

На правах рукописи



Кобыльский Роман Эдуардович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТИХОХОДНОГО
ДЛИННОХОДОВОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА ЗА
СЧЁТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОГО
УПЛОТНЕНИЯ**

2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника гидро- и
пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Омск 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Бусаров Сергей Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» (ФГАОУ ВО ОмГТУ)

Официальные оппоненты: **Ворошилов Игорь Валерьевич**
Кандидат физико-математических наук, председатель совета директоров ООО «Краснодарский компрессорный завод»

Елагин Михаил Юрьевич
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и процессы»

Ведущая организация: Акционерное Общество «Компрессор», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «03» октября 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.11, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68, Зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», а также на официальном сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=552603>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.312.11, к.т.н., доцент



Т.Н. Мустафин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность рассматриваемой проблемы

Возрастающие требования к техническому уровню современного производства, разработка новых технологий, внедрение механизации и автоматизации во многих отраслях народного хозяйства требует создания и освоения новых типов компрессоров, способных работать при среднем и высоком давлении, не загрязняющих рабочее вещество маслом в широком диапазоне температур.

В настоящее время заявленным требованиям соответствует относительно новая конструкция тихоходных длинноходовых компрессоров. Особенностью данных компрессоров являются: отношение хода поршня к диаметру цилиндра более десяти, рабочий цикл осуществляется за две и более секунды. Благодаря данным конструктивным особенностям длинноходовой компрессор позволяет сжимать газ в сто и более раз при атмосферном давлении всасывания, при сохранении температуры сжимаемого газа, не превышающей допустимые. Уменьшение количества ступеней сжатия, повышенная степень унификации компрессора по сравнению с быстроходными компрессорами за счет того, что объем второй и последующих ступеней сжатия уменьшается посредством уменьшения хода поршня, выигрыш по массогабаритным параметрам по сравнению с мембранными компрессорами, все эти достоинства сосредоточены в одной конструкции. В предыдущих исследованиях авторы выявили, что эффективность рабочего процесса напрямую зависит от герметичности рабочей камеры.

В быстроходных компрессорах в качестве цилиндропоршневых уплотнений чаще всего используются поршневые кольца различного типа, которые, как показали проведенные исследования, неприменимы для тихоходного длинноходового поршневого компрессора. Добиться средних и высоких давлений при коэффициенте подачи не ниже 0,7 в тихоходных длинноходовых компрессорах возможно только при использовании манжетных цилиндропоршневых уплотнений. Вышеизложенное актуализирует тему исследования, направленную на повышение эффективности рабочего процесса тихоходных длинноходовых компрессоров и создание манжетного уплотнения, превосходящего известные по критериям герметичности.

Степень разработанности темы

Конструкции и рабочие процессы, протекающие в быстроходных компрессорах известны и представлены как отечественными, так и зарубежными авторами (Пластинин П.И., Френкель М.И., Фотин Б.С., Прилуцкий И.К., Захаренко С.Е., Михайлов А.К., Minta M., Barclay M., Davies R., John F., McLaren, Corberan J.M., Hafner J., Gaspersic B., Luszczyski M., Prakash R. и др.). Конструкции и рабочие процессы, протекающие в тихоходных длинноходовых компрессорах на протяжении нескольких лет, исследуются следующими авторами: Юша В.Л., Бусаров И.С., Громов А.Ю., Недовенчаный А.В. и др. Однако, в данных работах не были затронуты основные аспекты взаимосвязи факторов, влияющих на рабочий процесс исследуемых компрессоров с манжетных цилиндропоршневых уплотнений

Как известно, в быстроходных компрессорах в одной ступени газ сжимается от 2 до 8 раз, в компрессорах периодического действия возможно сжатие газа до 10 раз. В исследуемых компрессорных ступенях за счет интенсивного охлаждения рабочего газа, возможно, сжимать газ от 100 до 120 раз. Результаты научных исследований, направленных на изучение принципов и особенностей работы цилиндропоршневых уплотнений отражены в трудах таких ученых, как Медведев С.М., Попов В.П., Анисимов С.А., Ландо Б.С., Славин И.Ю., Буткевич И.К., Карагусов И.Х., Новиков И.И., Захаренко В.П.

В быстроходных компрессорах осуществляется от 6 до 25 циклов в секунду, при этом перепад давления по поршню в первой ступени сжатия не превышает 1,0 МПа, в последней ступени сжатия (например, четвертой) перепад давления по поршню лежит в диапазоне от 5 до 10 МПа. Учитывая относительно высокую скорость скольжения поршня, манжетные уплотнения не нашли широкого применения для быстроходных компрессоров. Данный факт обуславливает скудность информации в доступных литературных источниках, хотя применение манжеты в качестве цилиндропоршневого уплотнения давно известно. Они нашли широкое применение в микрокомпрессорах замкнутых дроссельных систем, микроохладителях Стирлинга, а также в поршневых детандерах.

