Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Есипенко Иван Александрович

ПОСТРОЕНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНТУР ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ЕГО ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., доцент
Келлер Илья Эрнстович

Пермь – 2017

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. ТЕПЛОВОЙ ДРЕЙФ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ 14
1.1 Причина возникновения теплового дрейфа и подходы к его минимизации 14
1.2 Математические модели теплового дрейфа, учитывающие термооптический эффект 16
1.3 Математические модели теплового дрейфа, учитывающие упругооптический эффект 24
1.4 Экспериментальное подтверждение результатов моделирования теплового дрейфа 33
1.5 Анализ недостатков существующих работ 36
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕГО КОНТУР 38
2.1 Формулировка наиболее полного функционала кажущейся угловой скорости 38
2.2 Приспособление для исследования теплового дрейфа волоконного контура 42
2.3 Математическая формулировка квазистационарной задачи термоупругости в структурно-неоднородной постановке 43
2.4 Известные количественные данные модели 47
2.5 Алгоритм расчета кажущейся угловой скорости 49
2.6 Выводы по главе 51
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ СХЕМЫ НАМОТКИ ВОЛОКОННОГО КОНТУРА 53

3.1 Расчет упругих деформаций в контуре и их экспериментальное подтверждение при стационарном температурном воздействии 54
3.2 Расчет температур в контрольных точках и их сравнение с показаниями термодатчиков при нестационарном тепловом воздействии 63
3.3 Расчет полей температур и деформаций при воздействии нестационарной тепловой нагрузки 67
3.4 Изучение относительного вклада компонент функционала теплового дрейфа и экспериментальная верификация..... 70
3.5 Выводы по главе 75
ГЛАВА 4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА..... 76
4.1 Оригинальная квадрупольная схема намотки волоконного контура 76
4.2 Изменения геометрических параметров волоконного контура с оригинальной квадрупольной схемы намотки..... 81
4.3 Октупольная схема намотки волоконного контура..... 81
4.4 Чередование витков в слое..... 86
4.5 Выводы по главе 89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 92

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Волоконно-оптические гироскопы широко используются в системах стабилизации, управления и навигации. Значительные усилия разработчиков в настоящее время направлены на устранение кажущейся угловой скорости (дрейфа) при нестационарном тепловом воздействии на контур волоконно-оптического гироскопа, которая является барьером для повышения точности прибора. Снижения влияния температуры на гироскоп добиваются конструкторскими решениями на этапе проектирования и последующей алгоритмической компенсацией выходного сигнала методами теории автоматического управления. Конструкторский этап представляется наиболее важным. Для оценки эффективности конструкции прибора требуется надежный инструмент в виде математической модели теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, обусловленного его термоупругим поведением в условиях нестационарного теплового воздействия, ее численной реализации и методики ее экспериментальной верификации.

Принцип действия волоконно-оптического гироскопа основан на эффекте Саньяка: разность фаз (фаза Саньяка) двух световых волн, распространяющихся по волоконному контуру в противоположных направлениях, пропорциональна угловой скорости вращения. При внешнем нестационарном тепловом воздействии неравномерность нагрева/охлаждения волоконного контура ведет к неоднородному изменению длины и показателя преломления жилы волокна, вследствие чего изменяется время пробега каждой из встречных волн по контуру и появляется фаза Саньяка (кажущаяся угловая скорость).

В 1980 г. D.M. Shupe [75] построил функционал кажущейся угловой скорости, в котором искажение фазы Саньяка связывается с изменением температуры в жиле оптического волокна (термооптический эффект). В рамках данного подхода авторы А.В. Голиков, Д.С. Громов, В.Э. Джашитов, В.М Панкратов, Е.В. Панкратова, А.В. Шарков минимизировали тепловой дрейф выравниванием нестационарных тепловых полей в контуре волоконно-оптического гироскопа, используя численное решение нестационарной задачи теплопроводности [16, 17, 19, 20, 28]. A.M. Курбатов, Р.А. Курбатов, J. Euverte, W. Gao, Z. Gao, X. Li, W. Ling, C.M. Lofts, F. Mohr, M. Parker, P.B. Ruffin, C.C. Sung, O. Tirat, Y. Wei, Z. Xu, Y. Zhang, исследовали влияние различных схем намотки волоконных контуров на тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа [33, 34, 50, 51, 54, 58, 59, 60, 61, 62, 66, 77, 87, 90].

В 1996 г. O. Tirat и J. Euverte [77] дополнили функционал кажущейся угловой скорости механизмом, в котором искажение фазы Саньяка связывается с напряженно-деформированным состоянием в жиле оптического волокна (упругооптический эффект). Для моделирования теплового дрейфа в рамках данных представлений требуется постановка нестационарной задачи термоупругости. При численном решении данной задачи авторы F. Mohr, S. Ogut, B. Osunluk, E. Ozbay, F. Schadt [67, 68, 70, 71, 74] представляли волоконный контур однородным трансверсально-изотропным телом, а авторы Е.И. Вахрамеев, К.С. Галягин, М.А. Ошивалов, М.А. Савин, Ю.А. Селянинов, W. Ling, Y. Wei, R. Willig, Z. Xu, Z. Zhang [10, 13, 14, 15, 60, 81] рассматривали структурно-неоднородное сечение контура. В своих работах [7, 24, 25, 48] М.А. Барулина, В.Э. Джашитов В.М. Панкратов исследуют интенсивности напряжений в контуре для определения температурных погрешностей волоконно-оптического гироскопа.

Анализ существующих работ выявил следующие недостатки, лимитирующие эффективность методики снижения теплового дрейфа средствами математического моделирования:

– отсутствие качественного и количественного анализов вкладов каждого из эффектов в тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа и методики их экспериментального подтверждения;

– отсутствие исследования теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, в котором контур лишен сопрягаемых конструктивных особенностей, приводящих к неоднородному тепловому и напряженно-деформированному состоянию;

– отсутствие экспериментальных подтверждений напряженно-деформированного состояния в жиле волокна при действии тепловой нагрузки;

– отсутствие экспериментальных подтверждений решения нестационарной задачи теплопроводности;

– при учете влияния упругооптического эффекта решается тепловая, а не термоупругая задача;

– не ведется детальный учет физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

Не найдено ни одной работы, в которой бы отсутствовали все выписанные выше недостатки, а, следовательно, существующие подходы в полной мере не могут быть использованы в качестве инструмента для снижения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа.

Целью исследования является комплексное изучение закономерностей теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, вызванного нестационарным тепловым воздействием, для повышения его точности. Для этого выполняется построение и численная реализация математической модели дрейфа волоконно-оптического гироскопа, обусловленного его термоупругим поведением в условиях нестационарного теплового воздействия, и создается методика ее

экспериментальной верификации. Данный инструмент используется для рациональных конструкторских решений обеспечивающих снижение и предсказуемость теплового дрейфа.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**:

1. Выбор максимально полного функционала теплового дрейфа, учитывающего все возможные механизмы его возникновения.

2. Разработка методики экспериментального исследования теплового дрейфа, включая проектирование приспособления для бескаркасного крепления волоконного контура.

3. Формулировка и численная реализация задачи нестационарного термоупругого поведения волоконного контура в приспособлении с детальным учетом физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

4. Идентификация параметров модели с помощью стационарных и нестационарных испытаний.

5. Качественный и количественный анализ составляющих функционала кажущейся угловой скорости.

6. Выбор рациональных конструкторских решений для минимизации теплового дрейфа с помощью построенной модели и его экспериментальное подтверждение.

Научная новизна

– впервые построена, численно реализована и подтверждена экспериментом комплексная математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, включающая нестационарные уравнения термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств волоконного контура и функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты;

– 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.

Практическая значимость работы заключается в разработке комплексной методики 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».

Методология и методы исследования: уравнения линейной нестационарной теории термоупругости, функционал теплового дрейфа, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты, программируемая термокамера ESPEC TABAI MC-711, аттестованное технологическое оборудование для приема и обработки информации, оптический импульсный анализатор BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, метод конечных элементов, лицензионные пакеты прикладных программ ANSYS Mechanical APDL 17.2, MATLAB R2014b, Microsoft Excel 2010.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, включающая нестационарные уравнения термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств волоконного контура и функционал кажущейся угловой скорости, учитывающий термооптический и упругооптический эффекты.

2. 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.

3. 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. Идентификация коэффициента Пуассона первичного покрытия волокна на основе данного метода.

4. Результаты идентификации коэффициента теплопередачи между приспособлением и окружающей средой с учетом конвекции в термокамере.

5. Качественные и количественные различия составляющих функционала теплового дрейфа в зависимости от особенностей намотки волоконного контура.

6. Результаты численных и экспериментальных исследований теплового дрейфа с различными схемами намотки, рациональные решения конструкции волоконно-оптического гироскопа.

Достоверность результатов обеспечивается полной нестационарной термоупругой постановкой задачи, детальным учетом неоднородных физико-механических свойств волоконного контура, максимально подробной структурой функционала теплового дрейфа, подтверждением численных расчетов данным серии экспериментов, специально организованных в ПАО «Пермская научно-

производственная приборостроительная компания». Избыточность системы выполненных экспериментов подтверждает внутреннюю непротиворечивость разработанной модели.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались соискателем лично на конференциях:

– XX Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 13 – 16 февраля 2017 г.);

– X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела (Самара, 18 – 22 сентября 2017 г.);

– Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2017 (Пермь, 03 – 06 октября 2017 г.).

Диссертационная работа обсуждалась на семинарах кафедры «Динамика и прочность машин» (академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеенко) и на научно-технических советах ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Лично автором предложено и спроектировано приспособления для изучения теплового дрейфа волоконных контуров, выбран функционал кажущейся угловой скорости и выполнена его реализация в пакете MATLAB, сформулирована математическая постановка нестационарной задачи термоупругости, организованы сборка и испытания волоконных контуров в приспособлении, установлены количественные параметры модели и предложены методы их идентификации, осуществлены постановка и контроль численного решения задач. Численные эксперименты с использованием пакета ANSYS выполнены Д.А. Лыковым.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них [1–3] в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения по результатам исследования. Объем диссертации

составляет 103 страницы и содержит 56 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 91 наименования.

Во **введении** показана актуальность комплексного исследования теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при нестационарном температурном воздействии на волоконный контур, формулируются цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечисляются методы исследования, отмечается личный вклад автора, представляются положения, выносимые на защиту, описываются апробация результатов и структура диссертации.

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.

Вторая глава посвящена построению математической модели теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа при нестационарном тепловом воздействии на волоконный контур, установленный в специально спроектированное приспособление. В разделе 2.1 строится функционал кажущейся угловой скорости при воздействии температуры и упругих деформаций на изменение длины и показателя преломления светопроводящей жилы оптического волокна. В разделе 2.2 описывается конструкция приспособления для теоретического и экспериментального исследования теплового дрейфа, которая обеспечивает осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями. В разделе 2.3 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. Для верификации упругих деформаций решена стационарная задача термоупругости с однородным полем температуры. С помощью оптического импульсного анализатора экспериментально установлены сдвиги бриллюэновских частот на двух температурах, из которых получено распределение деформаций. Сопоставление расчетных и экспериментальных деформаций позволило уточнить коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия волоконного контура. Для определения коэффициента теплоотдачи между деталями приспособления и принудительно движущимся воздухом в термокамере решение нестационарной задачи теплопроводности сравнивается с экспериментальными данными с двух датчиков температуры, установленных в оснастке. Для определения скоростей температур и деформаций, входящих в функционал кажущейся угловой скорости, решается квазистационарная задача термоупругости. Представлены результаты расчета составляющих кажущейся угловой скорости и суммарный тепловой дрейф в сравнении с экспериментальными данными.

