. Для импортозамещения иностранного компрессорного оборудования во вновь создаваемых малых холодильных установках и кондиционерах целесообразно разрабатывать компрессоры ротационного типа [3]. АО НПО «Компрессор» имеет богатый опыт создания различного компрессорного оборудования, в частности изготовления роторных компрессорных станций, судовых холодильных установок и компрессоров для провизионных кладовых [4], предприятие внедряет новые технологии, направленные на увеличение эффективности компрессоров [5].

Исследования компрессоров и насос-компрессоров ротационного типа широко проводились в 70-е...90-е годы прошлого столетия отечественными учеными Березиным И. С., Титовым И. Е., Щербой В. Е. и другими авторами, которыми были сформулированы методики расчетов и математические модели компрессоров; в опубликованных авторских свидетельствах предложены методы повышения КПД, надежности и долговечности компрессоров, в том числе за счет введения элементов для разгрузки разделительной пластины от действующих нагрузок. К сожалению, в открытой литературе

Таблица 1. Параметры макетного компрессора НК Р 2,7
Table 1. Breadboard compressor parameters NK R 2,7

Параметр	Значение
Используемый хладагент	фреон R410A
Холодопроизводительность (номинальная), Вт	2680
Диаметр цилиндра, мм	42,5
Высота ротора, мм	10
Диаметр катящегося ротора, мм	34
Толщина разделительной пластины, мм	3
Диаметр корпуса, мм	90
Масса, кг	12

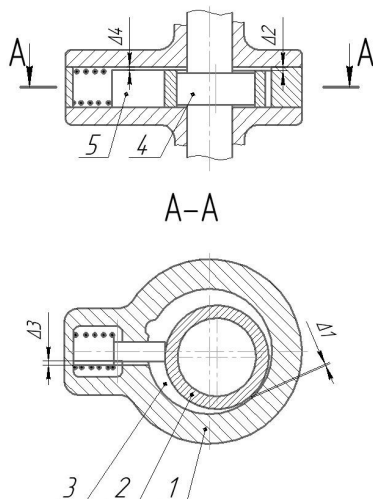


Рис. 1. Схема конструкции герметичного ротационного компрессора и схема зазоров в его рабочей камере:
 1 — цилиндр; 2 — ротор;
 3 — полость сжатия; 4 — эксцентрик;
 5 — разделительная пластина

Fig. 1. Diagram of the design of a hermetic rotary compressor and diagram of the clearances in its working chamber:
 1 — cylinder; 2 — rotor; 3 — compression cavity; 4 — eccentric; 5 — blade

отсутствуют сведения о дальнейшем внедрении и применении указанных способов.

Существуют современные научные публикации по обзору и увеличению эффективности ротационных компрессоров. Основные направления исследований по увеличению эффективности ротационных холодильных компрессоров связаны с мероприятиями по уменьшению внутренних утечек, улучшению системы охлаждения и смазки [6]. Также рассматриваются вопросы снижения внутренней утечки ротационных компрессоров, основываясь на уменьшении трения и износа, например, используя износостойкие покрытия деталей компрессора нитридом титана или карбидом вольфрама [7].

В авиаракетостроении, машиностроении и энергетике для снижения трения и повышения ресурса механических элементов и узлов используются полимерные антифрикционные самосмазывающиеся материалы с различными полимерами и армирующими материалами [8].

В различных отраслях техники: в авиации, морском флоте, химическом машиностроении, тяжелом машиностроении, легкой промышленности

применяются технические решения, основанные на эффекте избирательного переноса (эффект «безызносности»), который был открыт Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским (открытие № 41 с приоритетом от 12 ноября 1956 г.) [9].

Объектом исследования являются элементы (детали, подверженные трению и износу) холодильного ротационного компрессора; основные параметры приведены в табл. 1, разрез компрессора и схема зазоров в его рабочей камере приведены на рис. 1. Проблема связана с подбором подходящих материалов и технологий изготовления для снижения трения и износов и, как следствие, сохранения холодопроизводительности.

Постановка задачи

На основании результатов обзора литературы и анализа подходов к снижению трения в различных областях техники (в том числе трибологии) и опыта применения различных методов в компрессоростроении основной целью исследования должен быть выбор способа снижения трения в холодильном ротационном компрессоре и проверка его работоспособности в составе холодильной установки. Для достижения указанных целей необходимо решить следующие задачи:

- провести теоретический анализ и теоретические исследования различных способов снижения трения и их сравнение;
- провести фактические исследования макетного компрессора и получить достоверные результаты;
- провести анализ и интерпретацию полученных результатов исследования и выбрать наиболее оптимальный способ снижения трения.

Теория

Износные процессы определяют в значительной степени долговечность герметичных ротационных компрессоров. В результате износа деталей ротационного компрессора происходит изменение величины зазоров в рабочей полости. Их увеличение приводит к ухудшению ее герметизации, к возрастанию протечек и, вследствие этого, к уменьшению удельной холодопроизводительности.