Учитывая выявленную проблематику, становится актуальна необходимость проведения комплексного теоретического и экспериментального исследования манжетного цилиндропоршневого уплотнения, изготовленного из антифрикционного полимера на основе фторопласта, результаты которого могут быть использованы для проектирования быстроходных компрессоров, тихоходных длинноходовых компрессоров, компрессоров микрокриогенной техники, а также для расширительных машин объемного принципа действия.

Цель диссертационной работы

Повышение энергоэффективности бессмазочного тихоходного длинноходового компрессора среднего и высокого давления путем применения новой конструкции наборного манжетного цилиндропоршневого уплотнения.

Задачи:

1. Разработать уточнённую математическую модель расчета рабочего процесса тихоходного длинноходового поршневого компрессора, с учётом упругодеформированного состояния манжетного цилиндропоршневого уплотнения и его износа.

2. Разработать инженерную методику расчета толщины стенки манжеты и износа наборного цилиндропоршневого уплотнения.

3. Разработать методики экспериментального исследования манжетных цилиндропоршневых уплотнений и бессмазочного тихоходного длинноходового компрессора, а также стенды для их реализации.

4. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров манжетных уплотнений на интегральные характеристики тихоходного длинноходовой поршневого компрессора.

5. Разработать рекомендации по проектированию манжетных цилиндропоршневых уплотнений для тихоходного длинноходового поршневого компрессора.

Научная новизна работы

1. Разработана уточнённая математическая модель расчета рабочих процессов тихоходного длинноходового поршневого компрессора, учитывающая переменную величину радиального зазора в манжетном цилиндропоршневом уплотнении.

2. Впервые получены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса тихоходного длинноходового поршневого компрессора с новой конструкцией наборного манжетного цилиндропоршневого уплотнения, позволившие провести апробацию математической модели.

3. Теоретически и экспериментально установлена взаимосвязь между конструкцией манжетного уплотнения, свойствами, применяемых материалов для его изготовления, режимными параметрами и интегральными характеристиками тихоходного длинноходового поршневого компрессора, определены затрачиваемая мощность на трение и механический КПД.

4. Получены результаты исследования влияния характеристик материалов на диапазон допустимых толщин стенок манжетного уплотнения, получена зависимость эквивалентного зазора от количества установленных манжетных уплотнений и определены принципы их проектирования.

Теоретическая и практическая значимость работы

Значение результатов для теории.

1. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель расчёта рабочего процесса тихоходного длинноходового поршневого компрессора с разработанной конструкцией манжетного цилиндропоршневого уплотнения, позволяющая учитывать изменение эквивалентного зазора в цилиндропоршневом уплотнении.

2. Разработана инженерная методика расчета толщины стенки и износа наборного манжетного уплотнения.

3. Установлено и научно обосновано влияние величины эквивалентного зазора в цилиндропоршневом уплотнении на энергетические характеристики ступени.

Значение результатов для практики.

1. Разработаны методики экспериментального исследования манжетных цилиндропоршневых уплотнений и стенды для их реализации, учитывающие особенности функционирования тихоходного длинноходового компрессора.

2. На основании полученных результатов экспериментальных исследований определен диапазон толщины стенок манжетного цилиндропоршневого уплотнения тихоходного длинноходового компрессора.

3. Предложено программное обеспечение для расчёта рабочих процессов и интегральных характеристик длинноходовой поршневой компрессорной ступени, содержащей новое наборное манжетное уплотнение.

4. Разработаны рекомендации по проектированию нового манжетного уплотнения.

5. Предложена конструкция комбинированного уплотнения, позволяющая разгрузить первое манжетное уплотнение и обеспечить равномерный перепад давления на каждом манжетном уплотнении.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач были использованы: математическое моделирование упруго-деформированного состояния композитных материалов манжет, математическое моделирование величины перепада давления на цилиндропоршневом уплотнении; проверка методики расчёта по экспериментальным данным, численные методы расчёта; экспериментальные методы исследования рабочих процессов поршневых компрессорных ступеней, основанные на измерении мгновенных параметров состояния рабочего тела и их интегральных характеристик; параметрический анализ влияния конструктивных и режимных факторов на работу компрессорной ступени.

Личный вклад автора

Автором выполнен анализ полученных результатов и разработаны рекомендации по конструированию манжетного уплотнения, сформулированы цель и задачи исследования. С участием автора разработана запатентованная конструкция комбинированного уплотнения, содержащего обратную манжету, позволяющая разгрузить первое манжетное уплотнение; разработана и апробирована методика расчёта деформированного состояния манжет; получены результаты параметрического анализа. Автором разработана уточнённая математическая модель расчета газодинамических параметров газа в зазоре цилиндропоршневого уплотнения, а также инженерная методика расчета износа цилиндропоршневого уплотнения. Созданы методики экспериментального исследования и стенды для их реализации, позволившие определить удельный износ исследуемых материалов, коэффициенты трения и мощность трения в манжетном уплотнении.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Математическая модель расчёта рабочего процесса тихоходного длинноходового поршневого компрессора с учетом переменного эквивалентного зазора в наборном манжетном уплотнении, позволяющая выполнять расчёты при изменении давления газа в рабочей камере в диапазоне от 0,1 МПа до 12,0 МПа, времени рабочего цикла $\tau = 2 \div 4$ с, величине хода поршня $S_{\text{п}} = 0,2 \div 0,8$ м.

