

ПРОТОКОЛ № 1/з

Заседания диссертационного совета 24.2.353.02

на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
от «21» апреля 2022 г.

**ПРИСУТСТВОВАЛИ:** 17 из 24 членов диссертационного совета: Голенков Вячеслав Александрович, д.т.н., профессор, 2.5.7. (технические науки (председатель)); Поляков Роман Николаевич, д.т.н., доцент, 2.5.2 (технические науки) (заместитель председателя); Кожус Ольга Геннадьевна, к.т.н., 2.5.5. (ученый секретарь); Баранов Юрий Николаевич, д.т.н., доцент, 2.5.5. (технические науки); Барсуков Геннадий Валерьевич, д.т.н., доцент, 2.5.5. (технические науки); Вдовин Сергей Иванович, д.т.н., профессор, 2.5.7. (технические науки); Дорохов Даниил Олегович, д.т.н., доцент, 2.5.7. (технические науки); Корнаев Алексей Валерьевич, д.т.н., доцент, 2.5.2. (технические науки); Коробко Андрей Викторович, д.т.н., профессор, 2.5.2. (технические науки); Мазур Игорь Петрович, д.т.н., профессор, 2.5.7. (технические науки); Радченко Сергей Юрьевич, д.т.н., профессор, 2.5.7. (технические науки); Савин Леонид Алексеевич, д.т.н., профессор, 2.5.2. (технические науки); Тарапанов Александр Сергеевич, д.т.н., профессор, 2.5.5. (технические науки); Ушаков Леонид Семенович, д.т.н., профессор, 2.5.2. (технические науки); Фроленкова Лариса Юрьевна, д.т.н., доцент, 2.5.7. (технические науки); Черепенько Аркадий Анатольевич, д.т.н., 2.5.5. (технические науки); Чернышев Владимир Иванович, д.т.н., профессор, 2.5.2. (технические науки).

**ПОВЕСТКА ДНЯ:**

Защита диссертации соискателя Корнеева Андрея Юрьевича на тему: «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

**СЛУШАЛИ:**

Защиту диссертации соискателя Корнеева Андрея Юрьевича на тему: «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

**Официальные оппоненты:**

- Задорожная Елена Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск (положительный отзыв);

- Иванов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заместитель главного конструктора по науке и новым технологиям акционерного общества «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», г. Химки (положительный отзыв);

- Куменко Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва (положительный отзыв).

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону (положительный отзыв).

На автореферат поступило 13 отзывов. Все отзывы положительные.

В порядке обсуждения и защиты диссертации вопросы задавали следующие члены совета: д.т.н., профессор Тарапанов А.С., д.т.н., профессор, Радченко С.Ю., д.т.н., доцент Корнаев А.В., д.т.н., доцент Дорохов Д.О., д.т.н. Черепенько А.А., д.т.н., доцент Баранов Ю.Н., д.т.н., профессор Ушаков Л.С., д.т.н., профессор Чернышев В.И., д.т.н., доцент Поляков Р.Н.

В дискуссии приняли участие: д.т.н., доцент Корнаев А.В., д.т.н., профессор Чернышев В.И., д.т.н., доцент Поляков Р.Н., д.т.н., профессор Радченко С.Ю.

#### ПОСТАНОВИЛИ:

1. На основании результатов тайного голосования присудить Корнееву Андрею Юрьевичу ученую степень доктора технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (проголосовали «за» - 17, «против» - нет, «недействительных бюллетеней» - нет).

2. Утвердить заключение диссертационного совета с учетом внесенных поправок.

3. Материалы по защите диссертации направить в Высшую аттестационную комиссию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на утверждение.

Председатель

Диссертационного совета  
24.2.353.02, д.т.н., пр

Ученый секретарь

Диссертационного совета  
24.2.353.02, к.т.н.



Голенков В.А.

Кожус О.Г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.353.02,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА» МИНИСТЕРСТВА  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.04.2022 г. №1/з

**О присуждении КОРНЕЕВУ АНДРЕЮ ЮРЬЕВИЧУ, гражданину  
Российской Федерации, учёной степени доктора технических наук.**

Диссертация «Методология расчета и динамический анализ конических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки) принята к защите 22 декабря 2021 г., протокол №1/р диссертационным советом 24.2.353.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95), приказ о создании диссертационного совета № 1057/ нк от 20 октября 2021 г.

Соискатель Корнеев Андрей Юрьевич, 21 мая 1978 года рождения.

С 2007 по 2010 гг. являлся докторантом федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Орловский государственный технический университет».

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук «Динамические и интегральные характеристики конических подшипников скольжения» защитил в 2004 году в диссертационном совете Д 212.182.03, созданном на базе Орловского государственного технического университета.

