

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального  
государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский  
центр ИПМ им.М.В.Келдыша РАН»  
член-корр.РАН Аптекарев А.И.

ФИО

подпись

« 12 » марта 2018 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН»  
(ФГУ «ФИЦ ИПМ им.М.В.Келдыша РАН)

Диссертация «Моделирование динамики ротора и выбор оптимальных конструктивных параметров малорасходного центробежного насоса» выполнена в отделе №5 «Механика космического полета и управление движением», сектор №3 «Робототехнические системы», Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр (ФГУ ФИЦ) «Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН» Федерального агентства научных организаций (ФАНО).

В период подготовки диссертации соискатель Протопопов Александр Андреевич работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика» (Э10), ассистентом, и обучался в заочной аспирантуре Федерального государственного учреждения «Федерального исследовательского центра Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН» Федерального агентства научных организаций.

В 2011 году окончил Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана по специальности «Гидромашины, гидропривода

и гидропневмоавтоматика».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2017 году Федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН» Федерального агентства научных организаций.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук Боровин Геннадий Константинович, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН» Федерального агентства научных организаций, отдел №5 «Механика космического полета и управление движением», сектор №2 «Механика и управление движением космических аппаратов», главный научный сотрудник.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

#### **Актуальность темы диссертации**

Малорасходные центробежные насосы находят все большее применение в различных отраслях промышленности, в первую очередь в космонавтике, авиации, роботостроении, с/х и т.д. При этом к современным малорасходным центробежным насосам применяются все более растущие требования по ресурсу, габаритам, массе и КПД. Малорасходные центробежные насосы бывают выполнены с различными конструктивными схемами и особенностями. В частности, можно выделить насосы с открытыми, закрытыми и полуоткрытыми рабочими колесами, с консольной или оппозитной схемой с шариковыми или гидростатическими подшипниками.

Диссертационная работа Протопопова А.А. посвящена актуальной проблеме машиностроения – разработке методики расчета малорасходных центробежных насосов и динамическому равновесию роторов таких насосов. Для этого в диссертации была разработана математическая модель динамики ротора центробежного подшипника внутри зазора в гидростатическом подшипнике. Разработанная математическая модель позволяет проверить способность ротора к самовсплыванию, определить время самовсплывания и

оценить переходный процесс этого всплытия.

Для роторов с шарикоподшипниками была разработана методика определения оптимальной частоты вращения. Для этого были найдены наиболее чувствительные к изменению критерии качества насоса – ресурс и радиальный габарит и была получена компромиссная кривая.

Для обоих случаев была разработана методика расчета основных конструктивных параметров рабочего колеса, адаптированная к малым величинам подачи рабочей жидкости.

Также была получена методика построения прогнозной напорной характеристики малорасходного центробежного насоса. Эта методика была проверена в ходе экспериментов, сделанных на опытном образце со сменными рабочими колесами, полученными методами 3D-прототипирования.

### **Цель работы**

Цель работы состояла в разработке методики расчета основных конструктивных параметров малорасходного центробежного насоса с полуоткрытыми рабочими колесами, удовлетворяющие заданным требованиям по ресурсу, габаритам, массе и КПД насоса, а также позволяющая определять динамические характеристики насоса, такие как время всплытия ротора, установившуюся угловую скорость ротора и др.

В данной работе были рассмотрены вопросы, связанные с расчетом малорасходных центробежных насосов с полуоткрытыми рабочими колесами с двумя различными конструктивными схемами – с оппозитной схемой с гидropодшипниками (рассмотрена в главе 1) и с консольной схемой с шарикоподшипниками (рассмотрена в главе 2).

При этом для насосов с гидropодшипниками одной из наиболее актуальных проблем являются вопросы, связанные с динамикой роторов в момент всплытия и выхода на установившуюся угловую скорость.