2. Инженерная методика расчета толщины стенки манжеты и износа наборного цилиндропоршневого уплотнения.

3. Предложенная конструкция с рекомендованным количеством манжетных уплотнений позволяющая повысить, изотермический индикаторный КПД на 10 % и коэффициент подачи на 15 %. При этом мощность на трение составляет до 10% от индикаторной.

Достоверность результатов обеспечивается использованием существующих общепринятых методов исследования с применением современного оборудования, прошедшего метрологическую поверку; апробацией результатов; воспроизводимостью результатов экспериментов и статистической обработкой полученных данных,

удовлетворительным совпадением экспериментальных и теоретических результатов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы обсуждались и докладывались на Международной научно-практической конференции "Инновации в развитии научных и творческих направлений образовательного процесса" (г. Кемерово, 2019 г.); Международной научно-практической конференции "Scientific and Creative skills – 2020" (г. Кемерово, 2020 г.); VII–XII научно-технических конференциях «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства ("Oil and Gas Engineering")" (г. Омск, 2017–2023 гг.); III Международной научно-технической конференции "Проблемы машиноведения" (г. Омск, 2019 г.); молодежном конкурсе "Молодые ученые" (г. Москва, 2020 г.); Национальной научно-технической конференции XI (г. Москва, 2021 г.); Научно-технической конференции блока логистики, переработки и сбыта "Газпром нефти" (г. Омск, 2021 г.); Международной учебно-исследовательском конкурсе "Студент года 2021" (г. Петрозаводск, 2021 г.) XI Международной научно-технической конференции молодых специалистов "Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин" (г. Казань, 2022); Всероссийской научно-практической конференции "Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование" (г. Москва, 2021 г.); всероссийском инновационном конкурсе УМНИК-2022/2023 (г. Омск, 2022- 2023 г.); Всероссийской симпозиуме "Компрессорное оборудование ГТУ для газотранспортной системы" (г. Санкт-Петербург, 2023). Методика расчёта внедрена в учебный процесс ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», а разработанные рекомендации по проектированию КС – в АО «ГК «Титан». (г. Омск).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00272 "Создание концептуальных основ и теории рабочих процессов тихоходных машин объёмного принципа действия с газораспределительной системой, содержащей упругие эластомерные элементы".

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 научных печатных работ, из них 6 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 9 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science; 3 иных изданиях; получен 1 патент на изобретение

Соответствие паспорту специальности

Тема работы полностью соответствует п.1, 2 и 3 паспорта специальности 2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Содержит 207 страниц текста, 127 рисунков, 19 таблиц. Библиографический список содержит 179 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулирована научная проблема, научная новизна и практическая значимость, представлено кратное содержание диссертации.

В 1 главе проведен литературно-патентный обзор существующих конструкций контактных манжетных цилиндропоршневых уплотнений, применяемых как в насосной, так и компрессорной, расширительной технике, обозначена основная проблематика выполняемой научно-исследовательской работы, которая заключается в обеспечении требуемой герметичности рабочей камеры. В предыдущих работах авторами было доказано, что в тихоходной длинноходовой ступени возможно сжать газ в 100 раз при атмосферном давлении всасывания, однако, при этом это производительность компрессора составляла ниже 20 %. Было установлено, что при сжатии газа в диапазоне среднего и высокого давления и времени осуществления рабочего цикла более 1 с, необходимо повысить герметичность рабочей камеры путем разработки эффективной конструкции манжетного уплотнения, подбора материала, определения минимального количества устанавливаемых манжет. Был проведен обзорный анализ существующих материалов, применяемых для бесшмазочных уплотнений в поршневых компрессорах, таких как Ф4К20, Ф4К15М5, Криолон-3, Флубон-20, Флувис-20. Проведен обзорный анализ существующих теоретических и экспериментальных методов исследования изнашивания цилиндропоршневой группы.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям работоспособности уплотнения поршня посвящены работы Анисимова С.А., Карагусова И.Х., Попова В.П., Медведева С.М., Новикова И.И., Захаренко В.П., Буданова В.А., Архарова А.М., Самвелова А.В.

По результатам проведённого аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во 2 главе представлены разработанные модели расчёта: уточненная математическая модель расчета рабочего процесса длинноходовой поршневой компрессорной ступени; модель определения параметров течения газа в зазоре цилиндропоршневого уплотнения; модель износа цилиндропоршневого уплотнения.

Обобщенная схема расчета поршневой компрессорной ступени представлена на рисунке 1.

