

## ПРОТОКОЛ № 4/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 «22» сентября 2022 г.

**ПРИСУТСТВОВАЛИ:** 16 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); Дорохов Даниил Олегович, д.т.н., доцент, 2.5.7. (технические науки); Козлов Александр Михайлович, д.т.н., профессор, 2.5.5. (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 Фетисова Александра Сергеевича на тему: «Грузоподъемность и динамические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

### СЛУШАЛИ:

Защиту диссертации соискателя Фетисова Александра Сергеевича на тему: «Грузоподъемность и динамические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки).

### Официальные оппоненты:

- Гаврилов Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Колесные и гусеничные машины» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск (положительный отзыв);

- Давыдов Аркадий Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национально-исследовательский университет)», г. Москва (положительный отзыв).

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва (положительный отзыв).

На автореферат поступило 7 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 Чернышев В.И., д.т.н., профессор Козлов А.М., д.т.н., профессор Мазур И.П., д.т.н., доцент Поляков Р.Н., д.т.н., доцент Дорохов Д.О., д.т.н., профессор Чернышев В.И.

В дискуссии приняли участие: д.т.н., профессор Савин Л.А., д.т.н., профессор Козлов А.М., д.т.н., профессор Чернышев В.И.

#### ПОСТАНОВИЛИ:

1. На основании результатов тайного голосования присудить Фетисову Александру Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (проголосовали «за» - 16, «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., проф.

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  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22.09.2022 г. №4/з

**О присуждении ФЕТИСОВУ АЛЕКСАНДУ СЕРГЕЕВИЧУ,  
гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата  
технических наук.**

Диссертация «Грузоподъемность и динамические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения» по специальности 2.5.2 Машиноведение (технические науки) принята к защите 15 июля 2022 г., протокол №4/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 Фетисов Александр Сергеевич, 23 июля 1993 года рождения.

С 2017 по 2021 гг. обучался в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

В настоящее время работает младшим научным сотрудником в научно-образовательном центре «Интеллектуальные технологии мониторинга и диагностики энергогенерирующего оборудования» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения 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 руководитель – доктор технических наук Корнаев Алексей Валерьевич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», кафедра мехатроники, механики и робототехники, профессор.

Официальные оппоненты:

Гаврилов Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Колесные и гусеничные машины», исполняющий обязанности заведующего кафедрой;

Давыдов Аркадий Валентинович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Конструкция и проектирование двигателей», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва в своем положительном отзыве, подписанном доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Прикладная механика (РК 5)» Гуськовым А.М., доктором технических наук, профессором, заместителем заведующего кафедрой «Прикладная механика (РК 5)» по научной работе Покровским А.М. и утвержденным проректором по науке и стратегическим коммуникациям, доктором экономических наук, профессором Дрогозовом П.А., указала, что диссертация является законченным научным исследованием, в котором решена научно-техническая задача применения магнитореологических жидкостей в качестве смазочного материала подшипников жидкостного трения, имеющая значение для развития теории и методов проектирования подшипниковых узлов роторных машин. Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в специализированных организациях для создания новых смазочных материалов и трибосопряжений, функционирующих в условиях смазки магнитореологическими жидкостями. Новое техническое решение магнитореологического подшипника жидкостного трения с соосным расположением электромагнитного актуатора, оригинальность которого

подтверждена патентом на полезную модель, может быть использовано для изготовления экспериментальных образцов в составе перспективных роторных машин.

Соискатель имеет по теме диссертации 25 опубликованных научных работ, в том числе 10 статей в журналах, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК России», 10 статей в научных журналах, индексируемых в наукометрических базах данных «Web of Science» и «Scopus»; 5 статей в других рецензируемых научных изданиях; 5 патентов на изобретения и полезную модель РФ, а также свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

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. Фетисов А.С. Магнитореологическая опора скольжения: результаты экспериментальных исследований/ А.С. Фетисов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. №1(345), 2021. С. 77-82.

2. Фетисов А.С. Влияние массовых сил на течение неньютоновских жидкостей в тонких каналах/ А.В. Корнаев, А.С. Фетисов, М.В. Бобырь // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. №1(339), 2020. С. 103-106.