Существующие на данный момент методики расчета центробежных насосов ориентируются на относительно большие значения величины расхода, что делает их трудноприменимыми для расчета малорасходных центробежных

насосов. В силу этого в практической деятельности по разработке малорасходных центробежных насосов часто приходится прибегать к полуэмпирическим методам подбора конструктивных параметров насоса, чтобы удовлетворить заданным требованиям. Такая практика приводит к большим затратам ресурсов и времени на проектирование и изготовление насосов. Все это обуславливает необходимость создания такого алгоритма расчета малорасходного центробежного насоса, который бы позволял находить значения их конструктивных параметров за минимальное время и с минимумом затрат на промежуточные опытные образцы. При этом требуемый алгоритм расчета насоса должен быть таким, чтобы найденные с его помощью значения конструктивных параметров удовлетворяли техническим требованиям к насосам наилучшим образом.

### **Научная новизна работы**

В работе предложен оригинальный метод расчета малорасходных центробежных насосов, включающий в себя следующие новые результаты:

- 1) Исследована динамика ротора малорасходного центробежного насоса с гидростатическими подшипниками. Результаты исследования дают возможность оценить способность к самовсплытию ротора, спрогнозировать время всплытия, получать переходные процессы угловой скорости и высоты всплытия ротора.
- 2) Разработан новый метод выбора частоты вращения вала центробежного насоса, основанный на поиске компромисса между радиальным габаритом рабочего колеса и ресурсом насоса.
- 3) Разработана методика определения оптимальных основных конструктивных параметров полуоткрытого рабочего колеса малорасходного центробежного насоса.

### **Практическая значимость**

Разработанный метод позволяет осуществить расчет малорасходных центробежных насосов для ряда отраслей промышленности. При этом

разработанный метод позволяет решить следующие задачи, возникающие в при проектированию насосов:

- 1) Оценить и, если требуется, улучшить динамические характеристики насоса.
- 2) Выбрать такую частоту вращения вала насоса, которая в наибольшей степени отвечала бы компромиссу ресурса и габаритов насоса на начальной стадии проектирования насоса, что в свою очередь существенно облегчает задачу выбора наиболее эффективного электродвигателя для насоса.
- 3) Позволяет достигать максимально возможного напора в рамках заранее определенных габаритов рабочего колеса, что в свою очередь влияет на полезную мощность и как следствие на КПД насоса.
- 4) Позволяет определить прогнозную характеристику малорасходного центробежного насоса с большей степенью точности в силу учета специфики таких насосов.

**Достоверность** полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации, обеспечивается адекватностью полученных моделей и методик решения существующим данным, проверкой разными методами, а также соответствием полученных расчетно-теоретических результатов исследованиям других авторов.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждены на следующих конференциях:

- 1) Доклад на конференции «Молодежь. Техника. Космос.» в БГТУ им. Д.Ф. Устинова, 2012 г.
- 2) Доклад на конференции «Современные проблемы прикладной математики и информатики», г. Дубна, 2014 г.
- 3) Доклад на конференции 100 лет кафедре «Гидромашины гидропривода и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014г.

- 4) Доклад на кафедре гидромеханике МГТУ им.Н.Э. Баумана в г. Калуга, 2015 г.
- 5) Доклад на конференции на кафедре «Гидромашины гидропривода и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016г, на тему:«Исследование динамического равновесия ротора центробежного насоса с гидростатическими подшипниками».

#### **Основные публикации.**

По результатам работы имеются 18 печатных работ [1-18] из них 5 в рецензируемых журналах Перечня ВАК [14-18].

1. Боровин Г.К., Протопопов А.А. Расчет оптимального числа лопаток рабочего колеса центробежного насоса// Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г.
2. Боровин Г.К., Протопопов А.А. Расчет оптимального числа лопаток рабочего колеса центробежного насоса// Инженерный вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г.
3. Протопопов А. А., Киляков А. А. Экспериментальный поиск оптимального диаметра входа в рабочее колесо малорасходного центробежного насоса// Молодежный научно-технический вестник # 11, ноябрь 2015 г.
4. Протопопов А. А., Абдрахманова Ж. С., Яворовский Е. А. Исследование зависимости момента на валу от рабочих характеристик малорасходного центробежного насоса // Молодежный научно-технический вестник # 09, сентябрь 2015
5. Протопопов А.А. Гриднев Д.В. Экспериментальный поиск оптимального угла установки лопасти на выходе из полуоткрытого рабочего колеса малорасходного центробежного насоса с кольцевым отводом// Молодежный научно-технический вестник # 03, март 2016
6. Протопопов А. А., Шульжицкий А. А. Исследование влияния питающего напряжения на максимальный напор центробежного насоса// Молодежный научно-технический вестник # 03, март 2016