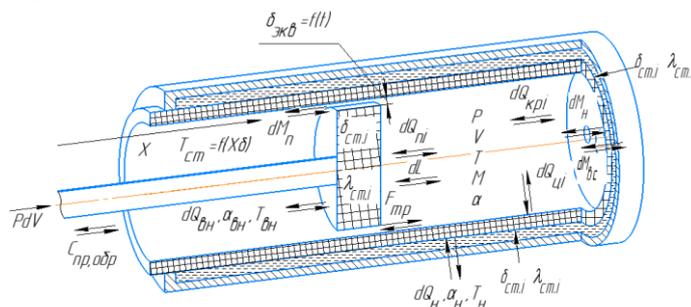


Рисунок 1 – Расчетная схема

При реализации данной математической модели были использованы следующие допущения: рассматриваемая рабочая среда непрерывна и однородна, параметры рабочей среды изменяются мгновенно и одновременно по всему объему рабочей камеры, не учитывается изменение потенциальной и кинетической энергии, теплота от трения цилиндропоршневых уплотнений не подводится к рабочей среде, параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны, режим течения рабочей среды в конструктивных зазорах – адиабатное, теплообмен между рабочей средой и стенками рабочих полостей в контрольных объемах – конвективный, в каждый момент времени коэффициент теплоотдачи внутри рабочей камеры одинаков.

Расчетные уравнения модели представлены ниже:

$$dU_i = dQ_i - dA_i \pm dE_{ni} \pm dE_{vci} \pm dE_{pi}, \quad (1)$$

где dU_i – Внутренняя энергия газа на i -ом номере очередного шага по времени, Дж; dQ_i – теплота, подведенная или отведенная от газа за время $d\tau$, Дж; dA_i – механическая работа за время $d\tau$, Дж; $dE_{ni}, dE_{vci}, dE_{pi}$ – количество энергии, проходящее соответственно через нагнетательные, всасывающие клапаны и неплотности в цилиндропоршневом уплотнении за время $d\tau$, Дж.

Давление сжимаемого газа на i – м шаге по времени находится:

$$P_i = \frac{\xi_i \cdot m_i \cdot R \cdot T_i}{V_i}, \quad (2)$$

где ξ_i – коэффициент сжимаемости газа; R – газовая постоянная, Дж/К·кг; m_i – масса газа в контрольной полости на i – м шаге по времени, кг; V_i – объём газа на i – м шаге по времени, м³; T_i – температура сжимаемого газа на i – м шаге по времени, К.

Массовый расход газа через неплотности цилиндропоршневого уплотнения:

$$dm_{pi} = \xi_i \cdot \Phi_{\text{эк.}i} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_i \cdot \Delta P_i} \cdot d\tau, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{эк.}i}$ – эквивалентная площадь, м²; ΔP_i – перепад давления газа до и после поршня на i – м шаге по времени, Па.

В свою очередь

$$\Phi_{\text{эк.}i} = \pi D_{\text{ц}} \delta_{\text{экв.}i} \quad (4)$$

где $\delta_{\text{экв.}i}$ – эквивалентный зазор в цилиндропоршневом уплотнении, который меняется в зависимости от давления в рабочей камере за время одного рабочего цикла, м.

Модель определения параметров газа в зазоре цилиндропоршневого уплотнения в стационарной постановке, была разработана в программном пакете ANSYS CFX. Общий вид расчетной области представлен на рисунке 2.

Основные расчетные уравнения представлены ниже:

Уравнение суммарного массового расхода в зазоре цилиндропоршневого уплотнения:

$$M_i = C \delta_{\text{ц}i}^3 (p_i^2 - p_{i+1}^2) / \mu_i R T_i \xi_i, \quad (5)$$

где C – конструктивный параметр уплотнения; δ – радиальный условный зазор между уплотнением и цилиндром, м; μ_i – динамическая вязкость газа, Па·с;

T_i – температура газа перед уплотнением, К; p_i, p_{i+1} – давление до и после уплотнения, Па.

Среднее давление газа в зазоре определяется по следующей формуле:

$$p_{i \text{ ср}} = \frac{2(p_i^3 - p_{i+1}^3)}{3(p_i^2 - p_{i+1}^2)} \quad (6)$$

В результате математического моделирования было получено типичное распределение давления газа в зазоре между цилиндропоршневым уплотнением и стенкой цилиндра. Важными результатами математического моделирования являются полученные данные по коэффициенту противодействия β и нагрузки.

Разработанная математическая модель была сопоставлена с результатами экспериментальных исследований в главе 3.

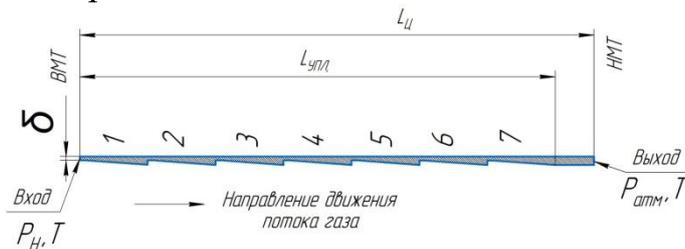


Рисунок 2 – Общий вид расчетной области

Также в рамках данной главы была разработана модель износа. В данной модели проводится расчет радиальной толщины лепестка манжеты в программном пакете ANSYS Workbench. Расчетная схема представлена на рисунке 3.