В настоящее время работает деканом в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре мехатроники, механики и

робототехники в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук Савин Леонид Алексеевич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», кафедра мехатроники, механики и робототехники, профессор.

Официальные оппоненты:

Задорожная Елена Анатольевна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Автомобильный транспорт»;

Иванов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», зам. главного конструктора по науке и новым технологиям;

Куменко Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону в своем положительном отзыве, подписанным профессором кафедры «Транспортные машины и триботехника», доктором технических наук Шаповаловым В.В., доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Основы проектирования машин» Чукариным А.Н., доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Высшая математика» Мукутадзе М.А. и утвержденным проректором по научной работе, доктором технических наук, профессором Гуда А.Н., указала, что диссертация является законченным научным исследованием, в котором решена важная научно-техническая проблема, заключающаяся в разработке методологии расчета, комплексном исследовании работоспособности и выработке рекомендаций по проектированию конических подшипников жидкостного трения. Результаты

диссертационной работы в виде методологии проектирования и программного обеспечения могут быть использованы в проектных работах конструкторских бюро и специализированных отделов промышленных предприятий по разработке высокоскоростных турбомашин, турбоагрегатов, энергетических установок и других роторных машин. Новые технические решения конических подшипников жидкостного трения, оригинальность которых подтверждена патентами на изобретения РФ, могут быть использованы для изготовления экспериментальных образцов в составе перспективных роторных машин.

Соискатель имеет по теме диссертации 66 опубликованных научных работ, в том числе 31 статью в журналах, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России», из них 8 статей в научных журналах, индексируемых в наукометрических базах данных «Web of Science» и «Scopus»; 22 статьи в других рецензируемых научных изданиях; 10 патентов на изобретения и полезную модель РФ; 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; научную монографию.

Все научные публикации отражают основные материалы диссертации, обладают новизной и подготовлены соискателем лично или в соавторстве. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Корнеев А.Ю.** Расчет статических характеристик конических многоклиновых гидродинамических опор жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, Л.А. Савин, М.М. Ярославцев // Вестник машиностроения – 2010. – № 3. – С. 25 – 29.

**Korneev A.Yu.** Static characteristics of conical multiple-wedge hydrodynamic liquid-friction bearings / A.Yu. Korneev, L.A. Savin, M.M. Yaroslavtsev // Russian Engineering Research, 2010, 30(3), pp. 219 – 223. © Allerton Press, Inc., 2010 (Scopus).

2. **Корнеев А.Ю.** Динамические характеристики конических многоклиновых гидродинамических опор жидкостного трения / А.Ю. Корнеев, М.М. Ярославцев // Вестник машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 52 – 57.

**Korneev A.Yu.** Dynamic characteristics of conical multiple-pad hydrodynamic liquid-friction bearings/ A.Yu. Korneev, M.M. Yaroslavtsev // Russian Engineering Research, 2010, 30(4), pp. 365 – 369. © Allerton Press, Inc., 2010 (Scopus).

3. **Корнеев А.Ю.** Сравнительный анализ статических характеристик конических гидродинамических подшипников, смазываемых турбинным маслом / А.Ю. Корнеев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 57 – 62.

**Korneev A.Yu.** Static characteristics of conical hydrodynamic bearings lubricated by turbine oil / A.Yu. Korneev // Russian Engineering Research, 2012, 32(3), pp. 251 – 255. © Allerton Press, Inc., 2012 (Scopus).

4. **Корнеев А.Ю.** Влияние эффекта турбулентности на статические характеристики конических подшипников скольжения / А.Ю. Корнеев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 4. – С. 42 – 46.

**Korneev A.Yu.** Influence of turbulence on the static characteristics of conical journal bearings / A.Yu. Korneev // Russian Engineering Research, 2012, 32(4), pp. 338 – 342. © Allerton Press, Inc., 2012 (Scopus).

5. **Korneev A.Yu.** Steady Characteristics of the Water-Lubricated Conical Bearings / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, A.Yu. Korneev, L.A. Savin // Journal of Donghua University (English Edition), 2012, 29(2), pp. 115 – 122 (Scopus).

6. **Korneev A.Yu.** Lubrication Characteristics of Deep Cavity Hybrid Conical Bearing / S.B. Li, H.R. Ao, H.Y. Jiang, L. Chen, A.Yu. Korneev // Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(1), pp.60 – 66 (Chinese) (Scopus).

7. **Корнеев А.Ю.** Анализ динамики жесткого ротора на конических гидродинамических подшипниках скольжения методом траекторий / А.Ю. Корнеев // Вестник машиностроения. – 2013. – № 12 – С. 24 – 28.

**Korneev A.Yu.** Rigid-rotor dynamics of conical hydrodynamic bearings // Russian Engineering Research, 2014, 34(3), pp. 131 – 135. © Allerton Press, Inc., 2014 (Scopus).

