



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080  
office@spbstu.ru

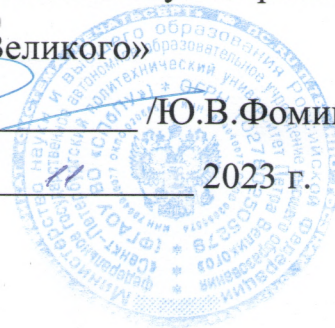
03.11.2023 № 02-21-4-242  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого»

 /Ю.В.Фомин/

«03» 11 2023 г.



**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу

**Худякова Владислава Сергеевича**

«Оценка работоспособности подшипников скольжения турбокомпрессоров  
применением комплексной методики расчета динамики гибкого ротора с  
учетом процессов теплообмена», представленную на соискание учёной  
степени кандидата технических наук по специальности

2.5.2 – Машиноведение

**Актуальность темы исследования**

Повышение работоспособности машин и механизмов всегда является актуальной задачей для машиностроения. Технической проблемой, решению которой посвящена рассматриваемая диссертационная работа, является оценка работоспособности подшипников скольжения турбокомпрессора.

Оценка работоспособности подшипников скольжения и прогнозирование их гидромеханических характеристик на этапе проектирования узлов и агрегатов имеют важное практическое значение. Подобные исследования повышают уровень первичной оценки надежности и энергоэффективности машины, а также позволяют точнее планировать техническое обслуживание и

004048

жизненный ресурс критически важных узлов. Последнее, в свою очередь, позволяет оптимизировать распределение временных и финансовых ресурсов.

Условия эксплуатации современных турбокомпрессоров требуют учитывать тепловые эффекты при численном моделировании работы соответствующих трибосопряжений. В то же время, одновременное описание процессов теплообмена и гидродинамики в подшипниках скольжения является достаточно трудной задачей с вычислительной точки зрения. Исследования, ранее проводившиеся в обозначенной области, носят локальный характер и не позволяют провести комплексный анализ работы подшипников скольжения турбокомпрессора.

Таким образом, можно сделать вывод, что диссертационная работа направлена на решение задачи, которая несомненно является актуальной.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Впервые разработана комплексная методика и алгоритм, учитывающие процессы теплообмена в корпусе подшипников ТКР 100 и динамику гибкого ротора турбокомпрессора. Методика позволяет учитывать влияние процессов теплообмена и тепलोдеформированного состояния элементов ротора на гидромеханические характеристики и работоспособность подшипников скольжения.

2. Определено влияние нагрузочно-скоростных режимов работы турбокомпрессора серии ТКР 100 на характер изменения температур в корпусе подшипников турбокомпрессора. Полученные зависимости позволяют учитывать неравномерность распределения температуры в подшипниках на каждом режиме эксплуатации турбокомпрессора.

3. Проведена оценка влияния неравномерного распределения температуры на гидромеханические характеристики трибосопряжений и динамику ротора турбокомпрессора.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии расчёта процессов, наблюдаемых в подшипниках скольжения

турбокомпрессора. Разработанные в диссертации теоретические положения позволяют получить более полные оценки для резервов работоспособности подшипников скольжения турбокомпрессоров, учитывающие влияние тепловых эффектов.

Результаты работы также имеют практическое значение. В ходе исследования была выполнена разработка специализированного программного обеспечения (ПО), что вносит вклад в развитие прикладных инструментов проектирования подшипников скольжения.

Таким образом, полученные в работе результаты значимы для развития научной специальности 2.5.2 – «Машиноведение», поскольку они вносят вклад в разработку теорий, методов расчетов и проектирования машин, систем приводов, узлов и деталей машин.

#### **Личный вклад автора**

Основные научные результаты диссертации опубликованы в российских (3 статьи в журналах из перечня ВАК) и зарубежных (5 статей в журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science) рецензируемых научных изданиях, при участии автора разработано 4 программных комплекса, на которые получены свидетельства о регистрации. Во всех представленных публикациях отмечается авторский вклад. На основании этих сведений, а также на основании анализа содержания публикаций, можно утверждать, что научная новизна диссертационной работы и все выносимые на защиту положения отражают личный вклад соискателя в проведенные научные исследования.

#### **Общая характеристика, структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего в себя 119 наименований, трех приложений. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 69 иллюстраций и 19 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены цель и задачи работы, рассмотрены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, апробация результатов диссертации.

В первой главе исследуется вопрос, связанный с актуальностью применения турбокомпрессоров в современной промышленности. Отмечается, что элементы турбокомпрессора подвергаются серьезным механическим и тепловым нагрузкам, что влияет на работу его опорных узлов, в частности, подшипников скольжения. Особое внимание уделяется учету изменения температуры в корпусе подшипников турбокомпрессора, что влияет на эксплуатационные характеристики подшипников. Показано, что многие исследователи используют численные программные комплексы, чтобы учитывать изменение теплового состояния при сложной геометрии корпуса, но при этом привлекают ряд допущений. В результате проведенного анализа были сформулированы цель и задачи научных исследований.