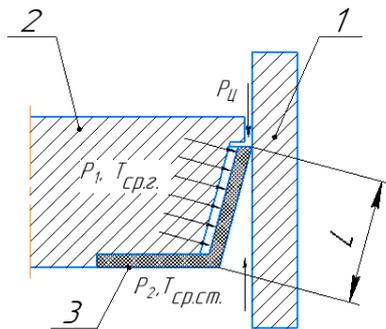


Рисунок 3 – Расчетная схема:
1 – цилиндр, 2 – посадочная шайба, 3 – манжетное уплотнение
 $P_ц$ – максимальное давление в цилиндре, МПа, P_1 – давление в зазоре, P_2 – давление после уплотнения, $T_{ср.г.}$ – средняя температура газа, $T_{ср.ст.}$ – средняя температура стенки

Так для $P_H=12$ МПа были получены следующие результаты: минимальная толщина – 0,8 мм, а максимальная составила 4,4; 4,4; 3,7; 2,3; 2,0 для материалов Ф4К20, Ф4К15М5, Криолон-3, Флубон-20, Флувис-20 соответственно.

В процессе численного эксперимента была получена формула для определения радиальной толщины лепестка манжеты:

$$t = \frac{P \cdot L \cdot X}{E} \quad (7)$$

где P – давление нагнетания, Па; L – длина лепестка уплотнения, мм (см. рисунок 3); E – модуль упругости материала, Па; X – поправочный коэффициент, полученный в ходе численного моделирования, $X=46$.

В заключительной части данной главы была разработана инженерная методика по расчету износа цилиндропоршневых уплотнений.

В 3 главе представлены результаты и методики экспериментальных исследований.

На рисунке 4 представлен экспериментальный стенд для проведения статических продувок. На рисунке 5 представлена фотография манжетных уплотнений, подготовленных к испытаниям. Полученные результаты представлены на рисунках 6 и 7. По результатам проведенных экспериментов,

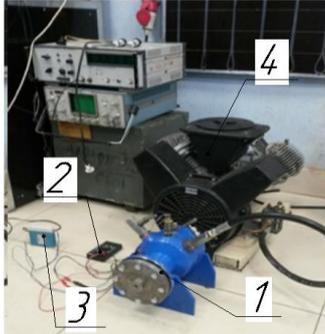


Рисунок 4 – Фотография экспериментального стенда: 1 – Рабочая камера с испытуемым поршнем, 2 – Мультиметр, 3 – Блок питания, 4 – Поршневой компрессор



Рисунок 5 – Манжетные уплотнения

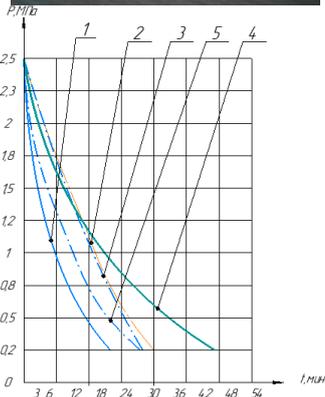


Рисунок 6 – Значения падения давления в зависимости от времени для манжетного уплотнения диаметром 20,2 мм: 1 – угол 100°, 2 – угол 105°, 3 – угол 110°, 4 – угол 115°, 5 – угол 120°

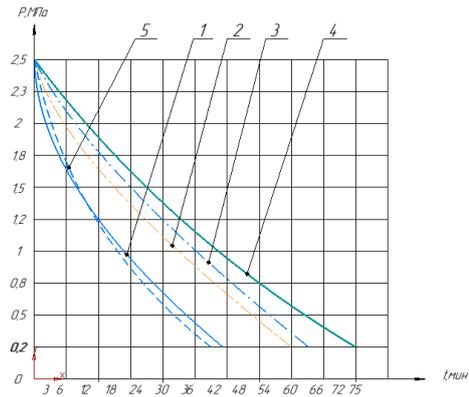


Рисунок 7 – Значения падения давления в зависимости от времени для манжетного уплотнения с углом раскрытия 115°: 1 – диаметр 20 мм; 2 – диаметр 20,2 мм; 3 – диаметр 20,4 мм; 4 – диаметр 20,8 мм; 5 – диаметр 21 мм

можно дать следующие рекомендации по проектированию манжетных цилиндропоршневых уплотнений: внешний диаметр уплотнения следует выбирать в диапазоне $D_v = ([0,015 \div 0,02] + 1)D_{ц}$, угол раскрытия следует выбирать равным - 115°.

Высоту уплотнения следует выбирать – 5,5 мм для диаметров цилиндра до 50 мм, и 11 мм для диаметров цилиндра от 50 до 80 мм. Проведено сопоставление экспериментальных данных и результатов математической модели, в части определения нагрузки (перепада давления) действующей на уплотнение. Для этого был разработан экспериментальный стенд, общий вид

которого представлен на рисунке 8. Погрешность полученных данных не превышает 10 %.



Рисунок 8 – Общий вид экспериментального стенда: 1 – рабочая камера, 2- блок наборного поршня, 3- мультиметры, 4- блок питания, 5- баллон со сжатым воздухом

Проведены экспериментальные исследования по влиянию количества манжетных уплотнений на величину эквивалентного зазора. Для этого был разработан экспериментальный стенд, общий вид которого представлен на рисунке 9. Проведенные экспериментальные исследования позволяют дать рекомендации по количеству манжетных уплотнений в зависимости от разности давлений и времени цикла.