Наибольшие износы наблюдаются на торцевой поверхности разделительной пластины, находящейся в сопряжении с наружной поверхностью ротора. Необходимо отметить, что радиальный зазор ротационного компрессора между ротором и цилиндром, по которому происходит перетекание газа со стороны сжатия на сторону всасывания, не является разностью размеров двух деталей, но представляет собой функцию многих размеров и зазоров как основных, так и вспомогательных рабочих органов компрессора [10].

Утечка, возникающая в компрессоре, может увеличиваться из-за неправильных условий смазки и вследствие действия газовых сил. Основное место износа на торце разделительной пластины, контактирующей с цилиндром, также имеется износ между разделительной пластиной и пазом корпуса, износ разделительной пластины под действием газовых сил вызывает ее наклон.

Цилиндр компрессора является основным несущим элементом ротационного компрессора, на него действуют механические нагрузки, внутреннее давление, и при этом конструкция корпуса цилинд-

Таблица 2. Список вариантов материалов компрессора
Table 2. List of compressor material options

Предпочтительные варианты материала корпуса	Предпочтительные варианты материала пластины	Предпочтительные варианты материала ротора	Выбранные варианты для реализации
<ul style="list-style-type: none"> — углеродистая сталь; — нержавеющая сталь; — медные сплавы (латунь, бронза); — алюминий с покрытием (твердое анодное оксидирование) 	<ul style="list-style-type: none"> — алюминий (с покрытием); — нержавеющая сталь; — медные сплавы (бронза, латунь); — полимеры на основе фторопластов (суперфлувис, флубон, Ф4К20); — полимеры на основе полиамидов, полиэфирэфиркетон (РЕЕК) 	<ul style="list-style-type: none"> — углеродистая сталь; — нержавеющая сталь; — медные сплавы (латунь, бронза); — алюминий с покрытием; — полимеры на основе полиамидов, полиэфирэфиркетон (РЕЕК) 	<p>Корпус из углеродистой стали 40Х. Пластина из бронзы, ротор — из углеродистой стали 40Х</p>

дра должна обеспечивать качественный теплообмен для эффективного охлаждения и поддержания температуры хладагента и масла [11], поэтому для изготовления цилиндра ротационного компрессора не применяются полимерные и композиционные материалы.

Вот почему важно правильно подобрать материал для рабочей пары «разделительная пластина — ротор» и рабочей пары «разделительная пластина — паз цилиндра» с учетом работы всех элементов группы движения в условиях смазки [12] и особенностях непрерывной работы с учетом свойств хладагента [13].

Многолетний опыт показывает, что высоких результатов по повышению эффективности работы можно достичь путем реализации «эффекта безызносности» различными конструктивно-технологическими решениями. Наиболее распространенным механизмом, в котором реализуется эффект безызносности трения, является поршневой компрессор бытового холодильника. Узлы трения компрессора, изготовленные из стали (коленчатый вал, подшипники скольжения, поршень и цилиндры), работают в режиме безызносности трения в течение многих лет (более 30 и 40) практически без износа. В процессе работы поверхности трения деталей компрессора бытового холодильника самопроизвольно покрываются тонкой медной пленкой толщиной от 1 до 2 мкм, которая предохраняет поверхности от непосредственного контакта. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в результате избирательного растворения медных трубок охладителя маслофреоновой смесью (5 % масла и 50 % фреона). В зону контакта трущихся деталей ионы меди доставляются циркулируемым смазочным материалом.

Положительный опыт использования медьсодержащих присадок в маслах для увеличения ресурса есть также в судовых дизельных поршневых машинах [14]. Однако применительно к ротационным холодильным компрессорам требуется подбор наиболее оптимальных технических решений, основанных на эффекте безызносности с учетом конструкции.

Используя эффект безызносности в совокупности с металлолакирующими смазочными материалами, можно добиться таких результатов, как предотвращение появления задиров трущихся деталей, уменьшить износ трущихся поверхностей, восстановить изношенную трущуюся поверхность. Основываясь на данных преимуществах, был выбран для изучения способов снижения трения именно эффект безызносности. Выбор материалов осуществлялся анализом справочной и технической лите-

ратуры. Варианты материалов для использования в конструкции ротационных компрессоров можно увидеть в табл. 2.

Например, пара трения чугун — бронза марки БрОЗ,5Ц7С5Н показала интенсивный износ в период приработки. Также большой износ наблюдался на торцевой поверхности пластины из высоколегированной Ст9ХС, находящейся в сопряжении с ротором из высокопрочного чугуна АВЧ-1 [15]. Использовать детали, выполненные из полимерных материалов на основе фторопласта (суперфлувис, флубон, Ф4К20), в том числе [8] полиамида, полиэфирэфиркетона (РЕЕК), нецелесообразно, т.к. данные материалы имеют низкий предел текучести при повышенной температуре, низкий коэффициент теплопередачи и, помимо этого, нет данных об их взаимодействии с фреоном и смазочным маслом. К тому же отсутствуют технические решения для удаления продуктов приработки и износа полимерных материалов из рабочей зоны (табл. 2). На основании проведенного анализа с сочетанием различных типов материалов была выбрана пара трения: корпус — из стали 40Х, пластина — из бронзы БрАЖ9-4 ГОСТ 18175 — 78 [16].

