

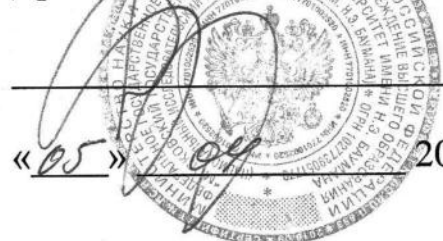
УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
цифровому развитию

МГТУ им. Н.Э. Баумана

д.э.н., профессор

Дроговоз Павел Анатольевич



« 05 »

2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва на диссертационную работу Бусарова Сергея Сергеевича «Создание и совершенствование бессмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника гидро- и пневмосистемы.

Актуальность темы диссертационной работы

Уровень требований по ресурсным характеристикам, предъявляемый к перспективной технике, недостижим для выпускаемого в настоящее время компрессорного оборудования при этом энергетические и технологические показатели должны иметь уровень значений не меньше, чем у передовых конструкций. Современные компрессоры, обеспечивающие давление нагнетания 1-15 МПа позволяют проработать в автономных условиях не более 10 тыс. ч., тогда как во многих случаях автономной эксплуатации компрессорного оборудования, например, в системах жизнеобеспечения космических объектов, на технологических и транспортных средствах морского базирования, требуемый ресурс может существенно превышать 30 000 часов, а в отдельных случаях – 80 000 часов. Такие показатели ресурса в настоящее время не удаётся обеспечить по причине отказов основных функциональных элементов компрессорных ступеней – клапанов, уплотнений цилиндропоршневой группы и сальников штока. При этом требования к энергоэффективности постоянно возрастают и в настоящее время для рассматриваемых малорасходных компрессоров среднего и высокого давления величина индикаторного изотермического КПД достигает 0,8, а величина коэффициента подачи – 0,85. Кроме этого, безусловными критериями конкурентоспособности ком-

прессорного оборудования остаются его себестоимость, технологичность, импортонезависимость.

Анализ зарубежного и отечественного уровня развития бессмазочных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления показывает, что существующие конструктивные схемы компрессорных ступеней, конструкции клапанов и уплотнений, рекомендации по определению основных конструктивных и режимных параметров ступеней исчерпали возможность дальнейшего повышения ресурса, что требует принципиально нового подхода к решению проблемы увеличения ресурса компрессорного оборудования.

Учитывая вышесказанное, актуальность данной работы заключается в отсутствии научно-технологического задела для создания малорасходных бессмазочных компрессоров среднего и высокого давления, существенно превосходящих разработанные в настоящее время аналоги по ресурсным характеристикам и имеющих сравнимые с ними энергетические, массогабаритные и технологические показатели. Разработка новой технологии позволит решить проблему длительной автономной эксплуатации компрессорного оборудования на транспортных и стационарных объектах наземного, морского и космического базирования в широком диапазоне температур окружающей среды; обеспечит технологическую импортонезависимость и приоритет РФ в рассматриваемой области компрессорной техники.

Объектом диссертационного исследования являются поршневые бессмазочные тихоходные длинноходовые компрессоры с повышенным отношением давления нагнетания к давлению всасывания и интенсивным внешним охлаждением.

Предмет исследования - взаимосвязь рабочих процессов основных функциональных элементов, конструктивных и режимных параметров поршневых бессмазочных тихоходных длинноходовых компрессоров и их влияние на её ресурс, технологичность и удельные характеристики.

За рубежом созданием поршневых компрессоров с отсутствием смазки цилиндрической части рабочей камеры активно начали заниматься с начала 30-х годов 20 века. В СССР головным разработчиком компрессоров без смазки постановлением правительства №464 от 14.05.1964 г. был определен Ленинский химмаш, в котором была создана специализированная лаборатория "Компрессоры без смазки". За период работы данного предприятия разработаны многие применяемые в современных машинах антифрикционные материалы, позволяющие обеспечить ресурс работы в 4000...8000 часов. Разработкой бессмазочных поршневых уплотнений, внедрением конструкций и методов их расчёта в нашей стране в различные годы занимались такие учё-