Во второй главе проводится обзор и сравнение основных численных методов, используемых в настоящее время для моделирования различных физических процессов. Рассматриваются метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод конечных объемов. Отмечаются достоинства и недостатки каждого из методов, важные для практического применения. Далее подробно описывается алгоритм моделирования процессов в подшипниках скольжения турбокомпрессора, состоящий из 5 этапов. Каждый этап предполагает решение начально-краевой задачи, описывающей определенные механические эффекты (напр., теплопередачу в корпусе подшипников). Часть этапов реализуется в коммерческом программном обеспечении (напр., ANSYS Mechanical), а другая часть – с помощью программного обеспечения, в разработке которого лично принимал участие автор исследования. Таким образом, в главе была сформулирована комплексная методика расчета динамики гибкого ротора, учитывающая процессы теплообмена и тепलोдеформированное состояние элементов турбокомпрессора.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования процессов теплообмена в корпусе подшипников турбокомпрессора. В ходе моделирования были определены тепловые поля в корпусе турбокомпрессора, а также локальная температура в зазорах. Данные получены для двух

конструкций турбокомпрессора на разных режимах эксплуатации. Полученные результаты свидетельствуют о нелинейности и неравномерности тепловой нагруженности подшипников. Отмечается хорошее согласие полученных результатов с данными других авторов.

В четвертой главе представлены результаты моделирования динамики асимметричного гибкого ротора турбокомпрессора, полученные с использованием разработанной методики. Результаты демонстрируют сильное влияние температуры и тепलोдеформированного состояния элементов трибосопряжения на его гидромеханические характеристики и работоспособность. На основании полученных результатов делается вывод о необходимости учета процессов теплообмена на стадии проектирования турбокомпрессора.

В заключении подводятся итог исследования и делаются общие выводы по диссертационной работе.

**Материалы автореферата полностью отвечают содержанию диссертации.** Диссертация и автореферат написаны ясным, грамотным научным языком.

#### **Соответствие работы паспортам научных специальностей**

Содержание диссертационной работы соответствует направлению исследований паспорта научной специальности 2.5.2 – Машиноведение в части следующих пунктов: п. 4. Повышение точности и достоверности расчетов объектов машиностроения...; п. 5. Методы исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения...

#### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

Отмечая высокое качество текста диссертации, в ходе изучения диссертационной работы возникли следующие замечания и вопросы:

1. Во второй главе при описании численных методов и математических моделей встречаются некоторые неточности. Например, на стр. 46 – 47 используется не совсем ясная фраза: «функции ... не могут легко выполняться

из более высокого порядка точности». Или на стр. 53: « $S_m$  представляет собой массу, добавленную в сплошную фазу из диспергированной второй фазы».

2. Из текста диссертации неясно, как организовано взаимодействие между этапами алгоритма «Расчет динамики ротора и подшипников» и «Моделирование тепловых деформаций ротора и подшипников» (рис. 2.7). На упомянутом рисунке эти этапы соединены двумя стрелками, в отличие от остальных этапов. Означает ли это, что взаимодействие данных этапов является двусторонним? Если да, то как оно организовано?

3. Проводилось ли сравнение предложенного в диссертации подхода к вычислению коэффициентов жесткости и демпфирования трибосопряжений с другими подходами?

4. Из текста диссертации неясно, исследовался ли в ходе моделирования вопрос сеточной сходимости. Приведенные в тексте диссертации данные о числе элементов и характерном размере ячеек для некоторых расчетов (стр. 55, 71, 78) свидетельствуют о подробности используемых сеток, однако не заменяют собой исследование сеточной сходимости.

Указанные замечания несколько не снижают ценности работы, ее актуальности и перспективности.

### **Заключение**

Рассматриваемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема оценки работоспособности подшипников скольжения турбокомпрессоров на ранних этапах их проектирования. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе соискателя в науку и развитие страны.

Диссертационная работа «Оценка работоспособности подшипников скольжения турбокомпрессоров применением комплексной методики расчета динамики гибкого ротора с учетом процессов теплообмена» соответствует

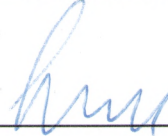
требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Худяков Владислав Сергеевич заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.2 – «Машиноведение».

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании научно-исследовательской лаборатории виртуально-имитационного моделирования Физико-механического института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (протокол №01/10-23 от «03» октября 2023 года).

Елисеев Артем Андреевич, к.ф.-м.н., инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории виртуально-имитационного моделирования Физико-механического института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (НИЛ ВИМ ФизМех СПбПУ)

 /Елисеев А.А.

Лупуляк Сергей Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент, заведующий НИЛ ВИМ ФизМех СПбПУ

 /Лупуляк С.В.

«02» ноября 2023 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес организации: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

E-mail: office@spbstu.ru, тел.: +7(800) 707-18-99.