Результаты экспериментов

Объектом экспериментального исследования являются элементы макетного холодильного ротационного компрессора НК Р 2,7 с разборным корпусом (фланцевым соединением), основные параметры которого приведены в табл. 1, разрез компрессорного агрегата приведен на рис. 2.

Фотография стального цилиндра экспериментального компрессора представлена на рис. 3.

Первоначально был проведен эксперимент, на котором выполнена проверка вращения без заедания ротора компрессора на воздухе. Когда было зафиксировано, что механизм и пара трения из выбранного материала работоспособны, макет компрессора установили в холодильный контур, заполнили контур хладагентом и смазкой для проведения натурных испытаний. В смазку, циркулирующую совместно с хладагентом в замкнутом контуре компрессорной установки, была добавлена металлолакирующая медная присадка типа МКФ-18.

Схема испытательного контура приведена на рис. 4.

В испытательной компрессорной установке (рис. 4) содержатся соединенные в замкнутый холодильный контур компрессор, конденсатор, фильтр-осушитель, терморегулирующий вентиль, испаритель, термобаллон расширительный, связанный с терморегулирующим вентилем. Элементы уста-

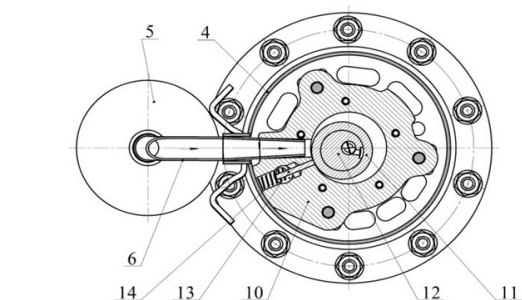
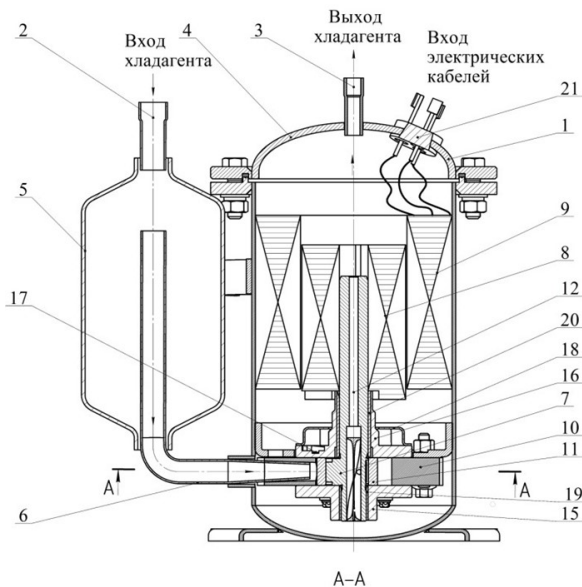


Рис. 2. Конструкция макета ротационного компрессорного агрегата:

- 1 — кожух компрессора, 2 — вход, 3 — выход, 4 — крышка, 5 — отделитель жидкости, 6 — трубопровод, 7 — узел сжатия, 8 — ротор электродвигателя, 9 — статор электродвигателя, 10 — корпус, 11 — катящийся ротор, 12 — вал с эксцентриком, 13 — разделительная пластина, 14 — пружина, 15 — нижний фланец, 16 — верхний фланец, 17 — выходной лепестковый клапан, 18 — крышка, 19 и 20 — подшипники скольжения, 21 — электрический разъем

Fig. 2. Design of the rotary compressor unit layout:

- 1 — compressor casing, 2 — inlet, 3 — outlet, 4 — cover, 5 — liquid separator, 6 — pipeline, 7 — compression unit, 8 — electric motor rotor, 9 — electric motor stator, 10 — housing, 11 — rolling rotor, 12 — shaft with eccentric, 13 — separating plate, 14 — spring, 15 — lower flange, 16 — upper flange, 17 — outlet reed valve, 18 — cover, 19 and 20 — plain bearings, 21 — electrical connector

новки соединены подводящими и отводящими хладагент медными трубопроводами и закреплены на общей раме.

Испытательная установка работает следующим образом.

Хладагент поступает во входной патрубок 2 (рис. 2), далее проходит через отделитель жидкости 5, закрепленный на кожухе 4 компрессора и предназначенный для отделения от хладагента жидкости и предотвращения гидроудара в компрессоре через соединительный трубопровод. Далее хладагент через входной патрубок 2 поступает внутрь герметичного кожуха 4 и попадает в цилиндрическую расточку корпуса 10 через всасывающее отверстие. Хладагент начинает заполнять всасывающую полость цилиндра. Всасывание продолжается до положения, когда разделяющая пластина 13 становится максимально утопленной в пазе корпуса 10.