Рисунок 9 – Общий вид экспериментального стенда:
1 – Гидроцилиндр, 2 – Рабочая камера, 3 – Датчик давления, 4 – Датчик температуры, 5 – Цифровой осциллограф

Проведены экспериментальные исследования по определению средней силы трения за цикл и мощности, затрачиваемой на преодоление данных сил трения. Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 10.

Используя полученные значения мгновенной силы трения, была рассчитана средняя сила трения и мощность за один цикл.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в манжетном цилиндропоршневом уплотнении, в первом приближении, можно принимать равной 10 % от индикаторной мощности ступени.

Механический КПД тихоходной ступени лежит в диапазоне 0,89-0,92, что соотносится с механическим КПД газомоторных компрессоров большой производительности имеющих общий с ДВС вал.

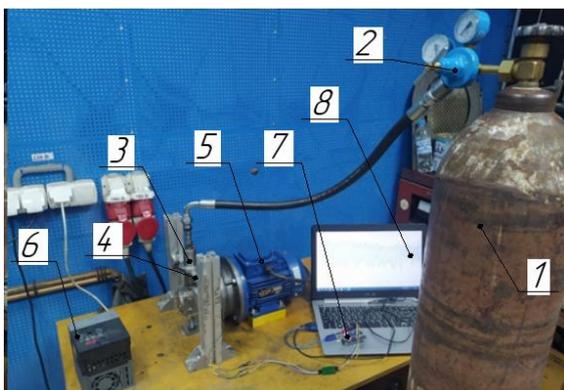


Рисунок 10 – Общий вид экспериментального стенда по определению сил трения:
 1 – Баллон со сжатым воздухом, 2 – Редуктор высокого давления, 3 – Испытуемый поршень, 4 – Тензодатчик, 5 – Электродвигатель, 6 – Частотный преобразователь, 7 – Arduino Uno, 8 – ПК

Полученные результаты мгновенной силы трения представлены на рисунке 11.

Общий вид экспериментального стенда тихоходной длинноходовой компрессорной ступени представлен на рисунке 12. Полученные результаты для времени цикла 2с и степени повышения давления представлены на рисунке 13.

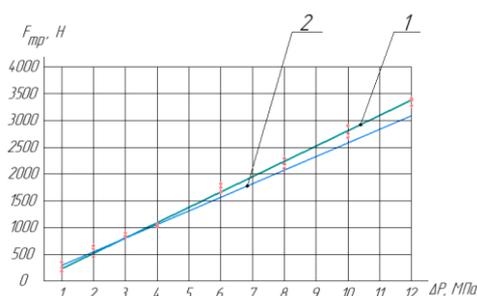
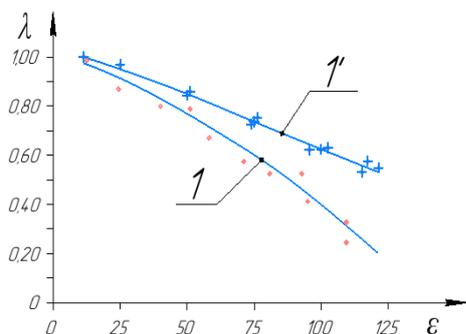


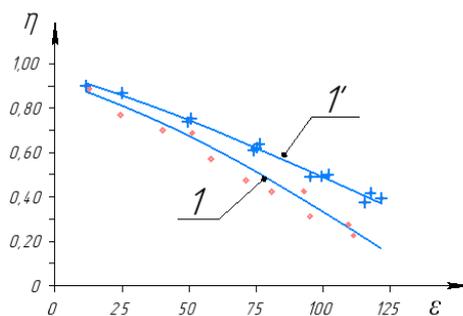
Рисунок 11 – Зависимость мгновенной силы трения от перепада давления:
 1 – Эксперимент, 2 – Теория



Рисунок 12 – Общий вид экспериментального стенда тихоходной длинноходовой КС



а



б

Рисунок 13 – Зависимость коэффициента подачи (а) и изотермического индикаторного КПД (б) от степени повышения давления:

1- коэффициент подачи и КПД [2,4]; 1'- коэффициент подачи и КПД с рекомендуемой геометрией манжетных уплотнений

Как видно из представленных на рисунке 13 кривых, при использовании рекомендованной конструкции манжетного уплотнения и их количества, удалось повысить коэффициент подачи до 15 %, а изотермический индикаторный КПД до 10 %.

В заключительной части данной главы были проведены экспериментальные исследования по определению радиального износа антифрикционных материалов, при этом наибольшей износостойкостью характеризуется материал «Флувис-20». Для материала Ф4К15М5 коэффициент трения лежит в диапазоне 0,12 – 0,15.

Общая погрешность датчика давления составляет 3,63 %, бусинкового термистора составляет 1,53 %, датчика расхода составляет 2 %, тензодатчика 0,08 %.

4 глава посвящена расчётно-параметрическому анализу рассматриваемого тихоходного длинноходового поршневого компрессора.