7. Протопопов А.А., Захарова Е.В. Динамика малых колебаний низкоинерционного ротора малорасходного центробежного насоса с гидростатическими подшипниками// Политехнический молодежный журнал 2017 .- №5
8. Протопопов А.А., Корсакова С.А. Получение зависимости установившейся угловой скорости от различных параметров насоса при сильных колебаниях ротора//Политехнический молодежный журнал 2017 .- №4
9. Протопопов А.А., Виговский В.И. Многокритериальная оптимизация высокооборотного центробежного насоса//Политехнический молодежный журнал 2017 .- №5
10. Протопопов А.А., Якович С.М. Построение компромиссной кривой «ресурс–КПД» для центробежного насоса с помощью метода ЛП-тау поиска// Политехнический молодежный журнал 2017 .- №4
11. Протопопов А.А., Виговский В.И. Анализ работы центробежного насоса в составе системы с изменяющимися параметрами//Политехнический молодежный журнал 2017 .- №11
12. Протопопов А.А., Корсакова С.А. Исследование динамики ротора центробежного насоса с гидростатическими подшипниками численными методами//Политехнический молодежный журнал 2017 .- №11
13. Боровин Г.К., Протопопов А.А. Расчет оптимального осевого зазора полуоткрытого рабочего колеса центробежного малорасходного насоса системы терморегулирования космического аппарата // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. №86. 16 с.
14. Протопопов А.А. Расчёт оптимальных параметров полуоткрытого рабочего колеса центробежного малорасходного насоса // Известия МГТУ «МАМИ» №4 (26), 2015 г.
15. Боровин Г.К., Петров А.И., Протопопов А.А. Методика и алгоритм определения основных конструктивных параметров малорасходного центробежного насоса // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. №63. 16 с.

16. Протопопов А.А. Методика построения прогнозной напорной характеристики центробежного насоса// Научное обозрение 2016. №13. 6 с.
17. Боровин Г.К., Петров А.И., Протопопов А.А., Исаев Н.Ю. Динамика роторов малорасходных центробежных насосов с гидростатическими подшипниками и приводом от электродвигателей постоянного тока// Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. №142, 24 с.
18. Протопопов А.А., Захарова Е.В., Виговский В.И., Корсакова С.А., Мельничук Е.С., Якович С.М. Определение времени самовсплыва ротора центробежного насоса системы терморегулирования космического аппарата // Научное обозрение 2017. №11. 5 с.

### **Заключение**

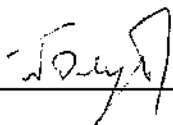
Диссертационная работа Протопопова Александра Андреевича «Моделирование динамики ротора и выбор оптимальных конструктивных параметров малорасходного центробежного насоса» является самостоятельной, завершенной, научно-квалификационной работой, содержащей новое решение задачи моделирования динамики и проектирования малорасходных центробежных насосов широко применяемых в робототехнике, космонавтике, авиации и других отраслей машиностроения, соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Тема диссертации раскрыта и правильно отражена в ряде опубликованных работ, результаты которых были представлены на российских и международных конференциях.

Диссертационная работа Протопопова А.А. «Моделирование динамики ротора и выбор оптимальных конструктивных параметров малорасходного центробежного насоса» соответствует требованиям кандидатской диссертации по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и рекомендуется к защите по этой специальности на соискание ученой степени кандидата физико-математических.



Заключение принято на заседании семинара отдела №5 «Механика космического полета и управление движением». Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №4 от «12» октября 2017 г.



Голубев Юрий Филиппович, д.ф.-м.н.,  
профессор, отдел №5 «Механика  
космического полета и управление  
движением», заведующий отделом