8. **Korneev A.Y.** Dynamic Equilibrium Surfaces for Conical Fluid-Film Bearings / A.Y. Koltsov, A.Y. Korneev, L.A. Savin, Li Shengbo // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 233(1), 012041 (Scopus).

На диссертацию и автореферат поступило 17 положительных отзывов, содержащих следующие замечания:

1. **Задорожная Е.А.**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Автомобильный транспорт», официальный оппонент: 1) Целью диссертационной работы «является решение научно-технической проблемы снижения массогабаритных размеров роторно-опорных узлов на конических подшипниках жидкостного трения». Однако в тексте диссертации и автореферате не представлены конкретные результаты снижения массогабаритных размеров роторно-опорных узлов для реальных механизмов или агрегатов. На сколько % или во сколько раз изменятся геометрические или

массовые характеристики узла трения после применения предложенной автором методологии? 2) Вызывают сомнения принятые автором допущения: а) Решая неизотермическую задачу, автор пренебрегает теплообменом между смазочным материалом и поверхностями трения; б) Совсем необоснованно принято допущение Зоммерфельда о неразрывности смазочного слоя. При этом рассматривается одновременное существование зон однофазного и двухфазного состояния смазочного материала; в) Смазочный материал считается ньютоновской жидкостью. Хотя в расчетах и экспериментах рассматриваются турбинные масла ТП-22 и ТП-30, которые содержат различного рода присадки (противопенные, антиокислительные, антикоррозионные и проч.). Наличие присадок ведет к изменению свойств смазочных материалов в сторону неньютоновских; г) Изменение вязкости смазочного материала по толщине смазочного слоя доказано многочисленными исследованиями различных авторов. Однако, автор даже не оговаривает это явление даже в допущениях; д) При решении задачи динамики рассматривается автономная опора, влияние соседних опор и связи в виде пространственного ротора не принимается во внимание. 3) При решении задачи о давлении и выполнении дискретизации опорной поверхности конического подшипника автор не обосновывает степень дискретизации, а также параметр, определяющий сходимость или точность расчета. 4) Результаты, представленные в главе 3 (рис. 3.2 – 3.7), свидетельствуют, что несущая способность опоры и другие гидромеханические характеристики не зависят от геометрии поверхностей трения, а зависят только от вида смазочного материала. Разница результатов в 1,5 % может быть связана с точностью расчета поля давлений. 5) Из представленных материалов не ясно, как была выполнена верификация разработанных математических моделей. Были ли выполнены сравнения результатов расчета с данными других исследователей? 6) В рекомендациях по проектированию большое внимание уделено описанию учета высоты микронеровностей при определении предельного значения толщины смазочного слоя. Однако в алгоритмах и в представленных расчетных исследованиях не приведены результаты, позволяющие оценить влияние параметров шероховатости на характеристики узлов трения. 7) Тепловые деформации, подробно рассмотренные в п. 6.2, в методике расчета не предусмотрены и «в работе не рассматриваются». 8) При решении задачи динамики в качестве решений представлены незамкнутые траектории, из которых не ясно, при каких условиях достигается сошедшиеся решения и когда процесс интегрирования по времени необходимо

останавливать.

**2. Иванов А.В.**, доктор технических наук, доцент, АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», зам. главного конструктора по науке и новым технологиям, официальный оппонент: 1) Автором не используются методы расчетов в трехмерной постановке, позволяющие более точно учесть особенности поведения подшипников, а делается вывод о том, что «развитие современной вычислительной техники и программного обеспечения в перспективе позволят реализовать задачи по расчету полей давлений, температур, а также стационарных и динамических характеристик в смазочных слоях конических подшипников жидкостного трения с использованием 3D-моделей», хотя в настоящее время подобные методы расчета весьма развиты и широко используются, в том числе с применением отечественного программного обеспечения. Кроме того, методы трехмерного моделирования позволяют решать не только задачи гидродинамики в опорах скольжения, но и, что особенно важно для практики, сопряженные задачи: гидродинамика-теплообмен-деформации. Решение сопряженных задач существенно снижает расходы на создание опорных узлов, т.к. за счет численного эксперимента снимает ряд вопросов, возникающих при проектировании. 2) Один из проблемных вопросов создания любых подшипников скольжения – обеспечение работоспособности при запуске и останове рассмотрен недостаточно полно. 3) В обзоре говорится о водороде, высокоскоростных машинах, но нигде не упомянуто о турбонасосных агрегатах ЖРД, например, конический подшипник применялся и применяется в системе авторазгрузки ротора насоса окислителя двигателя РД253 первой ступени ракеты-носителя «Протон» (Р.В. Мартемьянов. Учебно-методическое пособие по лабораторной работе «Изучение изделия РД-253». Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ». С. Петербург 1997 г.), системе авторазгрузки ротора водородного турбонасосного агрегата двигателя RL-50 (Chapman, L. & Crease, G. & Friant, J. & Grabowski, Robert & Schmidt, E.(2000). Testing of an Advanced Liquid Hydrogen Turbopump. 12), имеющего частоту вращения 166700 об/мин. Причем ротор водородного турбонасосного агрегата RL-50 был установлен на опорах жидкостного трения и для обеспечения их работоспособности была реализована обширная научно-исследовательская программа, которая не привела к созданию работоспособной конструкции. Почему эти работы не были рассмотрены автором диссертации. 4) В работе не рассмотрены вопросы расчета конических подшипниках при перекосах, неравномерном зазоре,