Четвертая глава посвящена минимизации теплового дрейфа. На первом этапе изменена схема намотки на оригинальную квадрупольную, в которой равноудаленные от центра световода участки располагаются вплотную друг к другу, приведен расчет теплового дрейфа в сравнении с экспериментальными данными. На втором этапе изменена геометрия волоконного контура, произведен расчет максимальных амплитуд дрейфа. На третьем этапе изменена схема намотки на октупольную, представлены расчетные и экспериментальные данные теплового дрейфа.

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

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору кафедры динамики и прочности машин «ПНИПУ» Келлеру Илье Эрнстовичу за обсуждение результатов, консультации и рекомендации по написанию работы. За постоянную поддержку исследований автор выражает благодарность заместителю генерального директора по науке ПАО «ПНППК» Субботину Александру Владимировичу и главному конструктору волоконно-оптических гироскопов ПАО «ПНППК» Парфенову Александру Степановичу. За помощь в реализации вычислительных экспериментов автор признателен инженеру-конструктору ПАО «ПНППК» Лыкову Даниилу Андреевичу. За помощь в проведении экспериментальных работ автор благодарит мастера участка ПАО «ПНППК» Усову Юлию Александровну и инженера-технолога ПАО «ПНППК» Кичанова Даниила Владимировича.

ГЛАВА 1. ТЕПЛОВОЙ ДРЕЙФ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Причина возникновения теплового дрейфа и подходы к его минимизации

Волоконно-оптический гироскоп есть оптико-электронный прибор для измерения угловой скорости объекта, на котором он установлен [36, 40, 41, 42, 56]. Высокая точность измеряемых угловых скоростей позволяет использовать его в качестве чувствительного элемента вращения в системах стабилизации, управления и навигации [32]. Принцип действия волоконно-оптического гироскопа основан на эффекте Саньяка: разность фаз (фаза Саньяка) двух встречно распространяющихся световых волн по волоконному контуру при его вращении вокруг оси, пропорциональна угловой скорости вращения [72, 73]. В эксплуатации при действии нестационарной температурной нагрузки точность прибора снижается, т.к. появляется кажущаяся угловая скорость (тепловой дрейф) волоконно-оптического гироскопа [4].

Схема возникновения теплового дрейфа достаточно проста и заключается в следующем. В одно и то же время встречно распространяющиеся световые волны (Рис.1.1) проходят разные участки волокна, встречаясь в середине контура ($L/2$). При нестационарном неоднородном нагреве (например, в точке A) волоконного контура происходят неравномерные изменения показателя преломления и длины волокна. Таким образом, каждая из световых волн будет иметь свое время прохода по контуру. Появление временной разницы приводит к появлению фазы Саньяка, т.е. кажущейся угловой скорости. Необходимо отметить, что чем дальше от середины контура (центра симметрии) расположен участок волокна, тем больший вклад в кажущуюся угловую скорость он вносит, т.к. за большее время между проходами волн происходит большее изменение светового пути.

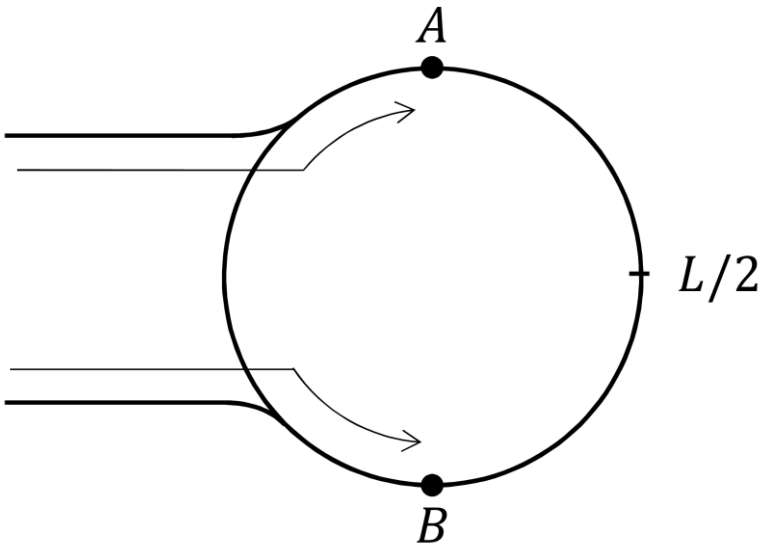

Рис. 1.1. Схема распространения световых волн.

Одним из подходов для борьбы с тепловым дрейфом является алгоритмическая компенсация выходного сигнала в режиме реального времени с использованием показаний термодатчиков установленных на приборе [2, 5, 9, 11, 12, 29, 31, 37, 79]. Другим важным подходом является конструктивное снижение исходного теплового дрейфа на этапе проектирования волоконно-оптического гироскопа. Чем ниже величина исходного дрейфа, тем ниже нескомпенсированный дрейф, а, следовательно, точнее прибор. В существующих конструкторских решениях, принимаемых для минимизации теплового дрейфа, можно условно выделить четыре направления:

1. Термостатирование волоконно-оптического гироскопа для обеспечения постоянства температур в контуре [19, 22, 23, 26, 27, 30, 87, 90].

2. Снижение неоднородности распространения теплового поля в волоконном контуре [16, 17, 20, 21].

3. Использование схем намотки, в которых равноудаленные от середины контура участки волокна располагаются вплотную друг к другу, обеспечивая согласованность изменений показателя преломления и длины волокна. К таким

намоткам можно отнести: квадрупольную [50, 58, 66, 70, 71, 77], октупольную [51, 60], гексадекапольную [57], шахматную [34, 54, 80] и другие [58, 59, 61].

4. Использование волокна с меньшей чувствительностью к изменениям температуры [84], например, с воздушной сердцевиной [44, 47, 85].

1.2 Математические модели теплового дрейфа, учитывающие термооптический эффект

Исследованию вопроса возникновения кажущейся угловой скорости при воздействии нестационарной температуры на волоконный контур посвящено большое количество работ. В 1980 г. Shupe [75] первым построил функционал кажущейся угловой скорости Ω_T, в котором изменение фазы Саньяка связывается с разностью скоростей температур (термооптический эффект) в жиле оптического волокна для двух встречно распространяющихся световых волн:

$$\Omega_T = \frac{K_1}{LD}\left(\int_0^L \dot{T}(L-l)dl - \int_0^L \dot{T}ldl\right), \tag{1.1}$$

где $\dot{T}$ – скорость температуры, L – длина волоконного контура, D – средний диаметр волоконного контура, K_1 – коэффициент пропорциональности.

Минимизация теплового дрейфа в рамках данного представления предполагает снижение разницы скоростей температур на участках волокна, равноудаленных относительно середины контура.

В работах группы авторов (А.В. Голикова, В.Э. Джашитова, В.М Панкратова, Е.В. Панкратовой) исследуются нестационарные тепловые процессы в волоконно-оптическом гироскопе, приводящие к тепловому дрейфу. Авторы предлагают снижать тепловой дрейф посредством выравнивания тепловых полей, для чего используют два подхода: активный и пассивный. В работе [28] исследуется навигационная система с 3-мя гироскопами, для которой при воздействии

тепловой нагрузки решается нестационарная задача теплопроводности. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными установленных в приборе термодатчиков, проводится алгоритмическая компенсация выходных сигналов волоконно-оптического гироскопа, для выравнивания тепловых полей предлагается использовать тепловое шунтирование. В продолжение [28] в работах [16, 17] рассматривается отдельно волоконно-оптический гироскоп. С целью равномерного распределения температуры в контуре в тепловую модель конструкции вводятся наноматериалы на основе углерода с высокой теплопроводностью. Результаты расчета показывают снижение разницы температур в контуре. В качестве активного способа управления тепловыми полями авторы моделируют двухконтурную систему терморегулирования на модулях Пельтье [22, 23, 26, 27, 30]. С помощью такой системы удается существенно снизить разницу температур в контуре. Основным недостатком данных работ является отсутствие экспериментальных подтверждений эффективности принимаемых решений для снижения теплового дрейфа.

В работе Д.С. Громова и А.В. Шаркова [19] рассматривается навигационная система на волоконно-оптических гироскопах. Результаты расчета начально-краевой задачи теплопроводности показывают наличие разности температур в двух контрольных точках на приборе, для снижения которой было предложено рассмотреть теплоизоляцию и термостатирование системы. В следующей публикации [20] утверждается, что при использовании одной лишь теплоизоляции не удалось получить требуемого уровня точности, поэтому автор решает задачу термостабилизации системы. Термостабилизация заключается в поддержании системой регулирования стационарной температуры в контуре волоконно-оптического гироскопа по датчикам температуры. Для нагрева и охлаждения используются термоэлектрические модули (элементы Пельтье). Расчеты показывают пятикратное снижение градиентов температур в контуре, но

экспериментальных данных, подтверждающих эффективность принятых решений, нет.

F. Mohr [66] одним из первых применил функционал (1.1) для исследования различных схем намоток волоконного контура (Рис 1.2). Волоконный контур имеет длину волокна 1000 м и средний диаметр 111 мм. В качестве воздействия рассматривается постоянная подводимая тепловая мощность (Рис 1.3, а) с двумя вариантами нагрева: по внутреннему (Рис 1.3, б) и наружному (Рис 1.3, в) радиусам.

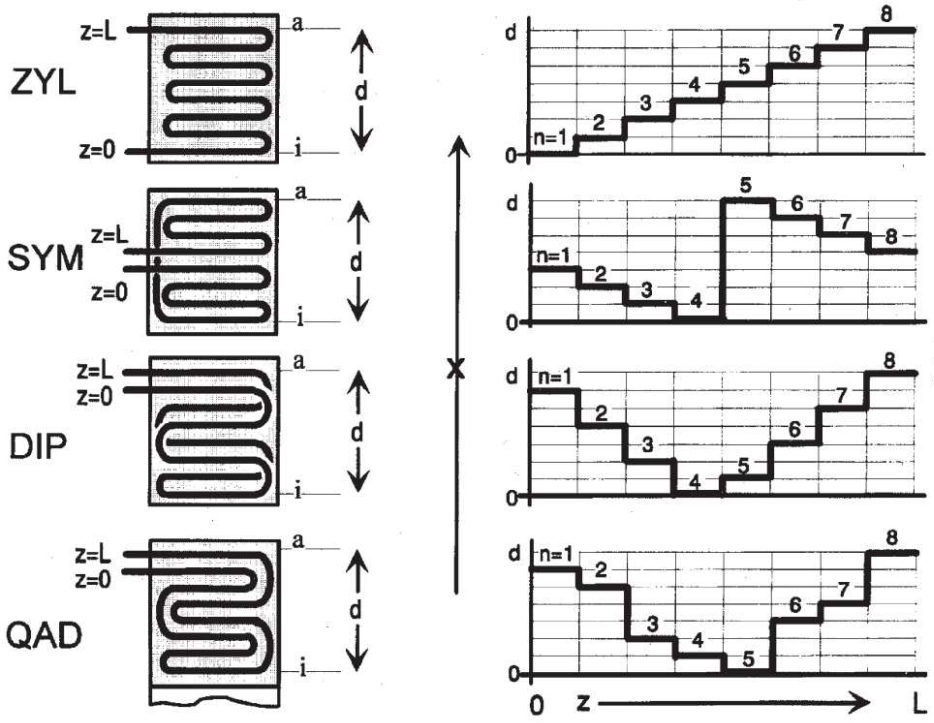

Рис. 1.2 Схемы намоток, исследуемые в [66]