3. Фетисов А.С. Экспериментальный стенд для исследования влияния магнитореологических смазочных материалов на характеристики работы опоры скольжения/ А.С. Фетисов, А.Ю. Бабин, В.О. Тюрин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. №1(339), 2020. С. 114-119.

4. Фетисов А.С. Информационно-измерительная система и система управления подшипникового узла с магнитореологической смазкой/ М.Э. Бондаренко, А.С. Фетисов, С.Г. Попов, В.О. Тюрин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 2(340), 2020. С. 104-108.

5. Фетисов А.С. Магнитореологическая опора скольжения: экспериментальные результаты/ А.С. Фетисов, В.О. Тюрин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 3(341), 2020. С. 84-90.

6. Фетисов А.С. Магнитореологическая опора скольжения: результаты экспериментальных исследований/ А.С. Фетисов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 5(343), 2020. С. 98-103.

7. Фетисов А.С. Экспериментальный стенд для исследования реомагнитных опор скольжения/ А.С. Фетисов, Я. Запомель, М.Э. Бондаренко, В.О. Тюрин // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. № 3, 2019. С. 376-380.



8. Фетисов А.С. Численное моделирование подшипников жидкостного трения при смазке магнитореологическими жидкостями/ А.С. Фетисов, А.Ю. Бабин, М.Э. Бондаренко, В.О. Тюрин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 1(333), 2019. С. 93-100.
9. Фетисов А.С. Расчет магнитной цепи опоры скольжения, смазываемой магнитореологическими жидкостями/ А.С. Фетисов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 3(335), 2019. С. 69-74.
10. Фетисов А.С. Применение мехатронных систем в опорных узлах роторных агрегатов/ А.С. Фетисов, А.Ю. Бабин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. № 6(332), 2018. С. 110-118.
11. Fetisov A. Experimental stand for research of journal bearing lubricated by magnetorheological liquid / Fetisov A., Babin A., Tyurin V. // *Lecture notes in mechanical engineering*. 2021. P. 1263-1270.
12. Fetisov A. Numerical modelling of fluid-film bearing lubricated with magnetorheological fluid / Babin A., Fetisov A., Tyurin V. // *Lecture notes in mechanical engineering*. 2020. P. 1303-1310.
13. Fetisov A. Application of variational approach to non-newtonian fluid flow modelling/ Kornaev A., Savin L., Fetisov A., Kornaeva E. // *Proceedings of 10th International Scientific Conference BALTRIB 2019*. 2019. P. 194-201.
14. Fetisov A. Influence of the ultrafine additives to the oils on friction and vibration in the fluid film bearings / Kornaev A., Savin L., , Kornaeva E., Fetisov A. // *Tribology International*. 2016. Vol. 101. P. 131–140.
15. Fetisov A. Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect / Kornaev A., Kornaeva E., Savin L., Kazakov Yu., Fetisov A., Rodichev A., Mayorov S. // *Tribology International*. 2021. Vol. 160. 107027.
16. Fetisov A. Analysis of the conditions for the occurrence of the effect of a minimum of friction in hybrid bearings based on the load separation principle / Polyakov R., Savin L., Fetisov A., // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2019. Vol. 233(2). P. 271–280.
17. Fetisov A. Modeling the Magnetorheological Fluid Flow Between Parallel Plates Under an External Magnetic Field / Fetisov A., Kornaev A., Tyurin V. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 1. P. 860–866.
18. Fetisov A. Study of Trajectories of Rotors in Journal Bearings Lubricated with Aerated Liquids / Fetisov A., Kazakov Yu. , Kornaev A. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 0. P. 1271–1277.
19. Fetisov A. Friction and vibration in journal bearings operating with nanofluids: Experimental results / Fetisov A., Kornaev A., Tokmakov N. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 1087–1095.

20. Fetisov A. Experimental Assembly with Multi-Zone Lubrication Active Control System / Fetisov A., Tyurin V., Tokmakov N. // 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2018. 2018. P. 99–102. 8589206.

21. Фетисов А.С. Экспериментальный стенд для исследования опор роторов при смазке магнитореологическими материалами/ В.О. Тюрин, А.С. Фетисов, М.Э. Бондаренко, А.Ю. Бабин // Сборник научных статей 5-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». 2020. С. 320-323.