Рис. 3. Фото цилиндра с ротором и разделительной пластиной экспериментального макета ротационного компрессора

Fig. 3. Photo of a cylinder with a rotor and a separating plate of an experimental prototype of a rotary compressor

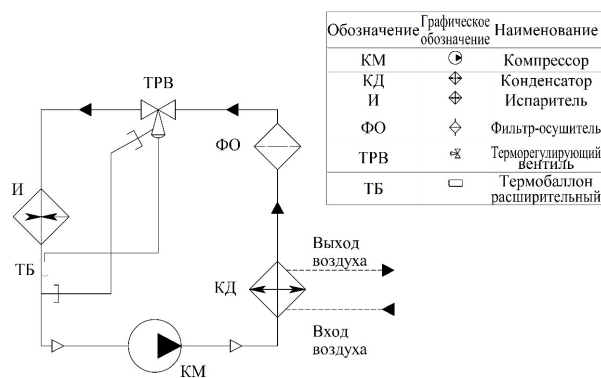


Рис. 4. Схема холодильного контура
Fig. 4. Refrigeration circuit diagram

Электропитание подается через разъем 21 и соединительные провода на статор электродвигателя 9. При этом начинает вращаться ротор электродвигателя и запрессованный в нем вал 12, эксцентрик которого приводит в движение ротор 11. В этот момент начинается процесс всасывания в одной полости и сжатия в другой. При дальнейшем движении ротора 11 увеличивается объем серповидной полости, образованной цилиндрической расточкой в корпусе 10 и катящимся ротором 11, т.е. полости всасывания. В полости сжатия давление возрастает. Когда давление нагнетания превысит давление в полости сжатия цилиндра, открывается выходной лепестковый клапан 17 и сжатый хладагент через отверстия в крышке 18 поступает в герметичный кожух 4, проходит вверх вдоль ротора 8 и статора электродвигателя 9, охлаждая их, затем через выходной патрубок 3 поступает в нагнетательный трубопровод хладагента. Герметичный кожух 4 имеет минимальное количество разъемных соединений и мест утечки хладагента в трубопровод и окружающую среду.

Хладагент после сжатия в компрессоре (рис. 4) имеет высокую температуру, которую необходимо снизить в конденсаторе, который охлаждается при помощи воздуха. После конденсатора хладагент поступает в выходной трубопровод хладагента и на фильтр-осушитель, а затем, через терморегу-

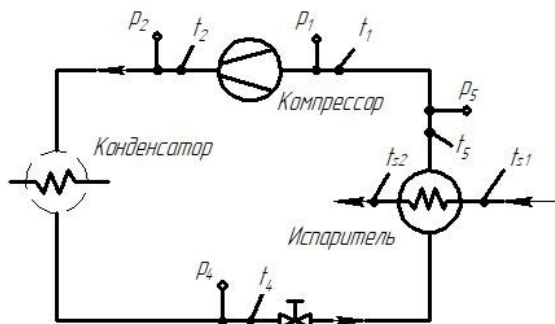


Рис. 5. Схема стэнда для измерения холодопроизводительности
Fig. 5. Scheme of a stand for measuring cooling capacity

лирующий вентиль, во входной трубопровод на испаритель.

В процессе работы поверхности трения деталей компрессора самопроизвольно покрываются тонкой медной пленкой толщиной 1...2 мкм, которая предохраняет поверхности от непосредственного контакта. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в результате избирательного растворения медных трубок охладителя маслорейновой смесью (5 % масла и 50 % фреона). В зону контакта трущихся деталей ионы меди доставляются циркулируемым смазочным материалом, содержащим металлоплакирующую медную присадку.

Испытания пар трения и смазки деталей осуществлялись по методологии, изложенной ГОСТ 23.216-84 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании масло-хладонными смесями». Испытываемые образцы были изготовлены из подобранных материалов. В качестве базовой смазки использовалось высокоочищенное масло. В качестве рабочей среды применялась масло-хладонная смесь в состоянии насыщения.

Окончание периода приработки определялось по стабилизации момента трения, интенсивности изнашивания и температурного режима. Испытания компрессоров проводились на стэнде (рис. 5) в замкнутом циркуляционном контуре холодильного агента в соответствии с требованиями ГОСТ 17008-85 «Компрессоры хладонные герметичные. Технические условия». Критериями оценки при испытаниях являются холодопроизводительность, потребляемая мощность.

В ходе испытаний были проведены замеры для определения полезной холодопроизводительности.

$$Q_0 = G_T \cdot c_p (t_6 - t_7), \quad (1)$$

где G_T — массовый расход теплоносителя через испаритель, Вт (ккал/ч);

c_p — теплоемкость теплоносителя при средней температуре, Дж/г·К;

t_6 — температура теплоносителя на входе в испаритель, °С;

t_7 — температура теплоносителя на выходе из испарителя, °С;

Объемная производительность компрессора определяется как

$$V_A = \frac{Q_0}{q_v}, \quad (2)$$

q_v — удельная объемная холодопроизводительность, которая определяется из цикла работы компрессора в установившемся режиме.