неравномерных (не осесимметричных) деформациях, осевом ходе ротора, что характерно для высоконагруженных высокооборотных турбомашин. 5) Вызывает сомнение утверждение, приведенное на с. 71 «при правильно подобранном давлении подачи и геометрических характеристиках многоклиновые подшипники способны почти полностью подавлять вихрь и биение роторов высокоскоростных турбомашин», особенно в части биения. 6) Почему турбулентное течение описывается с помощью коэффициентов турбулентности по методике Константинеску? Сегодня достаточно много моделей турбулентности и было бы здорово их сравнить между собой и с экспериментальными данными, что позволило бы существенно повысить точность расчетов, особенно при применении трехмерных расчетов. 7) Хотелось бы увидеть, более подробные объяснения физических процессов, приведших к результатам, приведенным на с. 141 и с. 142. Характерно ли такое поведение для любых маловязких жидкостей. 8) Не очень понятен вывод на с. 147 по поводу турбулентности. Для высокооборотных нагруженных турбомашин течение в зазоре подшипника жидкостного трения будет турбулентным, а не ламинарным. 9) Почему отдельно проводится динамический анализ подшипников и роторов, опоры рассматриваются в отрыве от остальной конструкции. Подчиняются ли они принципу суперпозиции. Из с. 153 следует, что надо рассматривать ротор и опоры совместно. 10) Не приведен анализ погрешностей измерений для всех параметров и его влияние на точность интерпретации результатов. Такой анализ должен быть приведен либо в работе, либо в приложении к ней. 11) На с. 227 указано, что получено качественное согласование теории и эксперимента, а количественная оценка не приведена, что может быть важно для проектирования турбомашин. 12) В разделе 6 хотелось бы видеть рекомендации, возможна ли для таких опор полная взаимозаменяемость или нет, требуется подгонка и настройка для каждого конкретного экземпляра. Хотелось бы видеть более конкретные методики, алгоритмы, конструкции, обеспечивающие работоспособность при запуске и останове, на номинальном режиме, рекомендации по точности, назначению допусков, применяемым материалам. 13) Рассматривается в т.ч. жидкий водород, а коэффициенты линейного расширения даны в диапазоне от 0 до 100 °С. 14) В работе целесообразно было бы все величины приводить в СИ, значения давления приведены в СИ, а температура – в °С, температурные коэффициенты линейного расширения – в СИ (K<sup>-1</sup>).

**3. Куменко А.И.**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, официальный оппонент: 1) Основные замечания по введению: 1.1 фактический предмет исследования значительно шире, чем указал автор. Это не только статические и динамические характеристики конических подшипников жидкостного трения, но и динамические характеристики роторных систем с такими подшипниками. 1.2. Во введении мало отражены проблемы, которые пришлось преодолевать и решать автору. 2) Существенных замечаний по главе 1 нет. Следовало лишь упомянуть в табл. 1.1 о том, что не только за рубежом, но и в СССР тоже были перспективные и практически законченные разработки применения неньютоновской жидкости в подшипниках для крупного энергетического оборудования, а на Производственном объединении атомного турбиностроения (ПОАТ) Харьковского турбинного завода (ХТЗ) имелся стенд, где отрабатывалась такая смазка. 3) В качестве пожеланий по главе 2 следовало бы добавить вопросы взаимного смещения опор с коническими подшипниками, что имеет место при эксплуатации роторов и может оказать существенное влияние на все рассматриваемые их характеристики. 4) В данной главе не сделано обобщающих частных выводов по многочисленным интересным результатам. 5) Обычно, в классических энергетических подшипниках коэффициенты жесткости и демпфирования приводятся в безразмерном виде в зависимости от некоторой приведенной величины коэффициента нагруженности. Здесь также можно было бы ввести этот параметр по среднему диаметру подшипника по аналогии с классическими подшипниками. Можно считать, что это также пожелание. 6) При анализе самих коэффициентов жесткости и демпфирования важно анализировать не сами величины, а работу этих сил, что очень важно для анализа устойчивости. Следовало бы оценивать параметры анизотропии жесткости, что также значительно влияет на запасы устойчивости роторной системы. 7) Осталось неясным, какие резервы повышения устойчивости имеют эти подшипники. Для этого необходимо расширить варьирование зазоров, провести оптимизации степени эллиптичности таких подшипников, проверить влияние анизотропии и величины зазора. Для выравнивания зазора вдоль оси подшипника, можно было рассмотреть его изменение, например, при равной безразмерной удельной нагруженности вдоль оси подшипника. 8) Рассмотрены вопросы нагрева ротора или корпуса и изменения зазоров в коническом подшипнике,

