

## **Отзыв официального оппонента**

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».

### **1. Актуальность 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. 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 импортнезависимость и приоритет РФ в рассматриваемой области компрессорной техники.

### **2. Структура и содержание работы**

Диссертационная работа Бусарова С.С. выполнена на кафедре «Холодильная и компрессорная техника и технология» ФГАОУ ВО Омского государственного технического университета.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и списка использованных источников. Содержит 325 страниц текста, 238 рисунков и 42 таблицы. Список использованных источников, составляет 298 наименований.

Во введении обосновано актуальность диссертационного исследования, сформулированы научные проблемы, научная новизна и практическая значимость, представлено краткое содержание диссертации.

В первой главе выполнен обзорный анализ существующих компрессорных технологий для сжатия газов до средних и высоких давлений, а также конструктивных решений для их реализации. Охарактеризовано общее состояние научно-технических разработок в компрессорной технике, теоретические и экспериментальные методы исследования рабочих процессов и функционирования основных элементов поршневых компрессоров. По результатам проведенного аналитического обзора сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены модели основных рабочих элементов тихоходных длинноходовых компрессоров, модель функционирования самодействующих клапанов с эластомерными элементами, а также модель расчета радиальных деформаций стенок цилиндра.

В третьей главе представлена обобщенная модель расчета рабочего процесса ТДК с упругодеформируемым цилиндром, самодействующими клапанами и поршневыми уплотнениями, содержащими эластомерные деформируемые элементы с использованием уточненной математической модели рабочего процесса ТДК.

В четвертой главе представлены методики экспериментальных исследований и стенды для их реализации, разработанные под руководством автора работы, а также полученные результаты экспериментальных исследований рабочих процессов с учетом деформированного состояния клапанов и изменяющегося зазора в цилиндропоршневом уплотнении.

В пятой главе выполнен анализ основных направлений повышения энергетических характеристик, рассматриваемых малорасходных

В шестой главе рассмотрены вопросы повышения технологичности ТДК, а также доказана возможность использования трубопроводов для эффективного охлаждения компримируемой среды.

В седьмой главе представлены результаты исследований отдельных узлов ТДК и компрессора в целом на обеспечение ресурса не менее 100 тысяч часов.

В восьмой главе представлена уточненная методика расчета производительности ТДК, основанная на известных принципах схематизации и разделения потерь. Настоящая методика нашла применение на целом ряде профильных предприятий.

В девятой главе выполнена оценка перспективных направлений развития компрессорной техники на базе ТДК, рассмотрены технологические особенности выполнения отдельных элементов и дальнейшее повышение технического уровня исследуемых конструкций.

В заключении изложены основные выводы по работе.

### 3. Научная новизна работы

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 100 000 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  $S/D > 10$ , времени рабочего цикла от 2 до 4 с, давлении нагнетания до 12 МПа (при атмосферном давлении всасывания) и интенсивном охлаждении стенок цилиндра; получены зависимости для расчёта коэффициента теплоотдачи в 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 самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений на основные показатели эффективности бессмазочных тихоходных длинноходовых компрессоров и определены принципы конструирования их систем охлаждения, уплотнения и газораспределения.

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования

#### Практическая ценность

Разработаны и апробированы методики экспериментального исследования упруго-деформируемого состояния цилиндра КС при его циклическом нагружении давлением рабочего газа, работы цилиндропоршневых уплотнений с дроссельной втулкой, работы клапана с эластомерным элементом и переменной величиной периметра герметизации в седле, пульсаций давления газа в коммуникация тихоходной поршневой ступени, многоступенчатого сжатия в компрессорах на базе тихоходных поршневых ступеней, рабочих



процессов тихоходной ступени и изготовлены экспериментальные стенды для их реализации.

Предложено программное обеспечение для расчёта: рабочих процессов и интегральных характеристик длинноходовой поршневой компрессорной ступени с упруго-деформируемым цилиндром, самодействующим клапаном с эластомерным элементом; поршневым уплотнением, имеющим дроссельную втулку, а также для определения оптимальных параметров поршневой тихоходной ступени при изменяющемся наборе критериев.