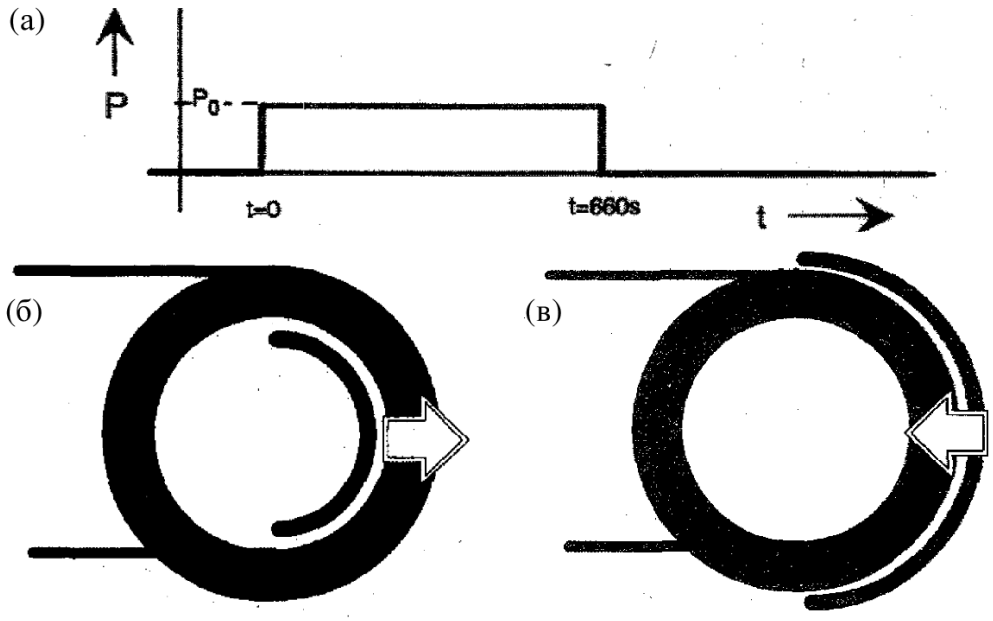

Рис. 1.3 Варианты нагрева контура, исследуемые в [66]

Для отыскания полей температур решается начально-краевая задача теплопроводности для контура с усредненными физическими параметрами. Расчет показывает, что при нагреве как по внутреннему радиусу (Рис. 1.4, а), так и по наружному радиусу (Рис. 1.4, б) квадрупольная схема «QAD» намотки имеет минимальный тепловой дрейф. Расчетные кажущиеся угловые скорости схем «ZYL» и «SYM» не изменяются при изменении места приложения тепловой нагрузки. Это объясняется тем, что данные типы намоток имеют симметрию относительно среднего диаметра контура, причем, чувствительные участки волокна намотки «ZYL» расположены ближе к местам приложения нагрузки, поэтому кажущаяся угловая скорость у нее выше, чем у схемы «SYM». Схемы «DIP» и «QAD» наоборот оказались чувствительными к месту приложения нагрузки, однако амплитуда кажущейся угловой скорости гораздо ниже, за счет того, что равноудаленные от середины контура участки волокна расположены вплотную друг к другу. Следует отметить, что автор представил только совпадение расчетных и экспериментальных температур и скоростей температур

в контрольных точках, расположенных на контуре, экспериментальное подтверждение теплового дрейфа отсутствует.

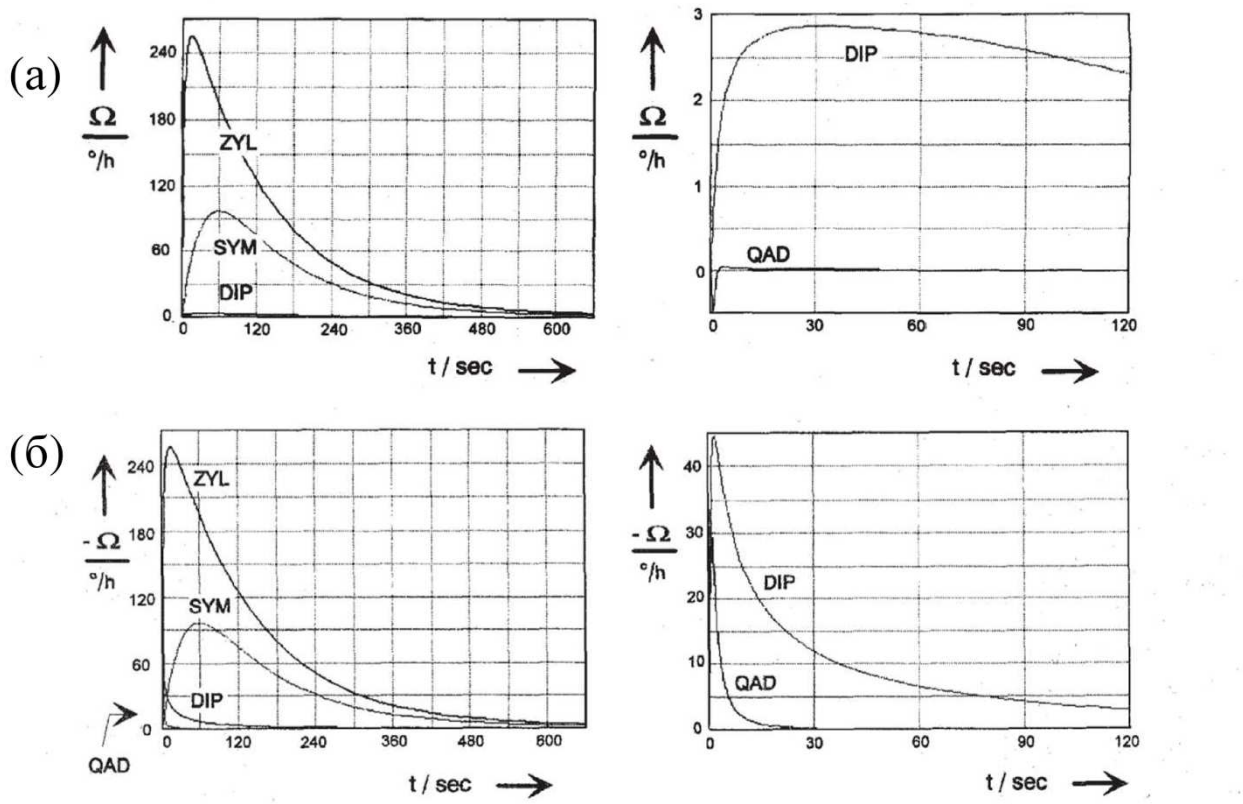

Рис. 1.4 Расчетный тепловой дрейф [66]

Авторы А.М. Курбатов и Р.А. Курбатов [33, 34, 54] для исследования кажущейся угловой скорости при действии нестационарной тепловой нагрузки на волоконный контур длиной 1000 м используют функционал (1.1). Для отыскания полей температур авторы решают осесимметричную начально-краевую задачу теплопроводности для контура с усредненными физическими параметрами. В работах [34, 54] исследование проводилось для двух схем намотки: квадрупольной и шахматной. Сначала исследуется квадрупольная схема намотки с двумя вариантами нагрева: по наружному (Рис 1.5, а) и внутреннему (Рис 1.5, б) радиусам. Результаты расчета согласуются с ранее рассмотренной работой [66] и показывают, что при радиальном потоке тепла с внешнего радиуса внутрь

контура кажущаяся угловая скорость выше. Объясняется это тем, что в квадрупольной схеме самые чувствительные участки волокна расположены у внешнего диаметра контура.

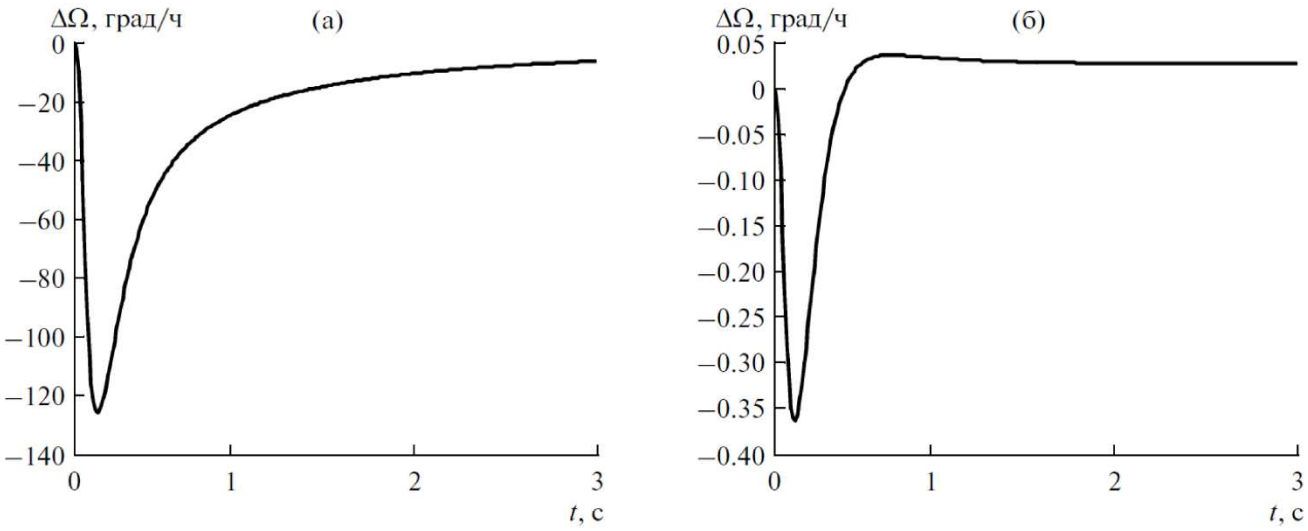

Рис. 1.5. Кажущая угловая скорость с квадрупольной схемой намотки [34, 54]

Далее авторы проводят расчет для шахматной схемы. Меняя места приложения тепловой нагрузки, сравнивают худшие получившиеся результаты между намотками. Затем волоконный контур с шахматной схемой помещается в конструкцию с теплопроводным и теплоизолирующим экранами, увеличивается на порядок теплопроводность связующего компаунда в контуре, меняется количество слоев намотки. В итоге делается вывод о превосходстве шахматной схемы, без расчета квадрупольной в модифицированных условиях. Экспериментальные подтверждения в работе отсутствуют.

Авторы Z. Gao, Y. Zhang, G. Wang, W. Gao в работе [51] с помощью функционала (1.1) исследуют тепловой дрейф для квадрупольной и октупольной схем волоконного контура длиной 1014 м. В качестве воздействия рассмотрен всесторонний нагрев контура (Рис. 1.6). Решение нестационарного уравнения теплопроводности в осесимметричной постановке для контура с усредненными

физическими параметрами и последующий расчет теплового дрейфа показал превосходство октупольной схемы намотки (Рис. 1.7).