Испытания проводились одним методом дважды в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28564-90 «Машины и агрегаты холодильные на базе компрессоров объемного действия. Методы испытаний». За результат этого метода испытания принимают среднее арифметическое результатов, полученных при первом и втором испытании. Для такого метода считается приемлемым, когда полученные в обоих измерениях результаты разнятся между собой не более чем на $\pm 10\%$.

Холодопроизводительность компрессора — это холодопроизводительность машины, в составе которой данный компрессор обеспечивает массовую подачу хладагента.

В результате проведения первого испытания замеренная на стэнде расчетная холодопроизводительность составила 2597 Вт. При повторных замерах холодопроизводительность получилась 2243 Вт. Разница в результатах обоих измерений составила 7,3 %, что менее 10 % и позволяет принять оба эти измерения. Таким образом, холодопроизводительностью, полученной в ходе натуральных испытаний, можно считать величину, равную 2420 Вт.

Стэнд работает по полному циклу холодильной машины. Расход хладонносителя через испаритель должен обеспечивать перепад температур хладонносителя на входе и выходе из испарителя не менее 6 °С. Испаритель и трубопроводы, соединяющие его с регулирующим вентилем, должны быть изолированы таким образом, чтобы теплопритоки не превышали 5 % холодопроизводительности компрессора. Во время испытаний должны быть измерены следующие параметры, при этом отклонения значений параметров от установившегося режима должны быть в пределах:

- температура хладонносителя на входе и выходе из испарителя $\pm 0,2$ °С;
- расход хладонносителя $\pm 2\%$;
- давление пара хладагента на выходе из испарителя;
- температура пара хладагента на выходе из испарителя;
- давление жидкого хладагента перед регулирующим вентилем;
- температура жидкого хладагента перед регулирующим вентилем;
- температура окружающего воздуха.

Разность температур хладонносителя на входе и выходе из испарителя поддерживается в пределах $\pm 0,2$ °С.

Массовый расход хладагента:

$$G_a = \frac{V_s \rho_s c_s (t_{s1} - t_{s2}) + KF \Delta t}{i_5 - i_4}, \quad (3)$$

где $KF \Delta t$ — теплопритоки к испарителю, кВт; Δt — разность между средней температурой среды, соприкасающейся с кожухом испарителя, и температурой окружающего воздуха, °С.

Теплопроводимость испарителя KF определяют расчетным или опытным методом¹. Расчетным методом — в соответствии с п. 1.5.2 ГОСТ 28547-90.

Теплопроводимость испарителя опытным методом определяют по четырем измерениям разности между температурой среды, соприкасающейся с кожухом испарителя, и температурой окружающего

воздуха, которая должна быть не менее 15 °С, их значения не должны отличаться друг от друга более чем на ± 1 °С.

Температура окружающего воздуха поддерживается постоянной в пределах ± 1 °С.

Теплопроводимость испарителя KF , кВт/°С, рассчитывают по формуле:

$$KF = \frac{Q_u}{\Delta t} = \frac{V_s \rho_s c_s (t_{s1} - t_{s2})}{\Delta t}, \quad (4)$$

где Q_u — тепловой поток в испарителе, кВт; Δt — разность между средней температурой среды, соприкасающейся с кожухом испарителя, и температурой окружающего воздуха, °С.

За среднюю температуру t_{cp} принимают:

— для испарителя с межтрубным кипением — температуру кипения хладагента;

— для испарителя с внутритрубным кипением — среднюю температуру хладоносителя на входе и выходе из испарителя.

Обсуждение результатов

Холодопроизводительность, полученная в ходе испытаний, соответствует расчетной в пределах 7,3 %, что менее 10 % и позволяет принять измерения, полученные опытным путем, что свидетельствует о работоспособности и обеспечении холодопроизводительности ротационного компрессора, изготовленного из подобранных материалов.

В связи с тем, что холодопроизводительность компрессора стабильно обеспечивается, можно сделать вывод, что одним из способов снижения трения и обеспечения допустимых зазоров между деталями компрессора является комплекс мероприятий, основанный на эффекте безызносности:

— изготовление корпуса и ротора компрессора из углеродистой стали;

— изготовление разделительной пластины из твердого медного сплава — бронзы;

— изготовление соединительных трубок замкнутого холодильного контура из меди;

— дополнительно использование масла с металлоплакирующим присадками меди.

Для количественной оценки ресурса планируется проведение длительных испытаний по наработке ротационного компрессора в рабочих условиях.