Разработаны рекомендации по конструированию компрессорной ступени, 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).

Выполнено обоснование необходимости и целесообразности совершенствования и промышленного освоения бесшумных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления на базе поршневых тихоходных длинноходовых ступеней в целях обеспечения технологической импортнезависимости РФ в рассматриваемой области техники.

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).

#### Теоретическая значимость.

Разработана и экспериментально подтверждена обобщённая модель расчёта рабочего процесса поршневого бесшумного тихоходного длинноходового компрессора на базе новой методики расчёта

коэффициента теплоотдачи в рабочей камере, с учётом нестационарной теплопередачи через стенки цилиндра и особенностей функционирования самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений с эластомерными конструктивными элементами, а также при циклической деформации стенок цилиндра.

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

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

Теоретически установлено влияние особенностей конструкции самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений, а также влияние циклической деформации стенок цилиндра и эластомерных конструктивных элементов самодействующих клапанов и цилиндропоршневых уплотнений на основные показатели эффективности бессмазочных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров.

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

## 5. Личный вклад автора

Автором сформулирована научная проблема, цель и задачи диссертационного исследования, выполнен анализ полученных результатов и разработаны рекомендации по повышению характеристик малорасходных бессмазочных 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 бесшумных 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 бесшумных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления на базе поршневых тихоходных длинноходовых ступеней.

#### 6. 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

1. Понятие тихоходного длинноходового компрессора – необходимо пояснить с указанием параметров работы компрессоров, отнесённых к данному типу.

2. Необходимо чётко пояснить почему в данной работе для моделирования рабочего процесса компрессора не применена модель 3го уровня?

3. На стр. 11 пункт 2. указан моторесурс 100 тысяч часов, но не ясно при каком числе рабочих циклов он достигается?

4. Модель цилиндропоршневого уплотнения представленная в п. 2.2 не пояснена расчётными уравнениями.

5. К рисунку 3.1 нет пояснений о моделировании каких процессов идёт речь?

6. На стр.60 представлена методика определения протечек через щели, однако она не учитывает составляющую от подвижности стенок щелей?

7. В расчёте теплового баланса стр. 77-79 не использовано уравнение Ньютона – Рихмана?

8. Как определялись степенные коэффициенты в формуле коэффициента теплоотдачи стр. 79?

9. На стр. 14 пункт 3. фраза «при приемлемых значениях температур нагнетания» носит не определенность. Следует указать конкретные значения.

10. На ряде графиков (стр. 134-135) не указана размерность.

## 7. Заключение

Диссертация соответствует специальности 2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы в части п.п.1-4.

Диссертационная работа Бусарова Сергея Сергеевича соответствует требованиям, установленным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней». В диссертационной работе отсутствуют заимствования материалов без ссылки на автора и (или) источник заимствования, а также результатов работы в соавторстве без ссылок на авторов.

Диссертация Бусарова Сергея Сергеевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит



значительный вклад в развитие машиностроительной отрасли РФ; решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение - создание и совершенствование бесшмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней, позволившая создать компрессоры с длительной автономной эксплуатацией, отвечающих современным требованиям.

Тема и содержание диссертации Бусарова Сергея Сергеевича "Создание и совершенствование бесшмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней" полностью соответствует специальности 2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы. А её автор Бусаров Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.10 - Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро - и пневмосистемы.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Пронин Владимир Александрович

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит А  
Контактный телефон: +7 (921) 938-35-75 . Адрес электронной почты: varpronin@itmo.ru

Подпись Пронина В.А. заверяю:

Подпись *Пронина*  
удостоверяю  
Менеджер ОПС *Байцова В.А.*

08.04.



Вход. № *05-7988*  
« *23* » *04* 20*14* г.  
подпись *[Signature]*