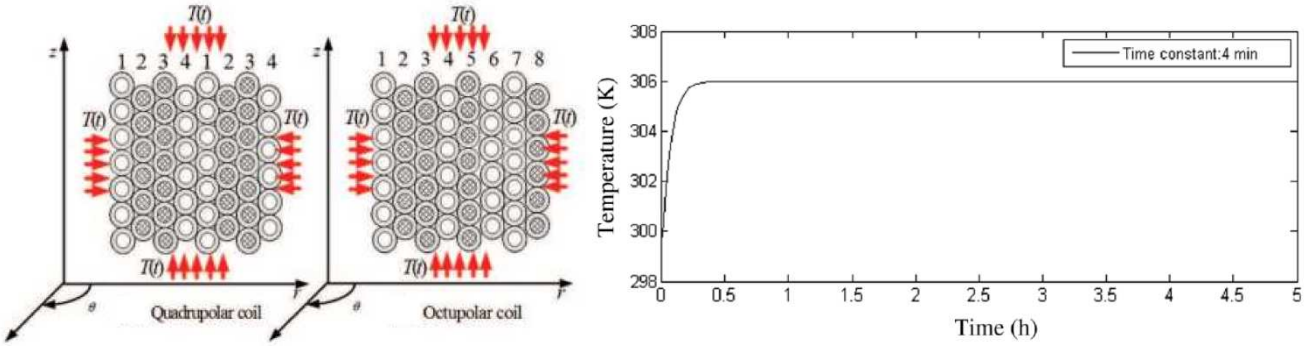

Рис. 1.6. Тепловая нагрузка на контур [51]

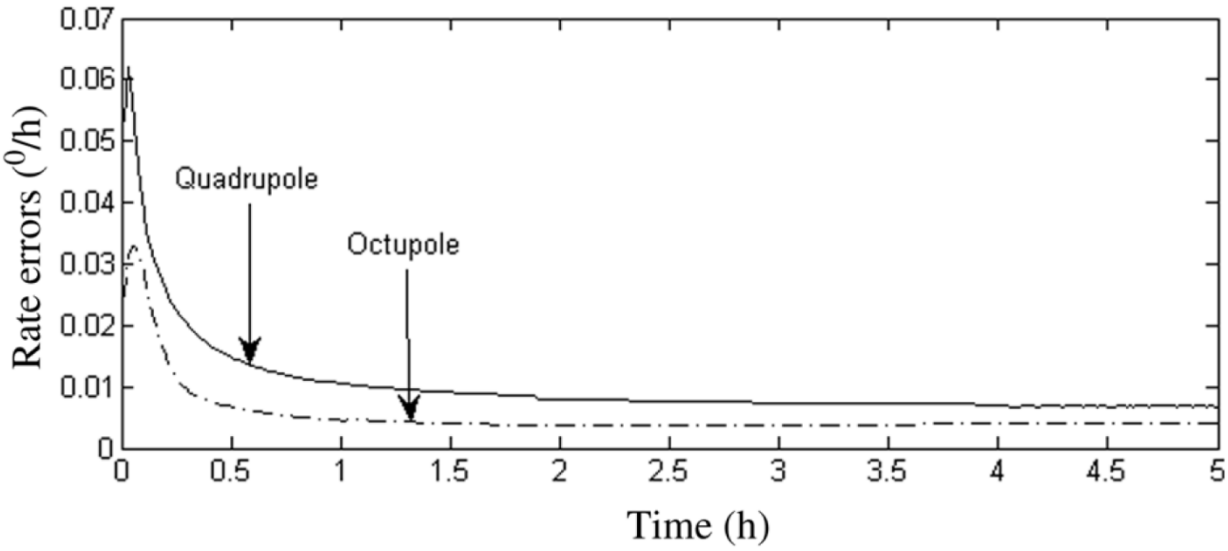

Рис. 1.7. Тепловой дрейф [51]

Далее авторы в [50] варьируют количество слоев и витков в слое при фиксированных длине волокна и внутреннем диаметре волоконного контура с квадрупольной схемой. Результаты представлены на рисунке 1.8. Необходимо отметить, что авторы, варьируя количество слоев, получили оптимальное значение теплового дрейфа. Экспериментальные подтверждения расчетов по модели отсутствуют.

Layer number	Loop number	Inner radius (mm)	Outer radius (mm)	Coil height (mm)
32	77	62	67.76	13.99
40	61	62	69.20	11.07
48	50	62	70.64	9.13
56	42	62	72.08	7.74
64	37	62	73.52	6.70
72	32	62	74.96	5.89
80	29	62	76.40	5.25
88	26	62	77.84	4.72

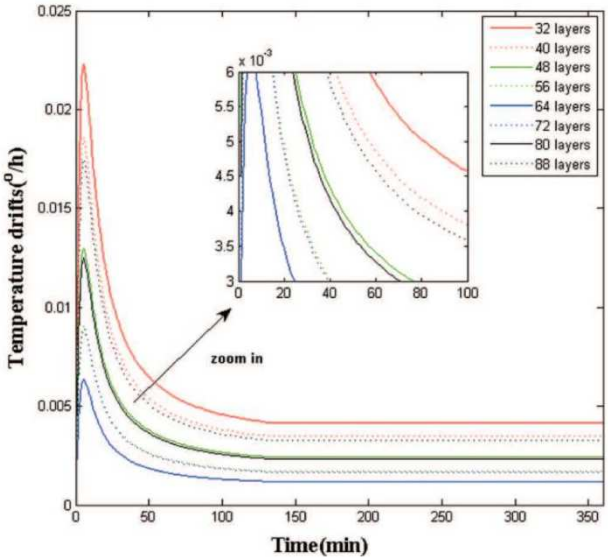

Рис. 1.8 Расчетный тепловой дрейф при варьировании геометрии контура [50]

В работах [58, 59, 61] для расчета полей температур W. Ling, X. Li, Z. Xu, Y. Wei решают осесимметричную начально-краевую задачу теплопроводности для структурно-неоднородного волоконного контура. Используя (1.1), авторы сравнивают между собой различные схемы намоток и дополнительные конструктивные решения. На рисунке 1.9 представлены внешняя тепловая нагрузка и результаты расчета теплового дрейфа для двух схем намотки. Следует отметить следующие противоречия в результатах расчета: на нестационарных термопереходах от 60 до 20 °C кажущаяся угловая скорость отсутствует; с увеличением внешней скорости нагрева в 4 раза (от 0,5 до 2 °C/мин), амплитуда расчетного теплового дрейфа практически не меняется.

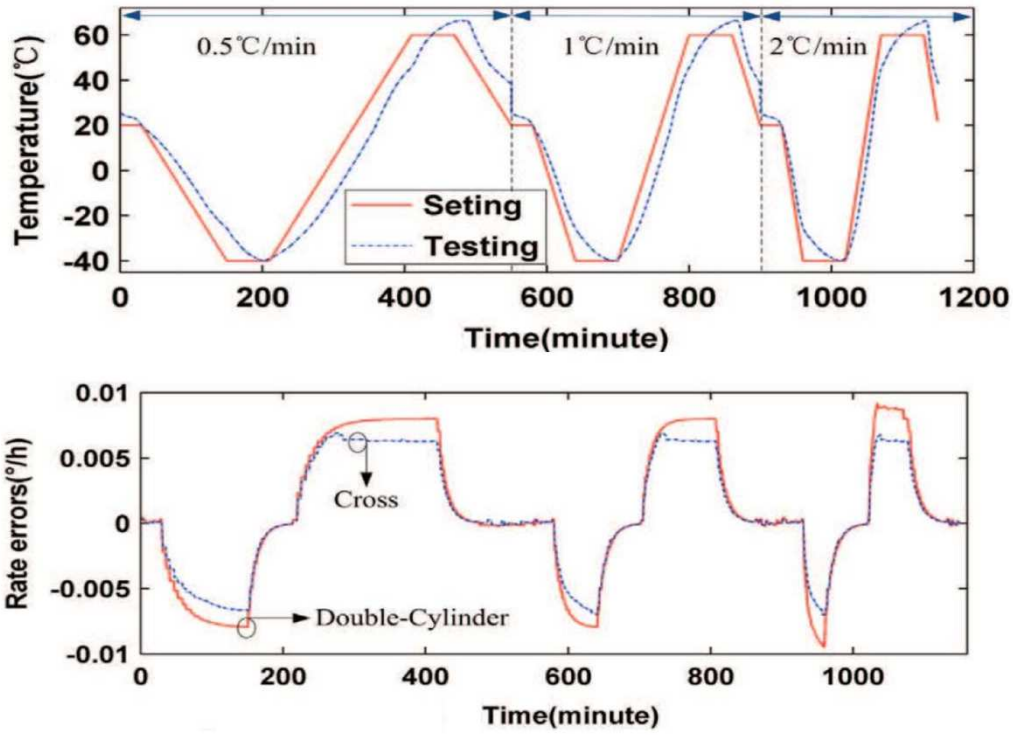

Рис.1.9. Температурная нагрузка и расчетный дрейф [61]

1.3 Математические модели теплового дрейфа, учитывающие упругооптический эффект

В 1996 г. O.F. Tirat, J.M. Euverte одними из первых сделали предположение о влиянии напряженно-деформированного состояния на тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа (упругооптический эффект). В своей работе [77] авторы дополнили (1.1) и записали функционал для кажущейся угловой скорости Ω_σ, в котором изменение фазы Саньяка зависит от напряжений в жиле оптического волокна:

$$\Omega_\sigma = \frac{K_2}{LD}\left(\int_0^L \dot{\sigma}(L-l)dl - \int_0^L \dot{\sigma} l dl\right), \quad (1.2)$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности, $\dot{\sigma}$ – скорость напряжений.

В рамках данного представления М.А. Барулина, В.Э. Джашитов В.М. Панкратов в работах [7, 24, 25, 48] исследуют напряженно-деформированное

состояние однородного изотропного волоконного контура, для чего решают нестационарную задачу термоупругости. Авторами моделируются несколько вариантов конструкций контуров в сопряжении с каркасными деталями (Рис. 1.10), показываются неоднородные распределения интенсивности напряжений, исходя из чего, делается вывод о влиянии напряженно-деформированного состояния на температурные погрешности волоконно-оптического гироскопа, однако количественные сопоставления погрешностей и экспериментальные подтверждения отсутствуют.

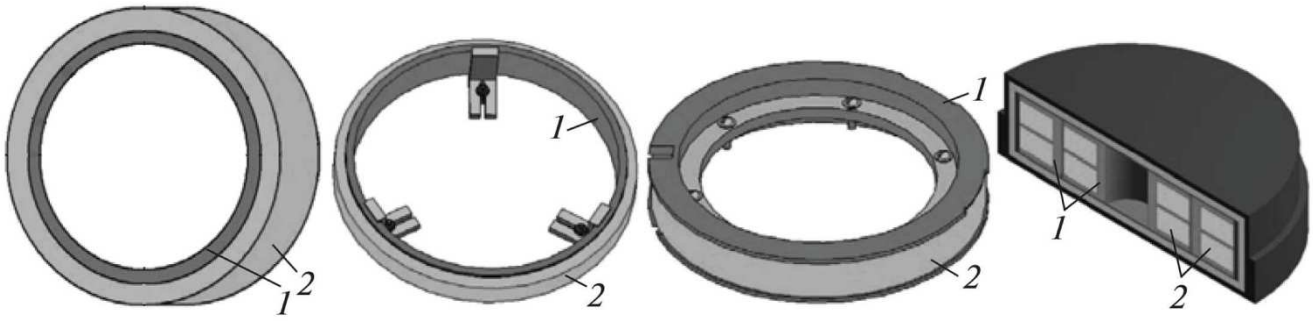

Рис. 1.10. Варианты конструкций [48]: 1 – деталь сопряжения, 2 – волоконный контур

Е.И. Вахрамеев, К.С. Галягин, М.А. Ошивалов и др. в своих работах [10, 13, 14, 15] при расчете теплового дрейфа учитывают термооптический и упругооптический эффекты. Влияние упругооптического механизма на кажущуюся угловую скорость описывается изменением коэффициента преломления в жиле оптического волокна [13]. Изменение показателя преломления связывается с главными напряжениями по теории Максвелла [3]. Известно [39, 45, 52, 55], что к появлению кажущейся угловой скорости также приводит изменение длины волокна в контуре, которое авторы не учитывают. В качестве объекта исследования выступает осесимметричное сечение волоконного контура длиной 1000 м с квадрупольной схемой намотки в сопряжении с

конструктивными деталями волоконно-оптического гироскопа. В работе [10] авторы рассматривают волоконный контур как однородное изотропное тело с усредненными физико-механическими свойствами. На первом этапе решается нестационарная задача теплопроводности. Затем по полю температур на каждом временном шаге решается статическая задача термоупругости. Несовпадение расчетных значений теплового дрейфа с экспериментальными данными объясняется неточностью физико-механических характеристик материалов составляющих контур и нарушением идеальности укладки витков в волоконном контуре. Авторы утверждают, что исключение влияния упругооптического эффекта из модели приводит к негативным результатам, однако сравнительный анализ вкладов каждого из механизмов на суммарный тепловой дрейф не приводят. В следующих работах [13, 14, 15] авторы переходят к рассмотрению структурно-неоднородного контура (Рис. 1.11) с детальным учетом физико-механических свойств материалов, которые не приводятся ни в одной работе.