22. Фетисов А.С. Информационно-измерительная система подшипникового узла с магнитореологической смазкой/ В.О. Тюрин, А.С. Фетисов, М.Э. Бондаренко, А.Ю. Бабин // Сборник научных статей 5-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». 2020. С. 40-43.

23. Фетисов А.С. вариационный подход моделирования гидродинамических течений сред с управляемыми свойствами/ А.С. Фетисов // Материалы XVII международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век». 2019. С. 208-212.

24. Фетисов А.С. Краткий обзор подходов к моделированию магнитореологических жидкостей/ М.Э. Бондаренко, В.О. Тюрин, А.С. Фетисов, А.Ю. Бабин // Сборник трудов конференции «XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС - 2018)». 2019. С. 236-239.

25. Фетисов А.С. Экспериментальное исследование динамических качеств опор роторов с применением портативного комплекса измерений Bruel&Kjaer/ А.С. Фетисов, А.В. Корнаев, Л.А. Савин // Материалы VI Международной конференции «Проблемы механики современных машин». 2015. С. 370-375.

На диссертацию и автореферат поступило 10 положительных отзывов, содержащих следующие замечания:

**1. Гаврилов К.В.**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Колесные и гусеничные машины», официальный оппонент: 1) Среди представленных характеристик подшипников не исследуются такие важные характеристики, как расход смазочного материала и потери мощности на трение и прокачку. 2) Не указаны, какие магнитореологические жидкости (МРЖ) используется в качестве смазочного материала, и их свойства, в т.ч. и теплофизические. В диссертационной работе

мало уделено внимания исследованию поведения различных МРЖ. 3) Отсутствие в математической модели учета шероховатостей поверхностей трения при их взаимодействии с магнитореологической жидкостью может искусственно завысить расчетную эффективность использования таких смазочных материалов. 4) В работе выполнены эксперименты, которые сравнивались с натурными для верификации результатов, но отсутствуют примеры расчетных исследований для промышленных экземпляров роторных систем, например, для подшипников скольжения роторов турбокомпрессоров. 5) Не рассмотрен вопрос периодичности замены МРЖ в подшипниках скольжения вследствие их свойств.

**2. Давыдов А.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», официальный оппонент: 1) В работе имеется ряд недостатков в изложении и оформлении, имеются нестрогие формулировки. Например, в гл. 1.5 упоминаются «большие динамические характеристики» подшипника. Расшифровка данных на графиках также не всегда достаточно полна. 2) Во введении утверждается, что уникальность подшипников скольжения как узлов роторов заключается в необходимости разработки подшипника с учетом особенностей работы всей машины – это не так. Их уникальность в первую очередь заключается в значительной статической и динамической грузоподъемности. На первых этапах проектирования таких опор достаточно знать рабочие частоты вращения ротора и силу веса, приходящуюся на опору. 3) В достаточно объемном обзоре литературы параметры анализируемых опор, такие как грузоподъемность, эквивалентная вязкость смазки и т. п. приведены в разных абсолютных величинах, что не позволяет сравнить их между собой. Например, указание исследованных диапазонов оборотов без указания диаметра подшипника не позволяет оценить и сравнить масштабы исследованных подшипников и, как следствие, область применимости результатов. 4) В работе для расчета динамических характеристик ротора применен достаточно сложный конечно-элементный алгоритм. Расчет описанного в работе простого ротора мог быть выполнен с гарантированно высокой точностью другими широко известными методами, такими как метод динамических жесткостей. 5) В принятой компоновке стенда и постановке эксперимента оценивается суммарное демпфирование и исследуемой опоре, смазываемой магнитореологическими жидкостями, и второй шарикоподшипниковой опоре. С другой стороны, все результаты отнесены только к исследуемому подшипнику скольжения, и добавки от второй опоры,