Был рассмотрен вопрос о применении контактных цилиндропоршневых уплотнений на среднем и высоком давлении. Одной из основных проблем является неравномерность нагрузок, действующих на уплотнения. Автором работы было предложено собственное решение для разгрузки первого уплотнения и перехода на квазистатический режим нагружения, позволяющее снизить нагрузку на первое уплотнение в два раза и обеспечить равномерное отношение давления на каждом уплотнении.

На рисунке 14 представлен общий вид комбинированного уплотнения

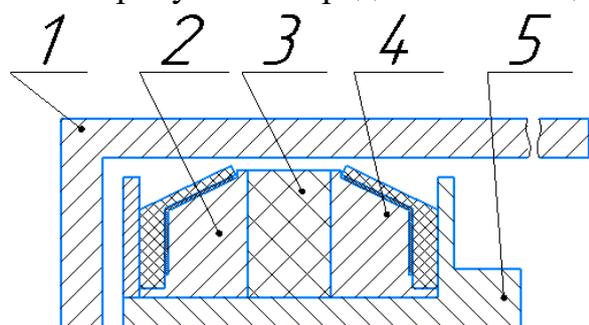


Рисунок 14 – Общий вид комбинированного уплотнения:

- 1 – цилиндр;
- 2– обратное манжетное уплотнение;
- 3– дроссельная втулка;
- 4 – манжетное уплотнение;
- 5– поршень

Дополнительно был рассмотрен вопрос об установке дополнительных уплотнений на поршень, при которых коэффициент подачи остается не менее 0,7. Максимальное количество уплотнений, которое можно дополнительно установить на поршень при $\varepsilon=70$ составит 7, 12 и 20 шт., для диаметров 20, 50 и 80 мм, соответственно. При установке дополнительных уплотнений на поршень необходимо сохранить заданный ход поршня для обеспечения заданной производительности, соответственно, становится необходимым увеличить длину ступени. Как показывают проведенные исследования относительная длина ступени увеличивается до 10 %, при этом, мощность трения увеличивается на 6 Н, на каждое дополнительно установленное уплотнение.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований позволяет повысить энергоэффективность тихоходного длинноходового поршневого компрессора путём применения нового наборного манжетного уплотнения.

Основные результаты проведённых исследований:

1. Разработана уточнённая модель расчёта рабочего процесса тихоходного длинноходового поршневого компрессора с новым наборным манжетным цилиндропоршневым уплотнением, позволяющая выполнять расчёты при изменении давления газа в рабочей камере в диапазоне от 0,1 МПа до 12,0 МПа, времени рабочего цикла $\tau = 2 \div 4$ с, величине хода поршня $S_{\text{п}} = 0,2 \div 0,8$ м; разработано программное обеспечение для её реализации.

Установлено, что при достижении эквивалентного зазора в цилиндропоршневом уплотнении свыше 5 мкм, ступень будет работать с нулевой производительностью при давлении нагнетания 10 МПа.

2. Разработана математическая модель расчета наборного манжетного цилиндропоршневого уплотнения, позволяющая определять распределение давления газа по длине уплотнения с учетом износа манжет. Получена зависимость приращения мертвого кольцевого объема в зависимости от количества изношенных манжетных уплотнений.

3. Разработана инженерная методика расчета толщины стенки манжеты для таких материалов как Ф4К20, Ф4К15М5, Криолон-3, Флубон-20, Флувис-20 и износа наборного цилиндропоршневого уплотнения.

4. Разработаны экспериментальные методики, созданы стенды для их реализации и выполнены экспериментальные исследования рабочих процессов тихоходного длинноходового компрессора, работы манжетных цилиндропоршневых уплотнений; проведены исследования по износу, определены коэффициенты трения исследуемых материалов.

5. Новая конструкция наборного манжетного цилиндропоршневого уплотнения позволяет повысить индикаторный изотермический КПД до 10 %, коэффициент подачи до 15 % тихоходного длинноходового компрессора, мощность, затрачивая на преодоление сил трения, составляет до 15 % от индикаторной мощности, а механический КПД компрессора изменяется в диапазоне $0,85 \div 0,90$.

6. Экспериментально установлено, что применение манжетного уплотнения с углом раскрытия 115° и диаметре $D_{\text{в}} = ([0,015 \div 0,02] + 1)D_{\text{ц}}$, позволяет достичь наибольшей герметичности рабочей камеры тихоходного длинноходового поршневого компрессора, при этом рекомендуемое количество уплотнений должно быть 7 шт. при давлении нагнетания 12 МПа.

7. Методика расчёта внедрена в учебный процесс ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», а разработанные рекомендации по проектированию – в АО «ГК «Титан».

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ

1. Кобыльский Р.Э., Юша В.Л., Неовенчаный А.В., Бусаров И.С., Титов Д.С., Бусаров С.С. Ресурс работы тихоходных длинноходовых ступеней компрессорных агрегатов и возможные пути его увеличения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т.3, № 1. С.42-49. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-42-49.

2. Кобыльский Р.Э., Юша В.Л., Бусаров С.С. Экспериментальная оценка эффективности манжетного уплотнения цилиндропоршневой группы длинноходовой ступени // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т.4, № 3. С.20-31. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-20-31.

3. Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С., Синицин Н.Г. Теоретическая оценка возможности уменьшения массовых утечек рабочей среды из камеры поршневого компрессора. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2022, № 2(141), с. 101-111. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-101-111>

4. Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С., Громов А.Ю. Методика расчета толщины стенки лепестка манжетного цилиндропоршневого уплотнения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т.7, № 1. С.26-31. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-26-31.

5. Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С. Экспериментальная методика определения эквивалентного зазора для цилиндропоршневого уплотнения тихоходной длинноходовой ступени в динамической постановке // Глобальная энергия. – 2023. – Т.29, №4. – С.37-49. DOI: 10.18721/JEST.29402.

6. Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С., Бакулин К.А. Перспективы создания современных поршневых компрессоров с повышенной производительностью // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т.8, № 1. С.25-31. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-25-31.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

7. Kobylsky R.E., Busarov. I.S., Busarov. S.S., Yusha V.L. Comparative evaluation of methods for calculating the dynamics of self-acting valves in reciprocating compressor units // Chemical and Petroleum Engineering.-2020.- Vol. 56, P. 644–652. DOI 10.1007/s10556-020-00824-6.

8. Kobylsky R.E., Tatevosyan A.A., Zamiralova T.A. Comparative analysis of the magnetoelectric drive with linear drives of low-speed single-stage piston units // AIP Conference Proceedings.2285, 030064 (2020) DOI: 10.1063/5.0027296.

9. Kobylsky R.E., Yusha V.L., Busarov. I.S., Busarov. S.S., Vinnikova T.A. Self-acting shut-off valve effect of motion law schematization on calculation quality of low-speed long-stroke air piston compressor units working process // AIP Conference Proceedings.2285, 030063 (2020) DOI: 10.1063/5.0027279.

10. Kobiylsky R.E., Aistov I.P., Vansovich K.A., Titov D.S., Busarov S.S. Theoretical evaluation of piston compressor seals effectiveness in low-speed piston compressor units based on the analysis of deformed state of the cylindrical part of the working chamber // AIP Conference Proceedings.2285, 030065 (2020) DOI: 10.1063/5.0027288.

11. Kobiylsky R.E., Aistov I.P., Vansovich K.A., Titov D.S., Busarov S.S. Influence of cooling jacket design parameters of low-speed compressor stage of long-stroke piston unit on the cylinder stress-strain state // AIP Conference Proceedings.2285, 030067 (2020) DOI: 10.1063/5.0027292.

12. Kobiylsky R.E., Aistov I.P., Vansovich K.A., Titov D.S., Busarov S.S., Goshly R. Yu., Vinnikova T.A. Experimental studies of deformed state of the working chamber cylindrical part of low speed long-stroke oil-free piston units // AIP Conference Proceedings.2285, 030067 (2020) DOI: 10.1063/5.0027292.

13. Kobiylsky R.E., Aistov I.P., Busarov S.S., Galkova A.A., Fedorova M.A., Kapelyuhovskaya A.A., Vinnikova T.A. Analysis of the effect of the piston displacement law on the operating processes characteristics of a single-stage ammonia compressor unit // AIP Conference Proceedings.2285, 030062 (2020) DOI: 10.1063/5.0029667.

14. Kobiylsky R.E., Tatevosyan A.A., Nedovenchanyi A.V., Busarov I.S., Gurov A.O., Busarov S.S. Experimental studies of the operating characteristics of the unit based on a low-speed piston stage with a linear magnetoelectric drive // AIP Conference Proceedings.2412, 030013 (2021) DOI: 10.1063/5.0076164.

15. Kobiylsky R.E., Busarov S.S. Predicting the service life of cylinder-piston seal of reciprocating compressors // Chemical and Petroleum Engineering.-2023.- Vol. 59 Nos. 3-4. P. 245–252. DOI 10.1007/s10556-023-01235-z.

Публикации в иных изданиях

16. Кобыльский Р.Э. Применение комбинированного уплотнения для снижения нагрузки, действующей на цилиндропоршневое уплотнение // Вестник БГТУ им. Шухова, № 7, 2022. С.117-125. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-117-125.

17. Kobiylsky R.E., Yusha V.L., Busarov I.S., Busarov S.S. Problems equilibration of aggregates on the basis of slow moving stages // AIP Conference Proceedings.1260, 062026 (2019) DOI: 10.1088/1742-6596/1260/6/062026.

18. Кобыльский Р.Э., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Сеницин Н.Г., Муслова Л.А. Верификация нагрузки действующей на манжетное цилиндропоршневое уплотнение, работающее без смазки // Известия тульского государственного университета. Технические науки, Выпуск 10, 2021. – С. 658-667.

Патенты и свидетельства

19. Кобыльский Р.Э. Цилиндропоршневое уплотнение: пат. 2781089 Рос. Федерация: МПК F16J 15/32, F16J 9/06. Р.Э. Кобыльский, С.С. Бусаров – 2022. – Бюл. № 28.

Подписано в печать 07.07.2025. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,25.
Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 293.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 8(3812)23-02-12.
Эл. почта: publisher@omgtu.ru