при этом не рассматривается связь этих процессов с изменением температурного поля в масляном слое, которое может быть существенно неравномерным.

9) Не обсуждается вопрос, когда соотношение радиальной и осевой нагрузок может меняться на разных режимах. Желательно также программный комплекс дополнить автоматическим поиском границ устойчивости роторных систем путем анализа движения корней на комплексной полуплоскости. С другой стороны, используемые численные методы интегрирования уравнений движения с получением траекторий движения при разных видах возмущения и классический метод D-разбиений имеют преимущество в том, что они позволяют учитывать нелинейные свойства вплоть до задеваний шеек роторов.

10) К сделанным выводам можно было бы добавить общий вывод о том, что данная работа подтвердила потенциальные возможности обеспечения устойчивого движения ротора в конических подшипниках скольжения и возможность их практического применения в различных малогабаритных транспортных и других энергетических установках.

**4. Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону: 1) Одной из главных проблем использования конических подшипников является решение ряда технологических задач, связанных с точностью изготовления, сборки и базирования рабочих поверхностей, однако в работе недостаточно подробно рассмотрены вопросы проектирования, связанные с анализом влияния погрешностей геометрических размеров и форм, влияющих на характеристики опор и рекомендаций по выбору их предельных значений. 2) Среди многообразия запатентованных конструкций конических подшипников при участии автора в диссертации рассмотрена только одна конструкция в качестве объекта исследования. 3) Представленная в работе математическая модель расчета действующих в жестком роторе сил позволяет учитывать дисбаланс, однако, при проведении вычислительных экспериментов данным фактором пренебрегают. 4) Отсутствуют результаты экспериментальных исследований непосредственно несущей способности и коэффициентов жесткости и демпфирования конических подшипников жидкостного трения. 5) Представленные в заключительной главе рекомендации по проектированию конических подшипников не содержат информации по выбору конкретных значений посадок втулок в корпус и обеспечению работы на пусковых режимах. 6) В работе присутствуют стилистические неточности.

5. **Надеждин И.В.**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»: 1) При разработке математической модели конических подшипников жидкостного трения с учетом гидродинамической теории смазки автор предполагает, что «среда односкоростная с осредненными свойствами». На наш взгляд, более корректно рассматривать картину течения жидкости в канале как двумерную нестационарную задачу с использованием гетерогенной модели; 2) Из автореферата не ясно, как в работе для анализа устойчивости ротора определялись динамические коэффициенты жесткости и демпфирования? По каким критериям оценивалась устойчивость опоры с коническими подшипниками? 3) В автореферате отсутствует экономическое обоснование преимуществ опор, с коническими подшипниками жидкостного трения, т.к. очевидно, что имеет место усложнение технологии изготовления и монтажа конических опорных поверхностей опор роторных систем; 4) Из автореферата не ясно, проводился ли модальный анализ частот, возникающих при работе конического подшипника жидкостного трения? Какие существуют ограничения по параметрам использования предложенных автором конических подшипников скольжения в опорах роторных систем? 5) В автореферате не указано, какие материалы применялись в конструкции конических подшипников жидкостного трения в роторно-опорном узле при проведении экспериментальных исследований?

6. **Никитин А.Г.**, д-р техн. наук, профессор кафедры механики и машиностроения ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»: 1) Допущение, что поверхности цапфы и подшипника абсолютно гладкие не мотивировано (стр. 16). Их шероховатость оказывает большое влияние на работу ПЖТ; 2) Требуется пояснение фраза «Повышение давления подачи смазочного материала ....» (стр. 24), так как рассматривается работа ГДП, в котором давление нагнетается насосным действием вала.

7. **Киричек А.В.**, д-р техн. наук, профессор, проректор по перспективному развитию ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»: 1) Упрощение конструкции конических подшипников жидкостного трения сопровождается необходимостью выставления требуемого зазора при монтаже, который весьма чувствителен к погрешностям расположения ротора в осевом направлении. Погрешности расположения ротора приводят либо к увеличению радиального зазора относительно расчетного, либо к заклинива-

нию подшипника. В работе отсутствуют рекомендации по допустимой величине погрешностей; 2) Автор не дает рекомендаций по материалам различных типов конических подшипников скольжения.