например, к моменту трения, даже не упоминаются. б) В работе не проведены общепринятые простые «установочные» модульные эксперименты, например, определение собственных частот и форм колебаний экспериментального ротора без вращения. Такие испытания, как правило, используются для верификации расчетной модели. 7) В эксперименте использована высокоточные датчики и вторичная аппаратура, но ни в тексте, ни на рисунках, не показано расположение датчиков виброперемещений ротора, от которого в значительной мере зависит информативность испытаний. То же замечание можно сделать относительно измерений давления. 8) Изложенные в заключении выводы по работе не определяют области применения разработанных методов расчета характеристик и оптимизации параметров опор. Также не приведены оценки области применимости полученных результатов. Например, все результаты приведены для частот вращения от 1000 до 4000 об/мин, но из текста неясно, как приложить эти результаты к аналогичному подшипнику с той же окружной скоростью скольжения, но меньшего или большего диаметра. 9) Один из наиболее значимых описанных эффектов – повышение несущей способности подшипникового узла. Однако в работе никак не оценивается конструктивная «цена» этого выигрыша, а именно неизбежное увеличение габаритов узла, связанное с необходимостью размещения магнитов, размеры которых, в свою очередь, определяются напряженностью создаваемого магнитного поля. 10) В работе следовало бы уделить больше внимания многорежимным машинам, в которых проявляется совместное влияние частоты вращения ротора и радиальной нагрузки на положение равновесия ротора.

**3. Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва: 1) Следует пояснить, каким образом в предложенных математических моделях учитывается влияние внешнего электромагнитного поля на процесс течений: посредством реологических моделей или посредством учета массовых сил электромагнитной природы? 2) В работе следовало бы более подробно обосновать адиабатическую постановку задачи о течении магнитореологической жидкости в подшипнике скольжения, а также найти способ подтвердить это экспериментально. 3) Хотя в работе затрагиваются вопросы энергетических характеристик магнитореологических подшипников скольжения, автору следует привести общие расчеты энергоэффективности применения подобных технических решений.

4. **Нилов В.А.**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительного производства» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»: 1) В разделе «Результаты работы» не приведены рекомендации по проектированию опор скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями, хотя они задекларированы в задачах исследования (с. 5, пункт 5) и о их существовании упомянуто на с. 19. 2) В автореферате отсутствуют хотя бы ориентировочные сведения по оценке экономической эффективности выполненных исследований.

5. **Мукутадзе М.А.**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Высшая математика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей и сообщения»: 1) Не представлены практические рекомендации пользователю разработанных математических расчетных моделей. 2) Представление зависимости не являются функциями температуры, что для описанных условий работы узла трения является весьма грубым допущением.

6. **Рыбак А.Т.**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и БИ» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»: 1) К недостаткам работы можно отнести то, что раздел научной новизны перегружен большим количеством пунктом, из которых пункты 1 и 2 имеют недостаточно выраженный научный характер, а пункт 5 скорее можно отнести к практической значимости.

7. **Тихомиров В.П.**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «ТТС» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», **Измеров М.А.**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «ТТС» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»: 1) В автореферате на странице 5 говорится о совместном решении уравнений гидродинамики и магнитного поля с учетом турбулентности и кавитации, а также в качестве научной новизны (1 пункт) указано решение задачи определения полей давлений в несущих слоях подшипника, но далее в автореферате результаты решения этих задач не представлены. 2) На стр. 16 рис. 10 приведена траектория движения ротора. Это результат расчета или эксперимента? Если это эксперимент, то с помощью каких средств удалось получить такой довольно детальный график? 3) Интересует скорость реакции системы регулировки характеристик подшипников с магнитореологической смазкой: прецессия вала и различные динамические эффекты в виде резонанса при высокой частоте вращения валов возникают очень быстро, и сможет ли система регулировки жесткости подшипника отреагировать на такие изменения в реальных условиях работы?

8. **Мокрозуб В.Г.**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», **Егоров С.Я.**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»: 1) в автореферате не раскрыто сопоставление тематики и результатов работы с аналогичными исследованиями в России и за рубежом. 2) не достаточно ясна роль описанного в работе вариационного принципа. Предложенный алгоритм мог быть использован в решении задач исследования, а не только для простого асимптотического случая. 3) недостаточно внимания в математической модели уделено учету неровностей поверхностей трения, а также термическим процессам, протекающим в смазочном слое.