Выводы и заключение

Научная новизна настоящей работы заключается в том, что предложены новые принципы решения задач снижения трения и износа деталей, для сохранения характерных зазоров и предотвращения внутренних утечек, не используемые ранее в ротационных холодильных компрессорах. Без существенного изменения известной конструкции ротационного компрессора предложена технология изготовления с использованием эффекта безызносности [17] для снижения трения деталей компрессора. В качестве достигнутых результатов можно отметить, что выбраны материалы, технология и подтверждена работоспособность ротационного компрессора, изготовленного по данной технологии. Данные конструктивные и схемные технические решения, с нашей точки зрения, перспективны и могут быть применены отечественными предприятиями для изготовления ротационных компрессо-

ров [18] для использования их в малых холодильных установках различных объектов, кондиционерах и судовых холодильных установках [19], не требуют сложного технологического оборудования, технически реализуемы и, в случае необходимости, позволяют заменить широко применяемые ротационные компрессоры иностранного производства таких мировых производителей, как GMCC, Toshiba, LG, Panasonic, осуществлять техническое обслуживание, модернизацию и ремонт холодильного оборудования.

Примечания

¹ Носков А. Н., Пекарев В. И., Малышев А. А. [и др.]. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. В 2 ч. Ч. 2. Расчет роторных компрессоров холодильных машин. Санкт-Петербург: Изд-во ИТМО, 2016. 94 с.

Список источников

1. Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 1. Рынок и производство // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22. EDN: LRHXKI.

2. Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 2. Технологии и наука // Вестник Международной академии холода. 2023. № 2. С. 14–25. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25. EDN: RPHILW.

3. Юша В. Л., Громов А. Ю., Потапов Ю. А. Анализ перспективных направлений создания отечественной компонентной базы ротационных машин объёмного действия для малой энергетики, холодильной и климатической техники // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. № 4. С. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25. EDN: PKVOWK.

4. Кузнецов Л. Г., Бураков А. В., Котлов Н. А., Семенов А. А. Роторные компрессорные станции для кораблей ВМФ, гражданского флота, нефтегазового сектора и энергетики // Морской вестник. 2021. № 3 (79). С. 55–58. EDN: XOREWF.

5. Кузнецов Л. Г., Кузнецов Ю. Л., Бураков А. В., Кудла Н. А. Повышение эффективности роторных компрессоров // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 1. С. 101–110. DOI: 10.18721/JEST.25110. EDN: IWBQZY.

6. Носов Е. Ю., Павлюченко Е. А. Интенсификация охлаждения ротационных компрессоров с катящимся ротором // Омский научный вестник. 2006. № 10 (48). С. 56–59. EDN: IBINJP.

7. Aw K. T., Ooi K. T. Review on Sliding Vane and Rolling Piston Compressors // Machines. 2021. № 9 (6). P. 125. DOI: 10.3390/machines9060125.

8. Кулагина Г. С., Железина Г. Ф., Кан А. Ч. [и др.]. Эксплуатационные свойства антифрикционного самосмазывающегося органоэластика на основе тканого наполнителя из политетрафторэтиленовых волокон и нитей Арселон // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). С. 37–46. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-37-46.

9. Галиев А. Р., Есина П. А., Корнев В. М. [и др.]. Исследование безызносности материалов // Машиностроение: новые концепции и технологии: всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 22 октября 2021 г. Красноярск: Изд-во СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. С. 87–90. EDN XWWCSI.

10. Романович Ж. А. Повышение износостойкости и долговечности деталей герметичного ротационного компрессора //

НиКа. 2008. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-iznosostoykosti-i-dolgovechnosti-detaley-germetichnogo-rotatsionnogo-kompressora> (дата обращения: 31.03.2024).

11. Meng X., Qi Y., Sheng L. [et al.]. Investigations on efficiency improvement of rolling piston type rotary compressor with a new-designed cylinder // *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 222. P. 119920. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119920.

12. Li R., Jing L., Meng X. [et al.]. Numerical analysis of vane-slot friction pair in a rolling piston compressor considering deformation and groove design. 2021. Vol. 162. P. 107124. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107124.

13. Shi H., Lei B., Wu J. Dynamic characteristics of refrigerant and lubricant in R290 rolling piston compressor of low-temperature air to water heat pump (LT-AWHP) during defrosting cycle // *International Journal of Refrigeration*. 2022. Vol. 144. P. 163–174. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.07.007.

14. Ding S., Wei H., Yang O. [et al.]. Tribological behavior and applicability analysis of cast iron and iron-based powder metallurgy for rolling piston rotary compressor under different applied loads // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022. Vol. 45, no. 1. 9 p. DOI: 10.1007/s40430-022-03934-9.

15. Крылов Д. А., Цветков Ю. Н. Влияние добавок ультрадисперсного порошка оловянистой бронзы в моторное масло на работу дизеля // *Журнал университета водных коммуникаций*. 2012. № 3 (15). С. 75–85. EDN: PCREID.

16. Пат. 223821 Российская Федерация, МПК F 04 C 18/356. Ротационная компрессорная установка / Бураков А. В., Кудла Н. А., Ховалко А. А. № 2023135511; заявл. 26.12.2023; опубл. 05.03. 2024. Бюл. № 7. 10 с.