8. **Нилов В.А.**, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», д-р техн. наук, профессор: 1) В качестве единственного замечания по автореферату следует отметить следующее - в работе подробно изложены *результаты стендовых исследований* конических подшипников жидкостного трения, однако не достаточно обоснована возможность их интерпретации для натуральных промышленных подшипников жидкостного трения, выполненных по предлагаемым методикам.

9. **Колмыков В.И.**, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии материалов и транспорта ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»: 1) В тексте автореферата отсутствуют сведения об учете влияния изменяющихся в процессе эксплуатации свойств смазочного материала на состояние конических подшипников жидкостного трения; 2) В тексте автореферата отсутствуют сведения об экономической эффективности решения проблемы по снижению массогабаритных размеров роторно-опорных узлов на конических подшипниках жидкостного трения.

10. **Пановко Г.Я.**, д-р техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, главный научный сотрудник лаборатории вибромеханики ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН: 1) Пункты 2 - 4 научной новизны представлены в форме, не позволяющей определить суть и значимость их отличительной части по сравнению с известными литературными данными; 2) В работе рассмотрена сложная математическая модель нестационарного неизотермического течения вязкой жидкости в тонком смазочном слое подшипника скольжения. Однако, аспекты совместного численного решения уравнений движения и баланса тепла не отражены в автореферате.

11. **Рыбак А.Т.**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»: 1) Из автореферата не ясно, учитывается ли при расчёте статических и динамических характеристик в разработанной математической модели параметры макро- и микрогеометрии конического подшипника жидкостного трения; 2) В автореферате указано, что новизна технических решений подтверждается 10 патентами РФ на изобретение и полезную модель, однако, по тексту автореферата не приводятся их описания; 3) Имеется ряд замечаний по оформлению текста автореферата (объем автореферата значительно

превышает допустимый, некоторые рисунки и формулы выполнены в мелком масштабе, что затрудняет их восприятие и др.).

12. **Фалалеев С.В.**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов ФГБОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: 1) Не проведен анализ влияния теплового удлинения ротора, которое может оказывать значительное влияние на параметры системы; 2) Не приведены количественные оценки точности математических моделей в сравнении с результатами экспериментов, либо иными достоверными данными; 3) из автореферата неясно, учитывались ли шероховатость поверхностей и величины технологических отклонений.

13. **Гуськов А.М.**, профессор кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», д-р.техн. наук, профессор: 1) Желательно на с. 11-13 в обзорной части конкретизировать творческий вклад известных ученых в области конических опор с выходом на нерешенные задачи, сформулированные диссертантом; 2) В формуле (9) на с. 18 автореферата, определяющей суммарный массовый расход смазочного материала, не пояснены величины  $d_H$ ,  $l_H$  и  $\mu_H$ ; 3) Для большей наглядности результатов экспериментальных исследований на с. 27-29 следует конкретизировать параметры используемого измерительного комплекса (тип, классы, точность, пределы измерения и т.д.) с выходом на суммарную погрешность экспериментальных результатов; 4) Также представляется целесообразным дать на с. 30-31 более детальное изложение алгоритма предложенной методики с этапа анализа исходных данных до этапа полного завершения расчета.

14. **Матлин М.М.**, зав. кафедрой «Детали машин и подъемно-транспортные устройства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», д-р техн. наук, профессор: без замечаний.

15. **Рыбак Л.А.**, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»: 1) Отсутствуют данные по материалам подшипников скольжения, а также рекомендации по выбору конкретных конструкций и геометрических параметров в зависимости от рабочих условий; 2) На рисунках 9 и 10 отсутствуют геометрические размеры конического подшипника, такие как: диаметры, угол конусности, что затрудняет оценку статических характеристик и возможность сравнения с результатами других авторов; 3) Из текста автореферата не ясно, почему не рассматриваются значения

относительных эксцентриситетов более 0,6; 4) На стр. 17 при описании недостающих уравнений теплофизических свойств смазочных материалов отсутствует соотношение для теплоемкости ( $C_p$ ); 5) Не ясно, как определять коэффициенты характеристического уравнения  $a_n$  в формуле (25), с.25.

16. **Лобачевский Я.П.**, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии наук (РАН), ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»: 1) Не вполне определена позиция автора по поводу определения безразмерного критерия, обеспечивающего устойчивость функционирования системы «ротор-КПС»; 2) Не представлено описание разработанного автором программного обеспечения (язык программирования, системные требования, интерфейс и др.), которое является частью методологии проектирования конических подшипников жидкостного трения.