9. **Кулеев Р.Ф.**, канд. техн. наук, директор Института искусственного интеллекта АНО ВО «Университет Иннополис»: 1) Для большей наглядности результатов экспериментальных исследований на с. 13-14 следует конкретизировать параметры используемого измерительного комплекса (тип, классы, точность, пределы измерения и т.д.) с выходом на суммарную погрешность экспериментальных результатов; 2) Модель системы управления на основе DQN агента представлена в автореферате и диссертации в виде, не позволяющем другим исследователям ее воспроизвести; 3) Предложенный обобщенный функционал Лагранжа может быть использован как физически обоснованная целевая функция для модели машинного обучения. Каким образом в подобной модели можно будет учесть особенности трехмерной области течения, два размера которой существенно больше третьего?

10. **Молодцов В.В.**, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой станков ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»: 1) из автореферата не ясно, учитывается ли в разработанной математической модели теплообмен с окружающими поверхностями. Значительная часть тепла, выделяемая в подшипнике, будет поглощаться корпусом и ротором машины; 2) в работе не рассматривались вопросы скорости реакции смазочного слоя на воздействие приложенного магнитного поля.

Выбор официальных оппонентов обосновывается высоким профессионализмом и широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций по выполненным исследованиям, близким к тематике 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 «Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)» в области расчета, проектирования и исследования роторных машин на опорах скольжения электромагнитной природы и перспективностью практического внедрения результатов диссертации, а именно программного обеспечения по расчету интегральных и динамических характеристик магнитореологических подшипников жидкостного трения в производственном и учебном процессе при выполнении лабораторных и практических работ.

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

***разработаны:***

- комплекс математических моделей и алгоритмов расчета несущей способности, коэффициента трения, коэффициентов жесткости и демпфирования смазочного слоя магнитореологических подшипников жидкостного трения;
- комплекс математических моделей, описывающих новый вариационный принцип, обобщающий вариационный принцип Лагранжа и позволяющий учитывать совместно неньютоновские свойства смазочных материалов и действие массовых сил, в том числе, электромагнитной природы;
- имитационная модель твердого ротора на магнитореологических подшипниках жидкостного трения, позволяющая производить численное решение задачи построения пространственных траекторий движения центра ротора;
- имитационная модель системы управления динамическим поведением роторных машин на магнитореологических подшипниках скольжения, основанная на методе глубокого машинного обучения с подкреплением;

***предложены:***

- новые подходы динамического анализа роторных систем на магнитореологических подшипниках жидкостного трения, реализованные в виде программного обеспечения;
- методика проектирования, рекомендации и программы расчета, позволяющие обеспечить выбор параметров подшипников, расчет статических и динамических характеристик, устойчивости роторной системы на магнитореологических опорах скольжения;

***доказано***, что использование магнитореологических жидкостей в качестве смазочного материала подшипников жидкостного трения позволяет добиться существенных преимуществ по отношению к конструкциям опорного узла, включающего подшипник качения или скольжения, а именно, снизить массогабаритные размеры исследуемых узлов и уменьшить амплитуды виброперемещений ротора в подшипниках;

***введен*** новый вариационный принцип, основанный на обобщении вариационного принципа Лагранжа в гидродинамике, позволяющий учитывать действие

массовых сил, в том числе электромагнитной природы, и расширяющий применимость вариационных подходов для решения задач о течениях сред сложной реологии в каналах переменной геометрии;

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

***доказаны:***

- влияние приложенного электромагнитного поля на интегральные характеристики магнитореологических опор жидкостного трения;
- эффект смещения критических частот роторной системы на магнитореологических подшипниках жидкостного трения посредством управления электромагнитным актуатором;

***применительно к проблематике диссертации результативно использованы*** гидродинамическая теория смазки, базовые положения магнитной гидродинамики, динамики твёрдого тела, теории планирования и проведения экспериментов.

***изложены:***

- классификация магнитореологических подшипников жидкостного трения, основанная на комплексе новых технических решений подшипниковых узлов с различным расположением источников электромагнитного поля;
- результаты анализа траекторий ротора на магнитореологических подшипниках скольжения путем решения уравнений движения и аппроксимации реакций гидродинамического смазочного слоя;
- решение краевой задачи с использованием уравнений гидродинамики с учетом соотношений для турбулентности и кавитации, уравнений электромагнетизма;
- основные положения нового обобщенного вариационного принципа Лагранжа, позволяющего учитывать неньютоновские свойства жидкостей и действие массовых сил, в том числе, электромагнитной природы;

***изучены:***

- влияние приложенного электромагнитного поля на грузоподъемность и энергетические характеристики магнитореологических подшипников жидкостного трения;
- основные закономерности изменения жесткости и демпфирования смазочного слоя от геометрических и рабочих параметров магнитореологических подшипников жидкостного трения;
- принципы построения траекторий движения центра масс ротора путем решения уравнений движения твердых тел.