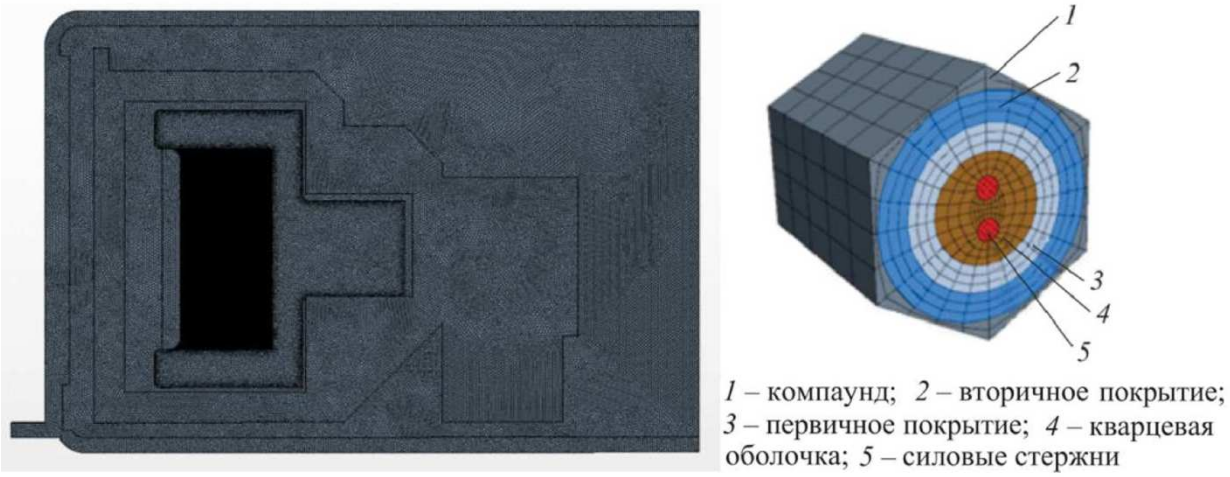

Рис. 1.11. Расчетная геометрия [13, 14, 15]

Необходимо отметить, что в работах [13, 15] при одинаковых параметрах модели (конструкция волоконно-оптического гироскопа, внешняя температурная

нагрузка, схема намотки контура) получены расчетные тепловые дрейфы с существенной разницей по амплитуде (Рис.1.12).

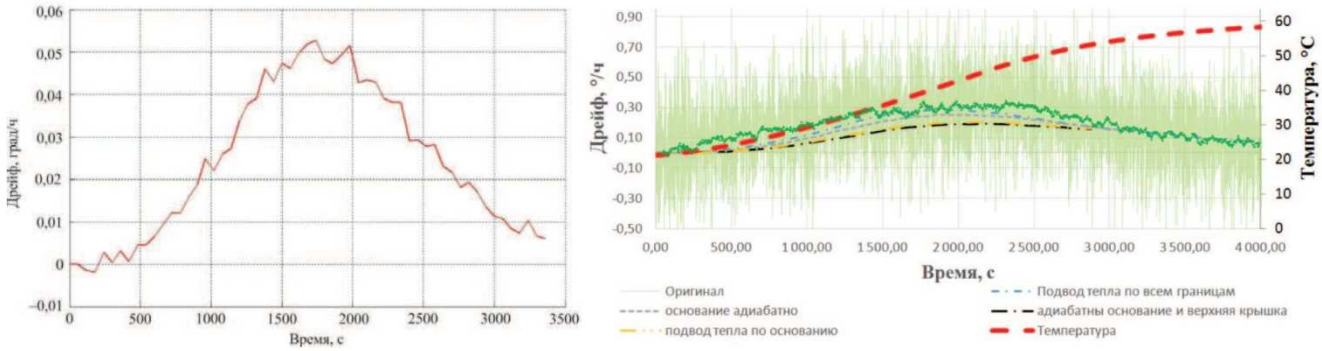

Рис. 1.12. Разница между расчетными тепловыми дрейфами [13, 15]

В 2004 г. F. Mohr и F. Schadt описали влияние упругооптического эффекта на тепловой дрейф через упругие деформации [67]:

$$\Omega_\varepsilon = \frac{K_3}{LD}\left(\int_0^L \dot{\varepsilon}(L-l)dl - \int_0^L \dot{\varepsilon} l dl\right), \quad (1.3)$$

где K_3 – коэффициент пропорциональности, $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформаций.

Для определения упругих деформаций авторами решается нестационарная задача термоупругости, волоконный контур в которой представлен в виде однородного трансверсально-изотропного тела [68]. В работе [74] авторы впервые показывают качественное отличие кажущихся угловых скоростей от действия температуры и упругих деформаций для квадрупольной схемы намотки волоконного контура (Рис. 1.13).

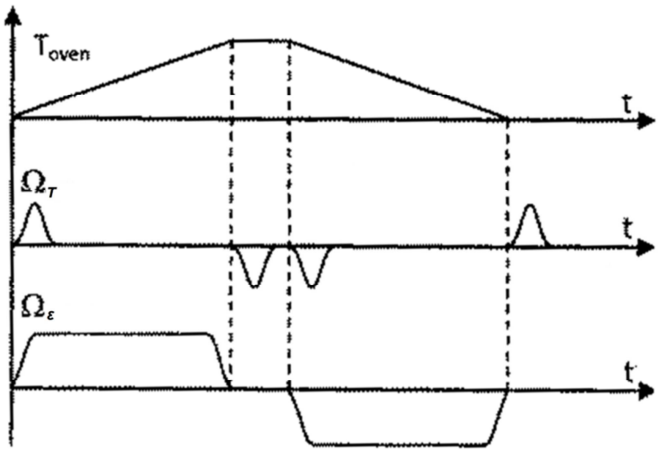

Рис. 1.13. Качественное представление тепловых дрейфов для квадрупольной схемы намотки волоконного контура [51]

S. Ogut, B. Osunluk, E. Ozbay учитывают функционалы (1.1) и (1.3) при расчете теплового дрейфа [70, 71]. Волоконный контур длиной 1101 м с модифицированной квадрупольной схемой намотки (Рис. 1.14), приклеенный через прокладку к конструктивной детали волоконно-оптического гироскопа, рассматривается как однородное трансверсально-изотропное трехмерное тело, для которого решается нестационарная задача термоупругости.

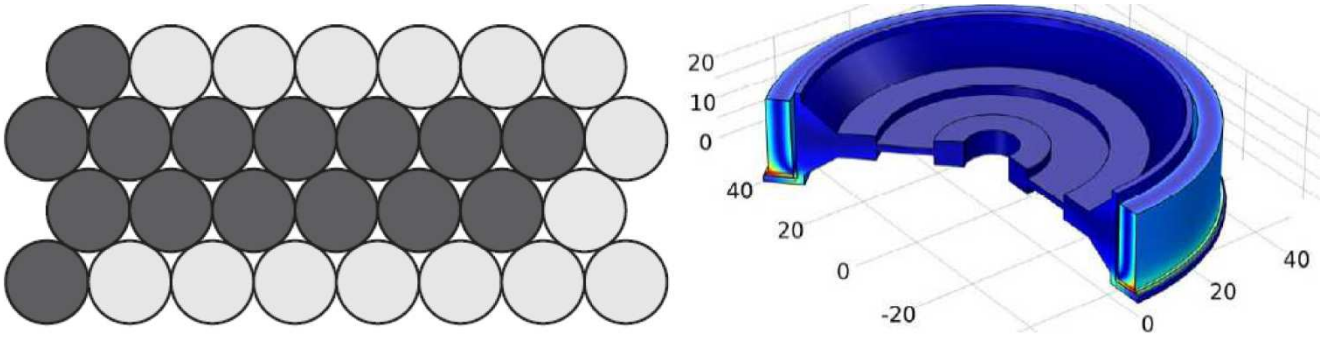

Рис. 1.14 Схема намотки и конструктивное исполнение [70, 71]

В качестве воздействия рассматривается термопереход 20/60/-40/20 °C со скоростью изменения температуры ±0,2 °C. На рисунке 1.15 показаны распределения температуры и осевой компоненты тензора деформаций в жиле

оптического волокна. Из рисунка видно, что сопряжение волоконного контура с конструктивной деталью волоконно-оптического гироскопа оказывает влияние на деформации в волокне, а, следовательно, может быть причиной снижения/увеличения кажущейся угловой скорости, вызванной упругооптическим эффектом.

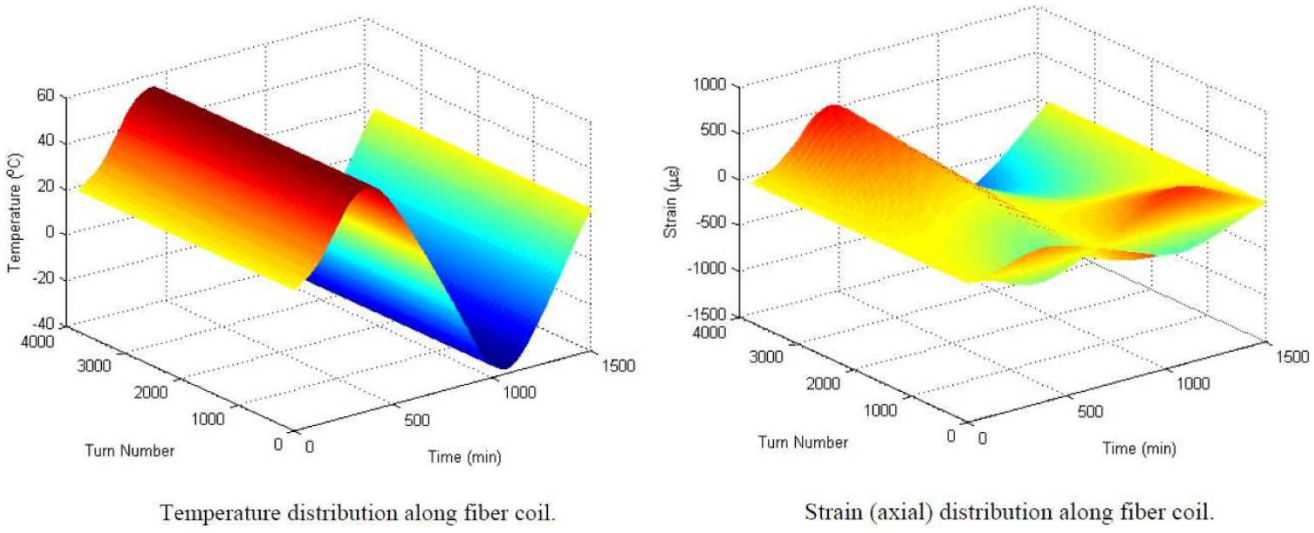

Рис. 1.15 Распределения температур и деформаций [70, 71]

На рисунке 1.16 показаны количественные отличия между составляющими теплового дрейфа, видно, что кажущаяся угловая скорость, вызванная упругооптическим эффектом, превосходит угловую скорость, вызванную термооптическим эффектом. Однако оценить форму дрейфа не представляется возможным, т.к. временных зависимостей авторы не приводят.