ные как А.В. Захаренко, И.И. Новиков, В.П. Захаренко, Ю.К. Машков, Болштянский А.П.; за рубежом - Ward I.R., Walty F.D., Gene Gilbert, Na Miao, Yinshui Liu и многие другие. Производством бесшмазочных поршневых уплотнений и компрессоров на их базе успешно занимаются ООО «Джон Крейн – Искра»; Asseal; ЭЛКОНТ, ЭКОНОМОС, АО НТК Криогенная техника, ООО "Фирма "ЦИН", Parker, Merkel, Seal-Jet, Shamban, Kaydon, GGB, Kamatics, CPI и др. Важнейшими конструктивными элементами, определяющими ресурс и энергетическую эффективность компрессорной ступени, являются самодействующие клапаны. Проблемами повышения ресурсных и газодинамических характеристик клапанов занимались такие авторы, как Н.А. Доллежалъ, Т.Ф. Кондратьева, М.И. Френкель, С.Е. Захаренко, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий, Б.С. Фотин, А.И. Голубев, П.И. Пластинин, Б.С. Хрусталева, В.Л. Юша, Б.И. Игнатов, В.П. Исаков, Б.А. Спектор, З. Гюнтер, А. Лев, К. Миллуорд, J. Maelaren, N. Stosic, R. Dusil и др. В настоящее время наиболее известными разработчиками клапанов являются такие фирмы, как ИЛКОМ, AGV Compressor Solution, KENTEK Finland, Hoerbiger и др. Уровень ресурса современных самодействующих клапанов достигает 25000 часов. В настоящее время широкую известность и распространение получили многоступенчатые поршневые компрессоры среднего и высокого давления таких фирм как Челябинский компрессорный завод, Краснодарский компрессорный завод, АО "Компрессорный завод БОРЕЦ"; зарубежных фирм ABAC Group, Remeza, Atlas Copco, Hitachi, HYUNDAI, Дрессер-Рэнд. Гарантированный ресурс непрерывной работы представленных компрессоров составляет 6000...12000 часов.

При решении задачи повышения ресурса и автономности компрессорного оборудования безусловно должна быть обеспечена его высокая энергоэффективность: для современных компрессоров рассматриваемого типа индикаторный изотермический КПД может достигать 0,8, полный изотермический КПД – 0,75. Удельные параметры малорасходных поршневых компрессоров ведущих производителей имеют следующие значения: удельная мощность - в пределах 5...12 кВт/(м³/мин); удельная металлоёмкость 100...150 кг/(м³/мин). Вопросам повышения энергоэффективности компрессорного оборудования уделялось пристальное внимание в исследованиях таких учёных как Френкель М.И., Фотин Б.С., Пластинин П.И., Прилуцкий И.К., Хрусталева Б.С., Кабаков А.Н., Щерба В.Е., Парфёнов В.П., Юша В.Л., Walty F.D., W. G. Cochran, Vetter, H., Khamankar S. D., MacLaren, John F., Luszczyski, M., Hafner, J., Gaspersic, B. и др.

Таким образом, несмотря на имеющийся научно-технологический за-

дел в отечественном и зарубежном компрессоростроении, в настоящее время отсутствуют технологии, обеспечивающие создание бессмазочных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления для длительной автономной эксплуатации с повышенным ресурсом работы, высоким уровнем энергоэффективности и технологичности. Это требует создания принципиально нового компрессорного оборудования на основе комплексной взаимной адаптации современных достижений в области конструирования и расчёта поршневых компрессоров, технологии машиностроения и материаловедения, трибологии и теплотехники с учётом все возрастающих требований к отечественному машиностроению.

Основные научные результаты и их значимость для науки и производства.

1. Впервые теоретически и экспериментально обоснована возможность повышения давления газа в одной бессмазочной поршневой компрессорной ступени от 0,1 МПа до 12,0 МПа при температурах нагнетания, не превышающих 430 К.
2. Впервые теоретически обоснована возможность обеспечения непрерывной работы бессмазочного поршневого компрессора среднего и высокого давления в течение 100000 часов и более.
3. Разработаны новые математические модели рабочих процессов интенсивно охлаждаемых бессмазочных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров с циклически деформируемыми стенками цилиндра, а также модели функционирования самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений с эластомерными конструктивными элементами.
4. Разработана новая обобщённая модель рабочих процессов интенсивно охлаждаемых бессмазочных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров, учитывающая особенности функционирования системы охлаждения ступени, самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений с эластомерными конструктивными элементами, а также возможность циклической деформации стенок цилиндра при соотношении $S/D > 10$, времени рабочего цикла от 2 до 4 с, давлении нагнетания до 12 МПа (при атмосферном давлении всасывания).
5. Впервые получены результаты исследования рабочих процессов бессмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления при

рабочей камере и составляющих коэффициента подачи с учетом особенностей функционирования клапанов и цилиндропоршневых уплотнений с эластомерными конструктивными элементами.

6. Теоретически и экспериментально доказано перераспределение значимости отдельных конструктивных и режимных факторов, по сравнению с существующими быстроходными поршневыми компрессорами, оказывающих определяющее влияние на эффективность рабочих процессов.

7. Теоретически и экспериментально установлена взаимосвязь между конструкцией компрессора и его элементов, режимными параметрами и свойствами рабочего газа, а также определено их влияния на интегральные характеристики компрессора; определены рабочие диапазоны основных размеров и параметров компрессора.