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

**использование** полученных теоретических уравнений для определения полей давлений и скоростей в смазочном слое подшипников жидкостного трения, смазываемых магнитореологическими жидкостями, позволяет определять их интегральные и динамические характеристики с учетом неньютоновских свойств смазочных материалов и действия электромагнитных сил;

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

- комплекс математических моделей роторных систем на опорах скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями, а также программные реализации данных моделей по расчету грузоподъемности, динамических коэффициентов, траекторий движения, критических частот и амплитудно-частотных характеристик магнитореологических подшипников жидкостного трения;
- экспериментальный стенд по исследованию интегральных и динамических характеристик магнитореологических подшипников жидкостного трения с современной информационно-измерительной системой, позволяющей в режиме реального времени фиксировать виброперемещения ротора, частоту вращения и управлять характеристиками электромагнитного актуатора;
- рекомендации по проектированию роторных систем с магнитореологическими подшипниками скольжения, а также демпфирующих элементов роторных систем;

**определены** особенности взаимовлияния гидродинамических и электромагнитных сил в магнитореологических подшипниках жидкостного трения с выходом на количественные характеристики несущей способности, коэффициента трения, коэффициентов жёсткости и демпфирования, а также собственных частот роторных систем на магнитореологических подшипниках жидкостного трения;

**созданы:**

- качественные и количественные обоснования целесообразности применения магнитореологических жидкостей в качестве смазочного материала подшипников жидкостного трения;
- опытный образец магнитореологической опоры скольжения. Экспериментально доказана работоспособность предложенного технического решения и преимущества по сравнению с конструкциями, включающими подшипники жидкостного трения;

**представлена** методика расчета грузоподъемности, коэффициента трения, динамических коэффициентов жесткости и демпфирования магнитореологических подшипников жидкостного трения, собственных частот, амплитудно-частотных характеристик роторных систем на подшипниках скольжения, смазываемых магнитореологическими жидкостями;

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**



*для экспериментальных работ* результаты получены на сертифицированном оборудовании, обоснованы калибровки разработанных экспериментальных стендов и установок, показана хорошая сходимости результатов теоретических расчётов и экспериментальных данных;

*теория*, построенная с использованием известных, проверяемых данных, корректно согласуется с опубликованными ранее другими исследователями и собственными экспериментальными данными;

*идея базируется* на обобщении передового отечественного и зарубежного опыта в области опорных узлов роторов на магнитореологических подшипниках жидкостного трения;

*использовано сравнение* результатов данного исследования с результатами, полученными ранее другими исследователями;

*установлено*, что результаты диссертационного исследования не противоречат научным исследованиям в области моделирования мультифизических систем и проектирования опорных узлов роторов, и дополняют их в части подхода к описанию функционирования различных видов магнитореологических 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: 1) анализ теоретических положений и существующих решений в области магнитореологических подшипниковых узлов скольжения; 2) разработку математических моделей расчета интегральных и динамических характеристик магнитореологических подшипников жидкостного трения; 3) разработку экспериментальных стендов и проведение физических экспериментов; 4) обработку и интерпретацию экспериментальных данных; 5) подготовку основных публикаций по выполненной работе; 6) формулирование положений, выводов и результатов диссертационного исследования.

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

На заседании 22 сентября 2022 года диссертационный совет за решение научной задачи, имеющей значение для развития теории гидродинамики роторных систем на опорах жидкостного трения, смазываемых средами сложной реологии, принял решение присудить Фетисову А.С. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности 2.5.2. Машиноведение (технические науки), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту - 0 человек, проголосовали: за – 16 человек; против – 0 человек; недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

24.2.353.02,

доктор технических наук,  
профессор

Голышков Вячеслав Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.353.02,

кандидат технических наук

Кожус Ольга Геннадьевна

Дата: 22.09.2022 г.

