

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Есипенко Ивана Александровича «Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконно-оптического гироскопа с целью минимизации его теплового дрейфа», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**Характеризуя диссертацию И.А. Есипенко в целом, следует отметить, что данная работа посвящена численному моделированию и экспериментальному исследованию кажущейся угловой скорости (теплового дрейфа), возникающей в волоконно-оптическом гироскопе при действии нестационарной тепловой нагрузки на его контур. В качестве инструмента для оценки величины теплового дрейфа автор строит математическую модель, включающую в себя функционал кажущейся угловой скорости и несвязанную квазистационарную задачу термоупругости в осесимметричной постановке, которую решает методом конечных элементов. Для экспериментального исследования изготавливается специальная оснастка. В работе последовательно рассматриваются три схемы намотки волоконного контура, в результате чего, в работе И.А. Есипенко удалось существенно снизить амплитуду теплового дрейфа. Следует отметить, что все расчетные значения кажущейся угловой скорости в работе достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.**

### **Актуальность темы диссертации**

Существенной проблемой для разработчиков волоконно-оптического гироскопов является возникновение теплового дрейфа, который значительно снижает точность прибора. Поэтому для оценки эффективности принимаемых конструкторских решений, направленных на минимизацию теплового дрейфа, разработчикам необходим соответствующий инструмент. Несмотря на большое количество работ по данной тематике, до сих пор в

полной мере не разработана методика для решения этой актуальной задачи. Таким образом, построение математической модели теплового дрейфа, ее реализация и экспериментальная верификация, является актуальной задачей, которой и посвящена диссертационная работа И.А. Есипенко.

**Достоверность** результатов математического моделирования, полученных в диссертационной работе, не вызывает сомнений. Это связано с использованием полной нестационарной термоупругой постановкой задачи, детальным учетом микронеоднородных физико-механических свойств волоконного контура и максимально полной структурой функционала теплового дрейфа, учитывающего термооптический и упругооптический эффекты. Однако, главное, что подтверждает достоверность – это согласование численных расчетов с экспериментальными данными.

Обсуждая **практическую значимость** полученных И.А. Есипенко результатов работы, следует отметить, что автором разработана комплексная методика расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при действии нестационарной тепловой нагрузки, которая позволяет на этапе проектирования прибора определять величину кажущейся угловой скорости и оценивать применяемые конструкторские решения. Данная методика внедрена в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

К основным результатам, полученным соискателем, определяющим **научную новизну** и значимость работы, следует отнести:

- построена, численно реализована и подтверждена экспериментом математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, включающая функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты и квазистационарную задачу термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств волоконного контура;
- реализована методика изучения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа с использованием приспособления бескаркасного

крепления волоконного контура, конструкция которого минимизирует возмущение напряженно-деформированного состояния волоконного контура от сопряжения с корпусными деталями;

– разработан метод верификации упругих деформаций на уровне волокна, исключающий собственное напряженно-деформированное состояние волоконного контура, в рамках построенной модели при стационарном температурном воздействии с использованием оптического импульсного анализатора;

– выявлены качественные и количественные различия составляющих функционала теплового дрейфа в зависимости от особенностей намотки волоконного контура.

### **Общая характеристика работы**

**В первой главе** содержится аналитический обзор научной литературы по теме диссертационного исследования, а именно, описываются существующие математические модели и пути снижения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, рассматривается экспериментальная верификация, приводится анализ недостатков.

**Во второй главе** автор представляет математическую модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при нестационарном тепловом воздействии на волоконный контур, установленный в специально спроектированное приспособление. Для чего строится функционал кажущейся угловой скорости при воздействии температуры и упругих деформаций на изменение длины и показателя преломления светопроводящей жилы оптического волокна и формулируется начально-краевая несвязанная квазистационарная задача термоупругости с детальным учетом физико-механических свойств составляющих волоконного контура.

**В третьей главе** проводится комплексное исследование теплового дрейфа для модифицированной квадрупольной схемы намотки волоконного контура. С помощью дополнительных стационарных и нестационарных испытаний модели уточняются коэффициент Пуассона первичного покрытия

и коэффициент теплоотдачи между оснасткой и окружающей средой. Представлены результаты расчета составляющих кажущейся угловой скорости и суммарный тепловой дрейф в сравнении с экспериментальными данными. Выявлены недостатки рассмотренной схемы намотки.

**Четвертая глава** посвящена реализации рациональных конструкторских решений с целью минимизации теплового дрейфа. Автором рассмотрены еще две схемы намотки волоконного контура. Тепловой дрейф для каждой из схем был посчитан и экспериментально верифицирован. В результате проведенных исследований И.А. Есипенко удалось на порядок снизить величину теплового дрейфа.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

**Автореферат диссертации** соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, ее цели и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

**Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

Основное содержание диссертационной работы, ее главные идеи и результаты в полной мере опубликованы в трех рецензируемых российских журналах из рекомендованного ВАК перечня, специализирующихся на приборостроительной тематике, механике деформируемого твердого тела и вычислительным методам.

Однако, диссертация Есипенко И.А. не лишена недостатков. К ним, на мой взгляд, можно отнести:

1. В диссертации сделано предположение, что в оптическом волокне физико-механические свойства жилы нагружающих стержней и оболочки слабо отличаются друг от друга. Поэтому оптическое волокно представлено в виде однородного изотропного тела со свойствами чистого кварцевого

стекла. Однако, на самом деле это анизотропное тело на основе композиционных материалов со сложным характером теплопроводности.

2. В работе не приведено обоснование выбора числа датчиков температуры в эксперименте (их всего два), требуемой точности измерения температуры и места их размещения на приспособлении (рис. 2.3).

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Но, не смотря на указанные замечания, которые не снижают ценности проведенных исследований, диссертационная работа Есипенко И.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне.

Диссертация Есипенко Ивана Александровича «Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконно-оптического гироскопа с целью минимизации его теплового дрейфа» соответствует всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор Есипенко Иван Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Официальный оппонент, доктор технических наук по специальности 05.11.03 «Приборы навигации», профессор, заведующий лабораторией анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН)



Панкратов Владимир Михайлович

Почтовый адрес: 410028, Саратов, ул. Рабочая, 24.

Телефон: +7 (8452) 22-23-76. Факс: +7 (8452) 22-23-40.

Адрес эл. почты: [iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru).

Подпись д.т.н., профессора Панкратов Владимира Михайловича заверяю

Ученый секретарь ИПТМУ РАН, д.т.н.



Иващенко Владимир Андреевич