17. Прокопенко А. К., Голубев А. П., Зикеев Г. П. [и др.]. Повышение срока службы деталей машин и инструмента металлоплакированием: моногр. Москва: Изд-во ИИЦ МГУДТ, 2010. 87 с. ISBN 978-5-87055-124-1.

18. Кудла Н. А., Бураков А. В., Хотский Р. Р. Создание перспективного компрессора для судовых холодильных устано-

вок // *Морской вестник*. 2023. № 4 (88). С. 51–56. EDN: JJQSQK.

19. Гаркунов Д. Н. Триботехника, конструирование, изготовление и эксплуатация машин. Москва: Изд-во МСХА, 2001. 629 с. ISBN 5-94327-093-0.

КУДЛА Наталия Александровна, аспирант кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург; ведущий инженер АО НПО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1597-6040

AuthorID (РИНЦ): 1160820

Адрес для переписки: graf_fi@rambler.ru

БУРАКОВ Александр Васильевич, главный конструктор АО НПО «Компрессор», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 8501-1234

AuthorID (РИНЦ): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

ORCID: 0000-0002-3553-2854

Адрес для переписки: 47otdel@compressor.spb.ru

Для цитирования

Кудла Н. А., Бураков А. В. Выбор способа снижения трения в разрабатываемых для импортозамещения ротационных холодильных компрессорах // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2024. Т. 8, № 2. С. 52–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-52-60.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024 г.

© Н. А. Кудла, А. В. Бураков

SELECTING A METHOD FOR REDUCING FRICTION IN ROTARY REFRIGERATION COMPRESSORS DEVELOPED FOR IMPORT SUBSTITUTION

N. A. Kudla^{1,2}, A. V. Burakov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya Str., 29, 195251

² JSC Scientific and Production Association «Compressor»,
Russia, Saint Petersburg, Bolshoi Sampsonievsky Ave., 64, 194044

The article discusses one of the methods for reducing friction, used for newly developed rotary compressors as part of import substitution work. The experience of using rotary refrigeration compressors is analyzed and the main factors determining refrigeration capacity are identified. Methods used in aerospace engineering and power engineering to reduce friction and increase the service life of mechanical elements and assemblies using metallic and non-metallic materials have been identified, and the most promising materials and development trends have been analyzed. A fairly common method of reducing friction, based on the weariness effect, is chosen for study. Based on already known results, a technical solution based on the wear-free effect has been proposed to reduce friction of a refrigeration compressor with a rolling rotor.

Keywords: compressor, refrigeration, rotary, efficiency, wearlessness effect, rolling-rotor compressor, metal-clad.

References

1. Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya kholodil'nogo kompressorostroyeniya. Chast' 1. Rynok i proizvodstvo [State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 2. Technology and science] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 1. P. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22. EDN: LRHXKI. (In Russ.).
2. Pronin V. A., Kovanov A. V., Tsvetkov V. A. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya kholodil'nogo kompressorostroyeniya. Chast' 2. Tekhnologii i nauka [State of the art and prospects for refrigerating compressor industry. Part 2. Technology and science] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 2. P. 14–25. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-14-25. EDN: RPHILW. (In Russ.).
3. Yusha V. L., Gromov A. Yu., Potapov Yu. A. Analiz perspektivnykh napravleniy sozdaniya otechestvennoy komponentnoy bazy rotatsionnykh mashin ob"yemnoy deystviya dlya maloy energetiki, kholodil'noy i klimaticheskoy tekhniki [The analysis of promising directions for creation of domestic component base of volumetric rotary machines for low power energy, refrigeration and climate technology] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsonno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. No. 4. P. 9–25. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-9-25. EDN: PKVOWK. (In Russ.).
4. Kuznetsov L. G., Burakov A. V., Kotlov N. A. [et al.]. Rotornyye kompressornyye stantsii dlya korabley VMF, grazhdanskogo flota, neftegazovogo sektora i energetiki [Rotary compressor stations for ships of the Navy, civil fleet, oil and gas sector and energy] // Morskoy vestnik. *Morskoy Vestnik*. 2021. No. 3 (79). P. 55–58. EDN: XOREWF. (In Russ.).
5. Kuznetsov L. G., Kuznetsov Yu. L., Burakov A. V. [et al.]. Povysheniye effektivnosti rotornykh kompressorov [Improving the efficiency of rotary compressors] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPBPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. *St. Petersburg polytechnical university. Journal of engineering sciences and technology*. 2019. Vol. 25, no. 1. P. 101–110. DOI: 10.18721/JEST.25110. EDN: IWBQZY. (In Russ.).
6. Nosov E. Yu., Pavlyuchenko E. A. Intensifikatsiya okhlazhdeniya rotatsionnykh kompressorov s katyashchimsya rotorom [Intensive cooling of rotary compressors with rolling rotor] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2006. No. 10 (48). P. 56–59. EDN: IBINJP. (In Russ.).
7. Aw K. T., Ooi K. T. Review on Sliding Vane and Rolling Piston Compressors // *Machines*. 2021. No. 9 (6). P. 125. DOI:10.3390/machines9060125. (In Engl.).
8. Kulagina G. S., Zhelezina G. F., Kan A. Ch. [et al.]. Eksploatatsionnyye svoystva antifriktsionnogo samosmazvyvayushchegosya organoplastika na osnove tkanogo napolnitelya iz politetraftoretlenovykh volokon i nitey Arselon [Exploitation properties of antifriction selflubricating organoplastic based on fabric made of polytetrafluoroethylene and arcelon fibers] // Trudy VIAM. *Proceedings of VIAM*. 2023. No. 11 (129). P. 37–46. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-37-46. (In Russ.).
9. Galiyev A. R., Esina P. A., Kornev V. M. [et al.]. Issledovaniye bezynostnosti materialov [Study of the neutrality of materials] // Mashinostroyeniye: novyye kontseptsii i tekhnologii. *Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies*. Krasnoyarsk, 2021. P. 87–90. EDN: XWWCSI. (In Russ.).
10. Romanovich Zh. A. Povysheniye iznosostoykosti i dolgovrechnosti detaley germetichnogo rotatsionnogo kompressora [Increasing the wear resistance and durability of hermetic rotary compressor parts] // NiKa. *NiKa*. 2008. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-iznosostoykosti-i-dolgovrechnosti-detaley-germetichnogo-rotatsionnogo-kompressora> (accessed: 31.03.2024). (In Russ.).
11. Meng X., Qi Y., Sheng L. [et al.]. Investigations on efficiency improvement of rolling piston type rotary compressor with a new-designed cylinder // *Applied Thermal Engineering*. 2022.