17. **Годлевский В.А.**, д-р техн. наук, профессор кафедры экспериментальной и технической физики ФГБОУ ВО «Ивановский государственный университет»: 1) Автор, на наш взгляд, незаслуженно избегает рассмотрения вопроса о пластичных смазочных материалах, наиболее широко применяемых для смазывания подшипников качения; 2) В работе, к сожалению, не уделено внимания современным маслам с присадками и наполнителями, которые существенно повышают ресурс узлов трения с качением; 3) Хотя при формулировке актуальности работы автор и указывает на необходимость повышения надежности узлов трения и продления ресурса, в автореферате диссертации и, в частности в разделе «Заключение» нет данных о том, как предложенные автором решения влияют на интенсивность изнашивания подшипниковых узлов, на параметры их безотказности и долговечности.

Выбор официальных оппонентов обосновывается высоким профессионализмом и широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций по выполненным исследованиям, близким к проблеме работы соискателя, и, таким образом, способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также отсутствием совместных проектов и печатных работ.

Выбор ведущей организации обосновывается лидирующим положением ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» в области расчета, проектирования и исследования роторных машин с различными видами опорных узлов и перспективностью внедрения результатов диссертации, а именно программ расчета статических и динамических характеристик, а также программного обеспечения для динамического анализа и устойчивости роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения

в учебном процессе при выполнении специальных частей выпускных квалификационных работ.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

***разработаны:***

- теоретические основы расчета полей давлений в смазочном слое конических подшипников жидкостного трения в условиях переменных теплофизических свойств и турбулентного течения смазочного материала на основе совместного решения модифицированного уравнения Рейнольдса, уравнений баланса энергий и баланса расходов и уравнения взаимосвязи теплофизических свойств;
- математические модели и алгоритмы расчета несущей способности, расхода смазочного материала, потерь мощности на трение и прокачку конических подшипников;
- алгоритм построения кривых подвижного равновесия в конических подшипниках жидкостного трения;
- математическая модель расчета коэффициентов жесткости и демпфирования конических подшипников;
- методология расчета конических подшипников жидкостного трения в виде методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах;
- численное решение задачи построения пространственных траекторий движения центра ротора;

***предложены:***

- программное обеспечение для динамического анализа роторной системы на конических подшипниках жидкостного трения;
- методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах;
- на основе полученных результатов новые технические решения конических подшипников жидкостного трения и рекомендации по проектированию конических подшипников в качестве опор роторов;

***доказано***, что использование в конструкции роторно-опорных узлов конических подшипников жидкостного трения позволяет добиться существенных преимуществ по отношению к конструкции опорного узла, состоящего из ком-



бинации радиального и упорного подшипников, а именно, снижаются массогабаритные размеры исследуемых узлов, уменьшаются потери мощности на трение и прокачку смазочного материала;

**введены** безразмерные коэффициенты, характеризующие статические характеристики, для расширения сферы применения полученных результатов и проведения сравнительного анализа конических опор с различными геометрическими и рабочими параметрами по критериям несущей способности, расхода смазки и потерь мощности на трение и прокачку.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны:**

– влияние эффекта турбулентности смазочного слоя на статические характеристики конических опор;

– эффект совместного действия напорных и сдвиговых течений и изменения теплофизических свойств смазочного материала в смазочном слое;

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы** гидродинамическая теория смазки, базовые уравнения термодинамики, теории динамики твёрдого тела, методики проведения экспериментов.

**изложены:**

– классификация конических подшипников жидкостного трения, основанная на комплексе новых технических решений подшипниковых узлов с различными видами питающих камер и дросселирования смазочного материала;

– решение задачи анализа радиальной и осевой устойчивости роторов на конических подшипниках путем решения уравнений движения и расчета коэффициентов жесткости и демпфирования;

– численное решение краевой задачи с использованием базовых уравнений гидродинамической теории смазки и термодинамики с учетом турбулентности, совместного действия напорных и сдвиговых течений и изменения теплофизических свойств смазочного материала в смазочном слое;

**изучены:**

– влияние рабочих и геометрических параметров конических подшипников жидкостного трения на их статические характеристики;

– эффекты турбулентности смазочного слоя на несущую способность, расход смазочного материала и потери мощности на трение и прокачку;

– основные закономерности изменения жесткости и демпфирования смазочного слоя от геометрических и рабочих параметров конических подшипников жидкостного трения;

– решения задач расчета устойчивости системы путем построения соответствующих областей методом  $D$ -разбиений и построения плоских и пространственных траекторий движения центра масс ротора путем решения уравнений движения с учетом действующих внешних сил.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

***использование:***

– полученных теоретических уравнений для определения давлений в смазочном слое конических подшипников жидкостного трения позволяет прогнозировать их характеристики с учётом эффекта турбулентности и переменных теплофизических свойств смазочного материала;