8. Получены результаты исследования влияния циклической деформации стенок цилиндра и эластомерных конструктивных элементов самотействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений на основные показатели эффективности бесшмазочных тихоходных длинноходовых компрессоров и определены принципы конструирования их систем охлаждения, уплотнения и газораспределения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Значение результатов для теории.

1. Разработана и экспериментально подтверждена обобщенная модель расчета рабочего процесса поршневого бесшмазочного тихоходного длинноходового компрессора на базе новой методики расчета коэффициента теплоотдачи в рабочей камере, с учетом нестационарной теплопередачи через стенки цилиндра и особенностей функционирования самотействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений с эластомерными конструктивными элементами.

2. Теоретически обоснованы: возможность повышения давления газа в одной бесшмазочной поршневой компрессорной ступени от 0,1 МПа до 12,0 МПа при допустимых температурах нагнетания и возможность обеспечения непрерывной работы бесшмазочного поршневого компрессора среднего и высокого давления в течение 100000 часов и более; получили развитие методики расчета коэффициента теплоотдачи в рабочей камере и расхода рабочего газа через неплотности в клапанах и цилиндропоршневых уплотнениях.

3. Теоретически и практически доказано перераспределение значимости отдельных конструктивных и режимных факторов на работу тихоходного длинноходового поршневого компрессора по сравнению с аналогичными быстроходными.

4. Теоретически установлено и подтверждено влияние особенностей конструкции самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений, а также влияние радиальных деформаций цилиндра и эластомерных конструктивных элементов самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений на основные показатели эффективности бессмазочных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров.

5. Применительно к исследуемому объекту усовершенствована методика расчёта производительности поршневого компрессора, базирующаяся на принципах схематизации, разделения и независимости факторов, определяющих потери производительности.

Значение результатов для практики.

1. Разработаны и апробированы методики экспериментального исследования упруго-деформируемого состояния цилиндра тихоходного длинноходового компрессора при его циклическом нагружении давлением рабочего газа, работы цилиндропоршневых уплотнений, работы клапана с эластомерным элементом и переменной величиной периметра герметизации в седле, пульсаций давления газа в коммуникация тихоходного длинноходового компрессора, многоступенчатого сжатия в компрессорах на базе тихоходных поршневых ступеней, рабочих процессов тихоходного длинноходового компрессора и изготовлены экспериментальные стенды для их реализации.

2. Создано программное обеспечение для расчёта: рабочих процессов и интегральных характеристик длинноходового поршневого компрессора с самодействующим клапаном, содержащим эластомерные элементы, а также для определения оптимальных параметров поршневого тихоходного компрессора при изменяющемся наборе критериев.

3. Разработаны рекомендации по конструированию компрессора, обеспечивающие существенное повышение ресурса, в том числе в условиях автономной эксплуатации (до 100 000 часов и более), высокий уровень унификации (коэффициент применяемости не менее 0,98, коэффициент повторяемости более 15) и энергоэффективности (индикаторный КПД не менее 0,7 (0,95 *при сравнении с одноступенчатыми быстроходными компрессорами*), коэффициент подачи не менее 0,7), снижение металлоемкости (в 5...10 раз по сравнению с мембранными и на 10...15% по сравнению с многоступенчатыми поршневыми компрессорами).

4. Выполнено обоснование необходимости и целесообразности совершенствования и промышленного освоения бессмазочных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления на базе поршневых тихоходных

длинноходовых ступеней в целях обеспечения технологической импортонезависимости РФ в рассматриваемой области техники.

5. Работа выполнена в рамках госбюджетной ПНИЭР «Создание перспективных одноступенчатых компрессорных агрегатов высокого и среднего давления с повышенным ресурсом работы для систем жизнеобеспечения автономных подводных объектов» (соглашение № 14.577.21.0203).

Разработанная методика расчёта внедрена в учебный процесс ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», а разработанные рекомендации по проектированию и эксплуатации – в АО «Научно-технический комплекс «Криогенная техника» (г. Омск), АО «Компрессор» (г. Санкт - Петербург), АО «Газпромнефть – ОНПЗ» и АО «Омский каучук» (г. Омск).

Личный вклад автора

Автором сформулирована научная проблема, цель и задачи диссертационного исследования, выполнен анализ полученных результатов и разработаны рекомендации по повышению характеристик малорасходных бесшмазочных компрессоров среднего и высокого давления на базе тихоходных длинноходовых поршневых ступеней, разработана инженерная методика расчёта производительности и динамики таких ступеней. Под руководством и с участием автора разработаны запатентованные конструкции компрессорной ступени с повышенным ресурсом и повышенным отношением давления нагнетания к давлению всасывания, а также конструкции функциональных элементов такой ступени; выполнены теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов бесшмазочных тихоходных длинноходовых поршневых ступеней и их отдельных функциональных элементов, в том числе при циклически деформируемом состоянии цилиндрической части рабочей камеры, эластомерных элементов клапанов и цилиндропоршневого уплотнения, сформулированы задачи по совершенствованию и промышленному освоению бесшмазочных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления на базе поршневых тихоходных длинноходовых ступеней.