Vol. 222. P. 119920. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119920. (In Engl.).

12. Li R., Jing L., Meng X. [et al.]. Numerical analysis of vane–slot friction pair in a rolling piston compressor considering deformation and groove design. 2021. Vol. 162. P. 107124. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107124. (In Engl.).

13. Shi H., Lei B., Wu J. Dynamic characteristics of refrigerant and lubricant in R290 rolling piston compressor of low-temperature air to water heat pump (LT-AWHP) during defrosting cycle // International Journal of Refrigeration. 2022. Vol. 144. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.07.007. (In Engl.).

14. Ding S., Wei H., Yang O. [et al.]. Tribological behavior and applicability analysis of cast iron and iron-based powder metallurgy for rolling piston rotary compressor under different applied loads // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2022. Vol. 45, no. 1. DOI: 10.1007/s40430-022-03934-9. (In Engl.).

15. Krylov D. A., Tsvetkov Yu. N. Vliyaniye dobavok ul'tradispersnogo poroshka olovyaniy bronzy v motornoye maslo na rabotu dizelya [The effect of adding ultradisperse tin bronze powder to engine oil on diesel performance] // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. *The Journal of University of Water Communications*. 2012. No. 3 (15). P. 75a–85. EDN: PCREID. (In Russ.).

16. Patent 223821 Russian Federation, IPC F04C 18/356. Rotatsionnaya kompressornaya ustanovka [Rotary compressor unit] / Burakov A. V., Kudla N. A., Khovalko A. A. No. 2023135511. (In Russ.).

17. Prokopenko A. K., Golubev A. P., Zikeyev G. P. [et al.]. Povysheniye stroka sluzhby detaley mashin i instrumenta metalloplakirovaniyem [Increasing the service life of machine parts and tools by metal cladding]. Moscow, 2010. 87 p. ISBN 978-5-87055-124-1. (In Russ.).

18. Kudla N. A., Burakov A. V., Khotskiy R. R. Sozdaniye perspektivnogo kompressora dlya sudovykh kholodil'nykh ustanovok [Creation of a promising compressor for ship

refrigeration units] // Morskoy vestnik. *Morskoy Vestnik*. 2023. No. 4 (88). P. 51–56. EDN: JJQSQK. (In Russ.).

19. Garkunov D. N. Tribotekhnika, konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin [Tribotechnics, design, manufacture and operation of machines]. Moscow, 2001. 629 p. (In Russ.).

KUDLA Nataliya Aleksandrovna, Graduate Student of Compressor, Vacuum and Refrigeration Engineering Department at the Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg; Lead Engineer of JSC Scientific and Production Association «Compressor», Saint Petersburg.

SPIN-code: 1597-6040

AuthorID (RSCI): 1160820

Correspondence address: graf_fi@rambler.ru

BURAKOV Aleksandr Vasilyevich, Chief Designer of JSC Scientific and Production Association «Compressor», Saint Petersburg.

SPIN-code: 8501-1234

AuthorID (RSCI): 994917

AuthorID (SCOPUS): 57210981312

ORCID: 0000-0002-3553-2854

Correspondence address: 47otdel@compressor.spb.ru

For citations

Kudla N. A., Burakov A. V. Selecting a method for reducing friction in rotary refrigeration compressors developed for import substitution // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 52–60 DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-2-52-60.

Received April 08, 2024.

© N. A. Kudla, A. V. Burakov