– теоретических основ расчёта и методик проектирования позволяет выполнять проектировочные и проверочные расчёты различных видов конических подшипников жидкостного трения, определять их коэффициенты жёсткости и демпфирования, несущую способность, расход смазочного материала, потери мощности на трение и прокачку;

***разработаны и внедрены*** в научный, производственный и учебный процессы:

– методология расчета конических подшипников жидкостного трения в виде методики проектирования, рекомендаций и программ расчета, позволяющих обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах;

– экспериментальные установки по исследованию роторно-опорных узлов с современной информационно-измерительной системой, позволяющей в режиме реального времени фиксировать перемещения ротора, давление подачи и температуру смазочного материала, частоту вращения и расход смазочного материала;

– программное обеспечение по расчёту статических и динамических характеристик роторно-опорных узлов с коническими подшипниками жидкостного трения, позволяющее в автоматизированном режиме проводить проектировочные и проверочные расчёты роторно-опорного узла;

***определены:***

– особенности взаимовлияния сил в конических подшипниках жидкостного трения с выходом на количественные характеристики несущей способности, расхода смазочного материала и потерь мощности на трение и прокачку и коэффициентов жёсткости и демпфирования;

– области рационального применения различных видов конических опор роторов различных видов по геометрическим, кинематическим и иным характеристикам;

– сочетания рабочих и геометрических параметров конических подшипников жидкостного трения, приводящих к изменениям статических и динамических характеристик;

***созданы:***

– качественные и количественные обоснования целесообразности внедрения конических подшипников жидкостного трения в роторные машины новых поколений;

– опытные образцы конических подшипников жидкостного трения различных структурно-функциональных схем и экспериментально доказана их работоспособность и преимущества по сравнению с конструкциями, состоящими из комбинации радиального и упорного подшипников;

– практические рекомендации по созданию опорных узлов пониженных массогабаритных размеров, позволяющие на этапе проектировочного расчёта делать выбор между схемами опорных узлов, состоящими или из конического подшипника, или из комбинации радиального и упорного подшипников, с учётом предварительной оценки возможностей различных схем;

***представлены:***

– методология расчета конических подшипников жидкостного трения, позволяющая обеспечить выбор рациональных рабочих и геометрических параметров конических подшипников жидкостного трения, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на конических опорах;

– методика экспериментального исследования рабочих и геометрических параметров конических подшипников жидкостного трения;

– методика определения статических и динамических характеристик с учётом эффекта турбулентности и переменных теплофизических свойств смазочного материала;

– качественное и количественное описание всех направлений повышения рабочих характеристик опорных узлов путём применения конических подшипников жидкостного трения в качестве опор роторов высокоскоростных турбомашин.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**  
***для экспериментальных работ*** результаты получены на сертифицированном оборудовании, обоснованы калибровки разработанных экспериментальных

стендов и установок, показана хорошая сходимость результатов теоретических расчётов и экспериментальных данных;

*теория*, построенная с использованием известных, проверяемых данных, корректно согласуется с опубликованными и собственными экспериментальными данными по теме диссертации и смежным отраслям;

*идея базируется* на обобщении передового отечественного и зарубежного опыта в области опорных узлов роторов с коническими подшипниками жидкостного трения;

*использовано сравнение* авторских данных и данных, полученных ранее другими авторами;

*установлено*, что результаты диссертационного исследования не противостоят научным исследованиям в области исследования опорных узлов роторов и дополняют их в части подхода к описанию функционирования различных видов конических подшипников жидкостного трения;

*использованы* современные методики сбора и обработки исходной информации, представительные выборочные совокупности с обоснованием объектов наблюдения и измерения.

**Личный вклад соискателя состоит в** непосредственном участии автора на всех этапах подготовки диссертационной работы, включая анализ теоретических положений и существующих решений в области опорных узлов роторов; разработке математических моделей расчета конических подшипников жидкостного трения; разработке экспериментальных стендов и проведении физических экспериментов; обработке и интерпретации экспериментальных данных; подготовке основных публикаций по выполненной работе; формулированию положений, выводов и результатов диссертационного исследования.

В ходе защиты диссертации не были высказаны критические замечания.

Соискатель Корнеев А.Ю. ответил на все задаваемые вопросы, привел собственную аргументацию, касающуюся разработанных им новых технических и технологических решений и математических моделей.

На заседании 21 апреля 2022 года диссертационный совет за решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение и заключающейся в снижении массогабаритных размеров роторно-опорных узлов на конических подшипниках жидкостного трения, принял решение присудить Корнееву А.Ю. учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.5.2. Машино-

ведение (технические науки), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17; против – 0; недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

24.2.353.02,

доктор технических наук

профессор



Голенков Вячеслав Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.353.02,

кандидат технических наук

Кожус Ольга Геннадьевна

Дата: 21.04.2022 г.