Достоверность результатов обеспечивается применением стандартных методов экспериментальных исследований на базе современного оборудования, прошедшего метрологическую поверку; апробацией результатов; воспроизводимостью результатов экспериментов и статистической обработкой полученных данных, удовлетворительным совпадением экспериментальных и теоретических результатов; использованием сертифицированных программных комплексов и компьютерного оборудования.

Апробация работы

VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты» (г. Кемерово, 2016 г.); VI–XII научно-технических конференциях «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства («Oil and Gas Engineering»))» (г. Омск, 2012–2023 г.г.); X Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2016 г.); XVII, XVIII Международных научно-технических конференциях по компрессоростроению «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты» (г. Казань, 2017, 2019 гг.), III Международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения» (г. Омск, 2019 г.), VI Региональной научно-технической конференции «Ученые Омска – региону» (г. Омск, 2021 г.), Всероссийской научно-технической молодежной конференции посвященной 100-летию кафедры Холодильных и компрессорных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана 2020 г; 12th International Conference on Compressors and their Systems City, University of London, 2021.

Публикации

По теме диссертации опубликовано более 140 научных печатных работ, из них 37 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 40 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science; получены 13 патентов на полезную модель, 6 патентов на изобретение и 3 программы для ЭВМ.

Замечания по диссертации:

1. На рис. 4.20 стр. 107 диссертации представлена принципиальная схема моделирования второй ступени сжатия, однако не все позиции элементов схемы присутствуют в текстовом описании;
2. В математической модели для расчётов массовых потоков через клапаны и неплотности применена формула для несжимаемой жидкости, хотя исследуемые рабочие процессы протекают при давлениях более 10 МПа.
3. Нет пояснений автора по вопросу определения экспериментального значения индикаторного изотермического кпд.
4. На стр. 124, 125 представлены графики с неизвестными обозначениями - «АД» и «ИЗ».

5. В п.5.2 представлено исследование законов движения выходного звена, необходимо объяснить, как был или может быть реализован рациональный закон с гидравлическим приводом.

6. На стр. 142 для определения режимов работы и конструктивных параметров компрессора использованы критерии по температуре, коэффициенту подачи, индикаторному изотермическому КПД, не ясно как были определены значения данных критериев.

7. На стр. 153 представлены зависимости напряжений и деформаций. Нет пояснений относительно переменного характера указанных величин вблизи координаты 500 мм.

8. В п. 7.1.1 рассмотрен ресурс манжетного уплотнения. Расчёт ресурса основан на определении времени, требуемого для истирания манжеты. Нет данных, по которым определены толщины манжеты – минимальная и максимальная.

9. Параграф 8 начинается с указания факта, что относительный мёртвый объём в рассматриваемом компрессоре составляет десятые доли %. Как была определена данная величина – по расчётной модели или экспериментально?

Соответствие диссертации требованиям:

Представленная докторская диссертация Бусарова Сергея Сергеевича на тему “Создание и совершенствование бессмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней” направлена на решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение – обеспечение длительной автономной эксплуатации компрессорного оборудования. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, законченным исследованием, выполненным на высоком уровне. Представленные методики расчёта и рекомендации по проектированию тихоходных компрессоров внедрены на ведущих предприятиях компрессорной отрасли. Созданный компрессор существенно превосходит разработанные в настоящее время аналоги по ресурсным характеристикам и имеет сравнимые с ними энергетические, массогабаритные и технологические показатели благодаря новым принципам конструирования систем охлаждения, уплотнения и газораспределения.

Работа соответствует требованиям п. 9 “Положения о присуждении ученых степеней”, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Диссертация Бусарова С.С. соответствует научной специальности 2.5.10 Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

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

Тема работы полностью соответствует п. 1, 2, 3 и 4 паспорта специальности 2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Диссертация Бусарова Сергея Сергеевича удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 - Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы.

Диссертация обсуждена и отзыв на диссертацию утвержден на заседании кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (протокол № 12 от «24» января 2024 г.).

Заведующий кафедрой «Вакуумная
и компрессорная техника»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана
д.т.н., профессор



Чернышев
Андрей
Владимирович

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с.1
www.bmstu.ru
тел.: +7 (499) 263 63 91
e-mail: bauman@bmstu.ru

Вход. № 25-4989
«23» 04 2024 г.
подпись 