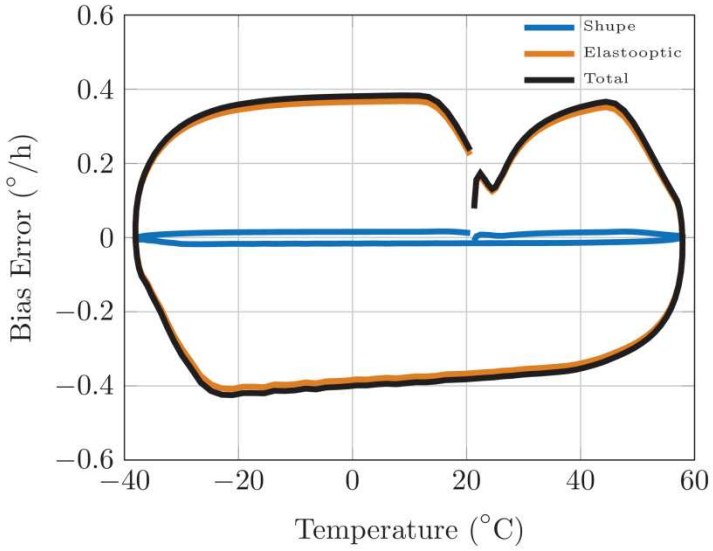

Рис. 1.16. Расчетный тепловой дрейф [70]

В работе [60] 2015 г. авторы W. Ling, X. Li, Z. Xu и др., используя функционалы (1.1) и (1.3), исследуют тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа, структурно-неоднородный волоконный контур длиной 993 м находится в сопряжении с конструктивными деталями (Рис. 1.17, а). В качестве воздействия рассматривается термопереход (Рис. 1.17, б) со скоростью изменения внешней температуры 1 °C/мин.

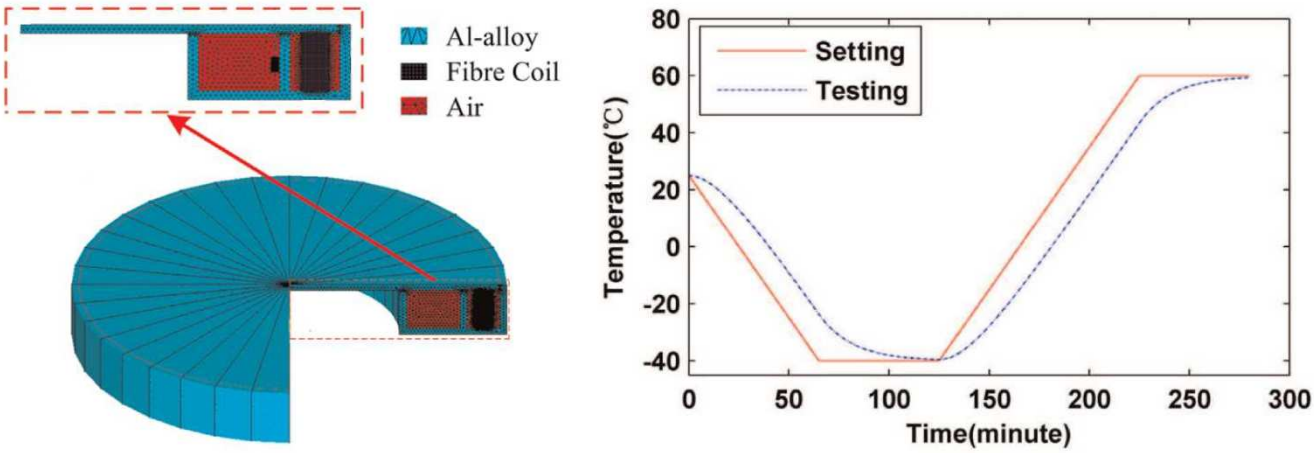

Рис. 1.17. Объект исследования и внешняя тепловая нагрузка [60]

После записи функционала (1.3) в зависимости от трех диагональных компонент тензора деформаций авторы заменяют их через физические соотношения на одну компоненту тензора напряжений, действующую в сечении, приравнивая к нулю напряжение вдоль волокна. На рисунке 1.18 представлены распределения температуры и напряжений в жиле оптического волокна для квадрупольной схемы намотки.

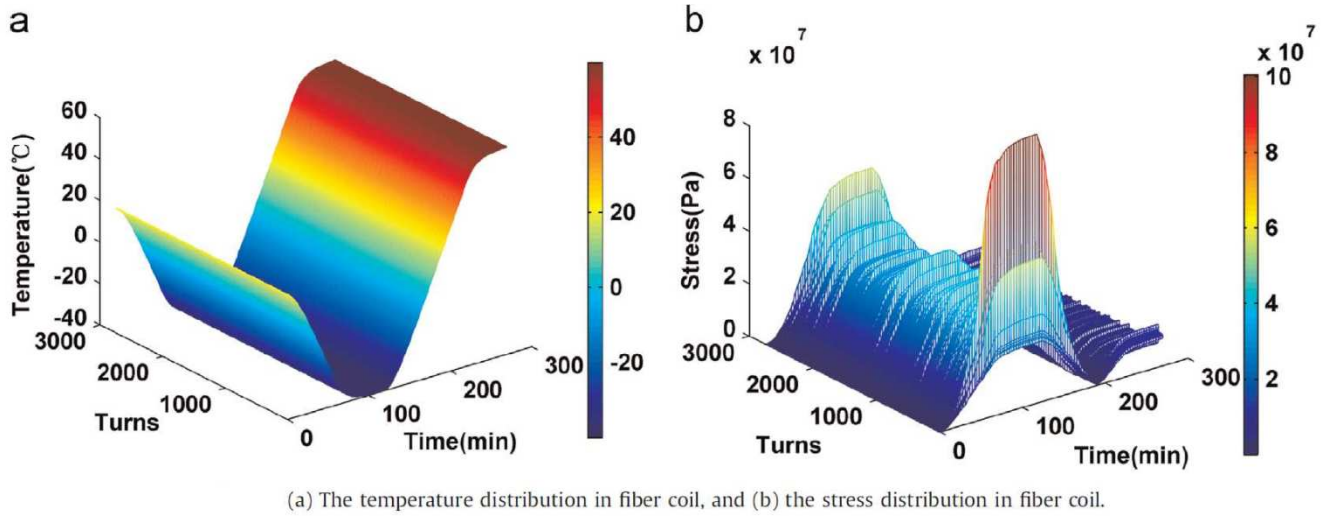

Рис. 1.18 Распределения температур и напряжений [60]

Из рисунка видно, что сопряжение волоконного контура с конструктивными деталями оказывает влияние на напряжение в сечении волокна, а, следовательно, может быть причиной снижения/увеличения кажущейся угловой скорости, вызванной упругооптическим эффектом. В работе рассматриваются три схемы намотки: квадрупольная, октупольная и шахматная. На рисунке 1.19 представлены расчетные дрейфы, которые противоречат представлениям, которые изображены на рисунке 1.13. В своих следующих работах [58, 59, 61] 2016 г., рассмотренных в разделе 1.2, авторы для расчета теплового дрейфа используют только термооптический эффект.

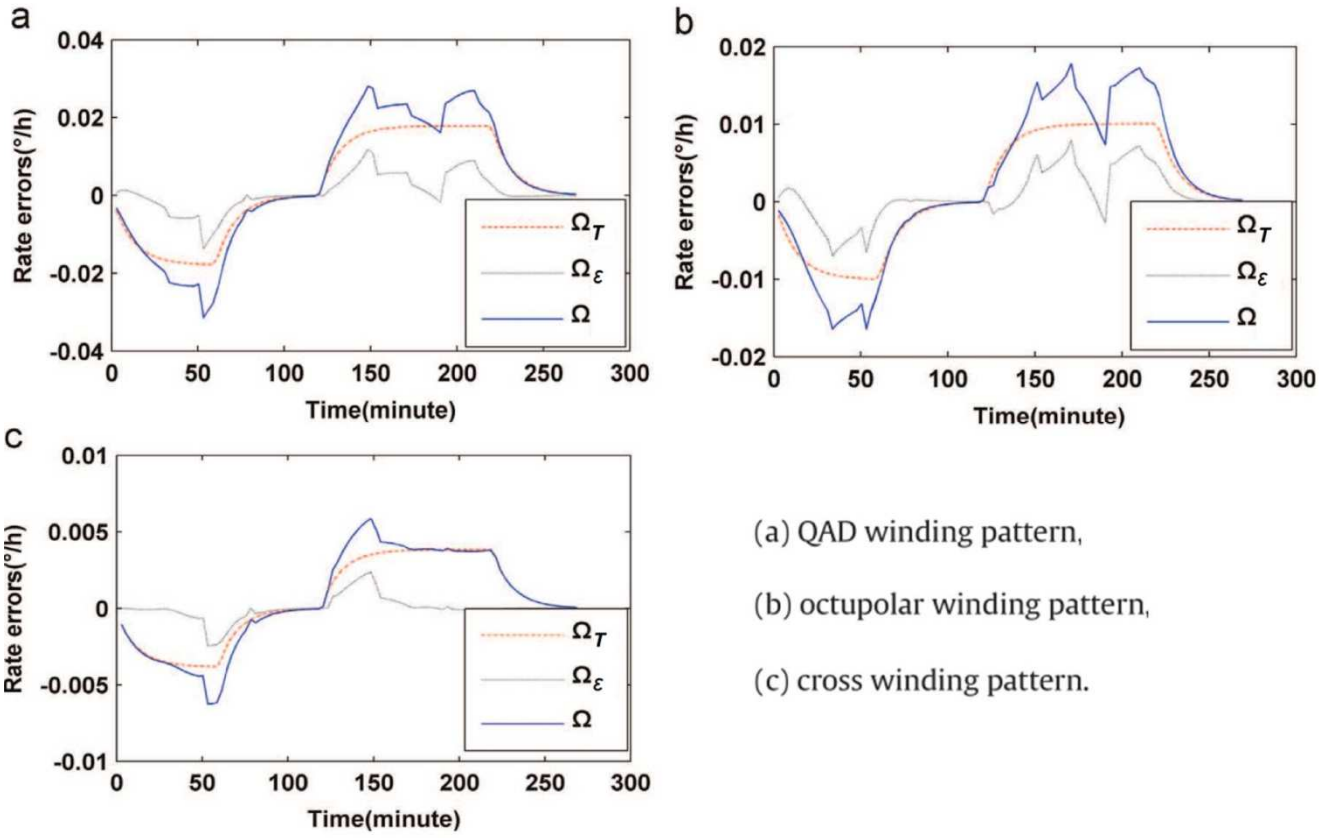

Рис.1.19. Расчетные кажущиеся угловые скорости [60]

Y. Zhang, Z. Gao, G. Wang, W. Gao в работе [89] исследовался волоконный контур длиной 1014 м с квадрупольной схемой намотки в сопряжении с конструктивными деталями волоконно-оптического гироскопа. При выводе функционала (1.3) авторы заменяют скорости деформаций на температурные деформации. В связи с этим тепловой дрейф, вызванный упругооптическим эффектом, качественно повторяет кривую температурной нагрузки (Рис. 1.20). В своих следующих работах [50, 51], рассмотренных в разделе 1.2, авторы для расчета кажущейся угловой скорости используют влияние только термооптического эффекта.

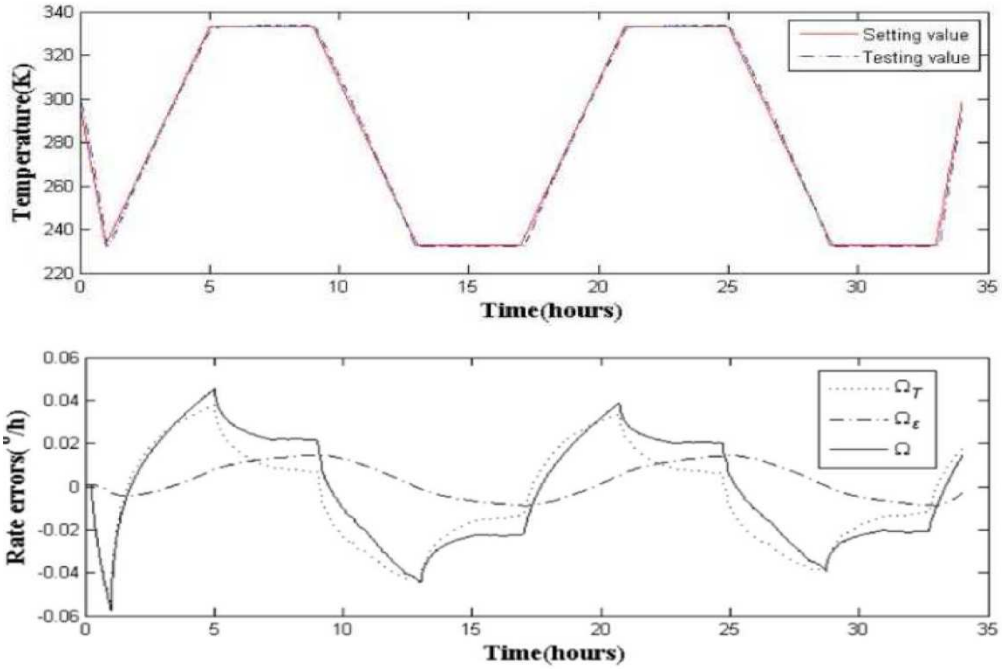

Рис. 1.20. Температурная нагрузка и расчетные кажущиеся угловые скорости [89]

В настоящее время существуют работы, в которых авторы предлагают минимизировать тепловой дрейф, изменяя конструкцию волокна [84]. В работах [47, 85] авторы рассматривают волокно с воздушной сердцевиной (air-core), при использовании которой произойдет существенное (на 2 порядка) снижение коэффициентов пропорциональности K_i, которые отражают чувствительность кажущейся угловой скорости к изменениям температуры и напряженно-деформированного состояния.

1.4 Экспериментальное подтверждение результатов моделирования теплового дрейфа

Впервые в 1995 г. C.M. Lofts, P.B. Ruffin, M.D. Parker, C.C. Sung в работе [62] сопоставили экспериментальный тепловой дрейф с результатами расчета по функционалу (1.1). Волоконный контур длиной 200 м был намотан по схеме «ZYL» (Рис. 1.2). Авторы отмечают, что для совпадения расчетных и

экспериментальных данных (Рис. 1.21) увеличили коэффициент пропорциональности K_1 в 5 раз.

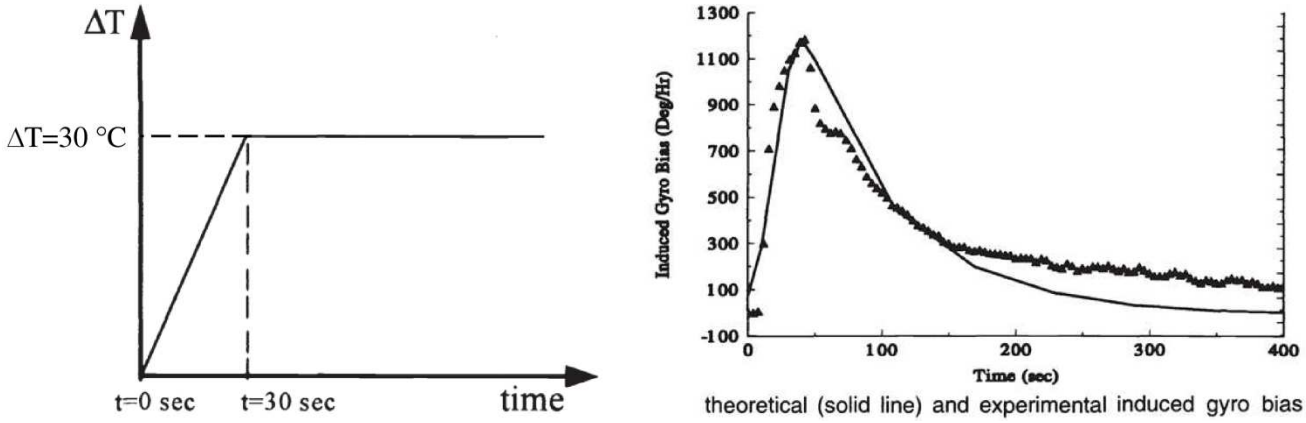

Рис. 1.21. Температурная нагрузка и тепловой дрейф [62]

O.F. Tirat, J.-M. Euverte [77] на волоконном контуре длиной 275 м с квадрупольной схемой намотки также показали совпадение результатов расчета по функционалу (1.1) с экспериментальным тепловым дрейфом (Рис. 1.22). Скорость внешней температурной нагрузки на нестационарных участках составила 6 °C/мин.

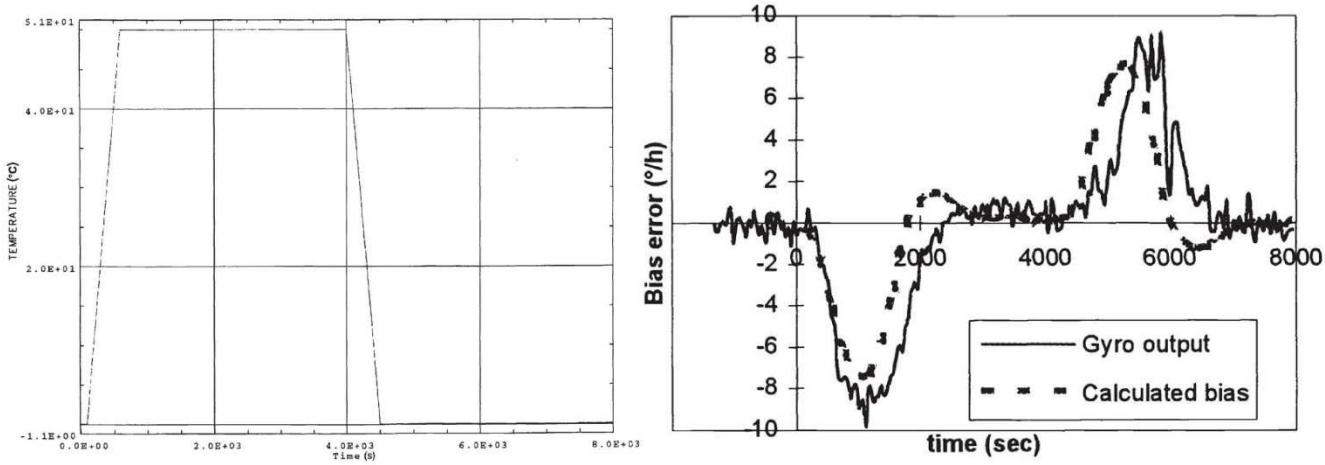

Рис. 1.22. Температурная нагрузка и тепловой дрейф [77]

В работах [59, 60] приводятся результаты математического моделирования теплового дрейфа в сравнении с экспериментом, которые вызывают противоречия. В работе [59] показано совпадение при использовании в расчете только термооптического эффекта (Рис 1.23, а), причем, увеличение внешней скорости нагрева/охлаждения в 4 раза (Рис. 1.9) никак не сказывается на амплитуде дрейфа. А в раннее расмотренной работе [60] авторы утверждают, что для совпадения расчетных и экспериментальных данных использования влияния термооптического эффекта недостаточно (Красная кривая на рис. 1.23, б), поэтому необходимо использовать оба механизма (Синяя кривая на рис. 1.23, б).

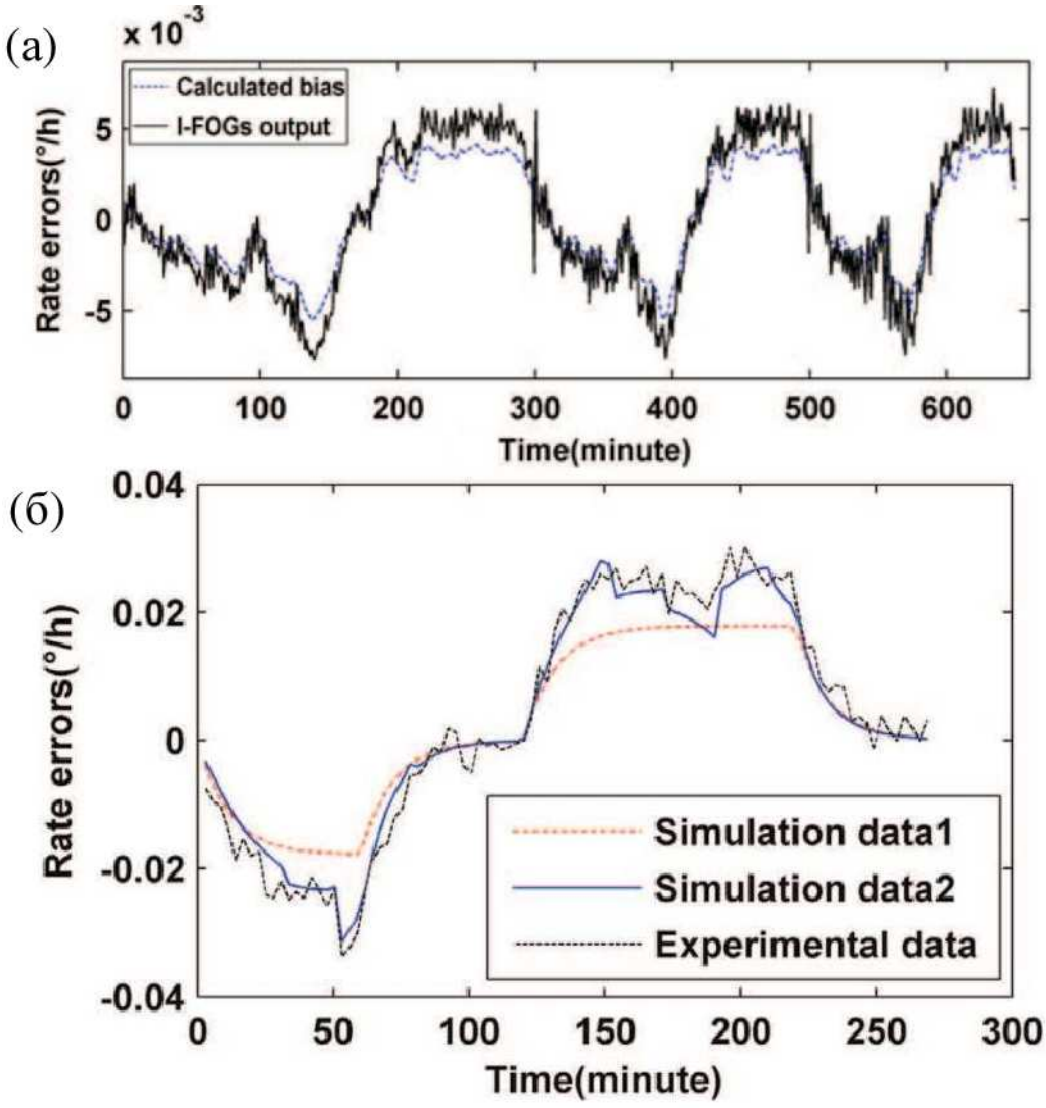

Рис. 1.23 Верификация теплового дрейфа [59, 60]

В рассмотренных в разделе 1.3 работах [70, 71] авторы приводят сопоставление расчетных и экспериментальных данных (Рис. 1.24). Результаты приведены некорректно, т.к. не отображают тепловой дрейф, который проявляется при действии нестационарной нагрузки, в зависимости от времени.

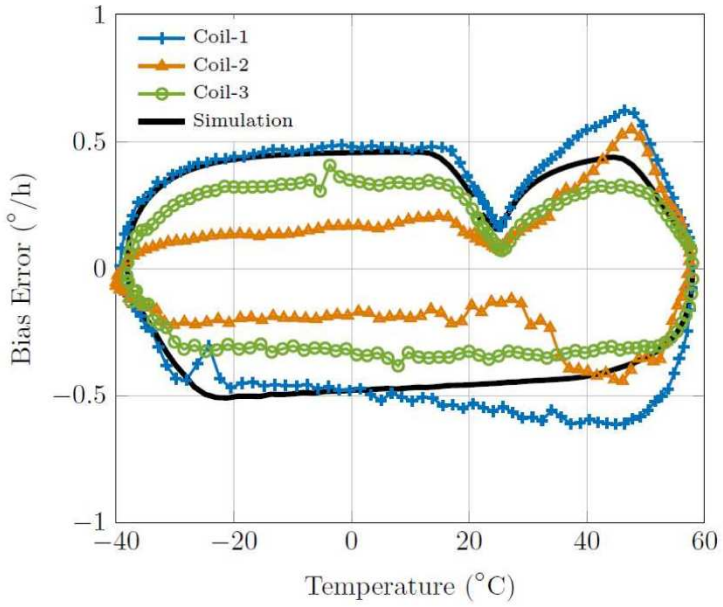

Рис. 1.24. Верификация теплового дрейфа [70, 71]

1.5 Анализ недостатков существующих работ

Анализ существующих работ выявил следующие недостатки, лимитирующие эффективность методики снижения теплового дрейфа средствами математического моделирования:

– отсутствие качественного и количественного анализов вкладов каждого из эффектов в тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа и методики их экспериментального подтверждения;

– отсутствие исследования теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа, в котором волоконный контур лишен сопрягаемых конструктивных

особенностей, приводящих к неоднородному тепловому и напряженно-деформированному состоянию;

– отсутствие экспериментальных подтверждений напряженно-деформированного состояния в жиле волокна при действии тепловой нагрузки;

– отсутствие экспериментальных подтверждений решения нестационарной задачи теплопроводности;

– при учете влияния упругооптического эффекта решается тепловая, а не термоупругая задача;

– не ведется детальный учет физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

Не найдено ни одной работы, в которой бы отсутствовали все выписанные выше недостатки, а, следовательно, существующие подходы в полной мере не могут быть использованы в качестве инструмента для снижения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕГО КОНТУР

2.1 Формулировка наиболее полного функционала кажущейся угловой скорости

Волоконный контур представляет собой структурно-неоднородную конструкцию, которая включает в себя оптическое волокно, два защитно-упрочняющих покрытия и эпоксидный компаунд (Рис. 2.1).

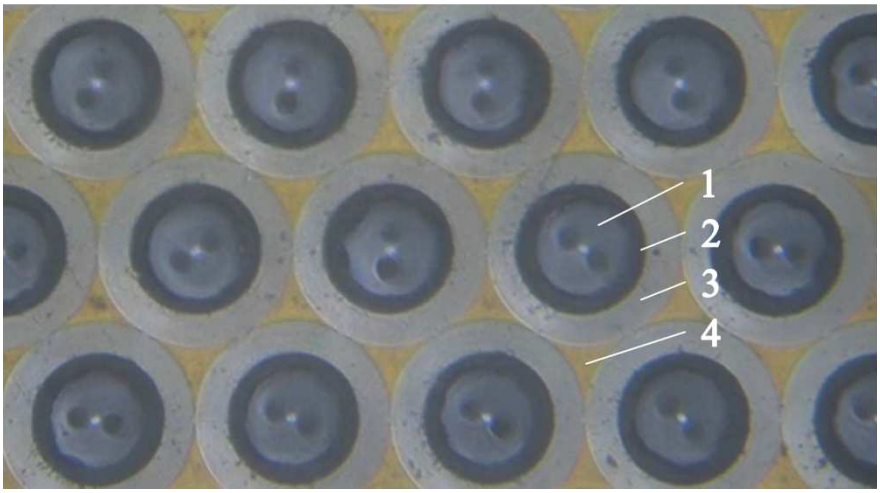

Рис. 2.1. Поперечное сечение волоконного контура: 1 – оптическое волокно типа «Panda», 2 – первичное покрытие, 3 – вторичное покрытие, 4 – эпоксидный компаунд

Оптическое волокно «Panda», состоит из кварцевой оболочки, жилы и силовых нагружающих стержней (Рис. 2.2). Светопроводящая жила волокна легирована оксидом германия. Больший показатель преломления обеспечивает полное внутреннее отражение при распространении световых волн, введенных под определенным углом [1]. Стержни в процессе вытяжки волокна формируют в

жиле поля напряжений для обеспечения разности коэффициентов преломления в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [78]. Таким образом, волокно данного типа имеет две ортогональные плоскости поляризации: быструю (XOZ) и медленную (YOZ), вдоль одной из которых распространяется свет.

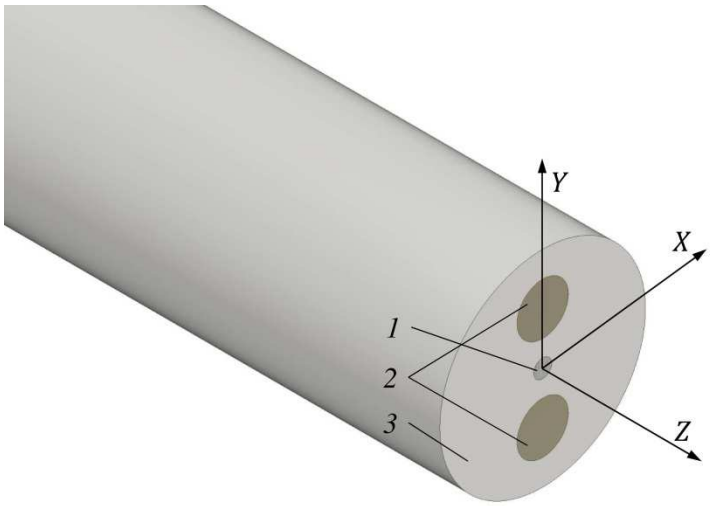

Рис. 2.2. Волокно «Panda»: 1 – жила, 2 – стержни, 3 – оболочка

Световая волна длиной λ_c при прохождении в жиле оптического волокна длиной L вдоль быстрой плоскости поляризации с коэффициентом преломления n имеет фазу

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_c} \int_0^L ndl,$$

где dl – элементарная длина волокна.

Изменение фазы $\Delta\Phi$ при действии внешней нагрузки обусловлено изменениями длины оптического волокна $\Delta(dl)$ и коэффициента преломления Δn [39]:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_c} \int_0^L \left(\frac{\Delta(dl)}{dl} + \frac{\Delta n}{n}\right) ndl,$$

Изменения фазы $\Delta\Phi_{\Delta T}$ от температуры ΔT имеет вид [53]:

$$\Delta\Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda_c}\int_0^L \left(\frac{\partial(dl)}{dl\partial T} + \frac{\partial n}{n\partial T}\right) n\Delta T dl,$$

где $\frac{\partial(dl)}{dl\partial T} = \alpha$ – коэффициент линейного температурного расширения жилы, которым будем пренебрегать вследствие малости [67], $\frac{\partial n}{\partial T}$ – термооптический коэффициент.

Изменения фазы $\Delta\Phi_{\Delta\varepsilon}$ от упругих деформаций $\Delta\varepsilon$ есть [45]

$$\Delta\Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda_c}\int_0^L \left(\frac{\partial(dl)}{dl\partial\varepsilon} + \frac{\partial n}{n\partial\varepsilon}\right) n\Delta\varepsilon dl,$$

где $\frac{\partial(dl)}{dl\partial\varepsilon}\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{ZZ}$ – изменение диагональной компоненты тензора деформаций, действующей вдоль жилы волокна.

Изменение коэффициента преломления при действии упругих деформаций для быстрой поляризационной моды можно найти по выражению [52]:

$$\frac{\partial n}{\partial\varepsilon}\Delta\varepsilon = -\frac{n^3}{2}(p_{11}\Delta\varepsilon_{XX} + p_{12}\Delta\varepsilon_{YY} + p_{12}\Delta\varepsilon_{ZZ}), \quad (2.1)$$

где p_{11} и p_{12} – упругооптические константы светопроводящей жилы, $\Delta\varepsilon_{XX}$ и $\Delta\varepsilon_{YY}$ – изменения диагональных компонент тензора деформаций, действующих в сечении жилы.

Окружающее волокно первичное покрытие (Рис. 2.1) является податливым, следовательно, в сечении волокна возникают напряжения σ_{XX} и σ_{YY}, которые малы по сравнению с продольной компонентой σ_{ZZ}. Если положить $\sigma_{XX} = \sigma_{YY} = 0$, то из физических соотношений следует равенство

$$\varepsilon_{XX} = \varepsilon_{YY} = -\nu_1\varepsilon_{ZZ}, \quad (2.2)$$

где ν_1 – коэффициент Пуассона жилы оптического волокна. (Здесь и далее индекс для коэффициента Пуассона соответствует номеру компоненты волоконного контура как показано на рис. 2.1.)

Подстановка (2.2) в (2.1) дает изменение коэффициента преломления от действия единственной компоненты тензора деформаций:

$$\frac{\partial n}{\partial \varepsilon}\Delta\varepsilon = -\frac{n^3}{2}[(1-\nu_1)p_{12} - \nu_1 p_{11}]\Delta\varepsilon_{ZZ},$$

Итоговые соотношения для изменения фаз принимают вид:

$$\begin{gathered}\Delta\Phi_{\Delta T} = \frac{2\pi}{\lambda_c}\int_0^L \frac{\partial n}{\partial T}\Delta T dl, \\ \Delta\Phi_{\Delta\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda_c}\int_0^L n\left(1 - \frac{n^2}{2}[(1-\nu_1)p_{12} - \nu_1 p_{11}]\right)\Delta\varepsilon_{ZZ} dl.\end{gathered} \tag{2.3}$$

В интерферометре Саньяка задержка по времени двух противоположно распространяющихся световых волн дается выражением [56]:

$$\Delta t = \frac{n}{c}(L-l) - \frac{n}{c}l = \frac{n}{c}(L-2l),$$

где c – скорость света в вакууме.

За время пробега световой волны температуры и упругие деформации изменяются следующим образом:

$$\begin{gathered}\Delta T = \dot{T}\Delta t = \frac{n}{c}(L-2l)\dot{T}, \\ \Delta\varepsilon_{ZZ} = \dot{\varepsilon}_{ZZ}\Delta t = \frac{n}{c}(L-2l)\dot{\varepsilon}_{ZZ},\end{gathered} \tag{2.4}$$

где точка над обозначением указывает на дифференцирование по времени.

Математическая формулировка эффекта Саньяка имеет вид:

$$\Phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda_c c}\Omega, \tag{2.5}$$

где Φ_s – фаза Саньяка, Ω – угловая скорость вращения, D – средний диаметр контура.

Подстановка (2.4) в (2.3) с учетом (2.5) дает выражения для кажущихся угловых скоростей, вызванных термооптическим и упругооптическим эффектами:

$$\Omega_{\dot{T}} = \frac{1}{LD}\int_0^L n\frac{\partial n}{\partial T}(L-2l)\dot{T}dl,$$
$$\Omega_{\dot{\varepsilon}} = \frac{1}{LD}\int_0^L n^2\left(1-\frac{n^2}{2}[(1-\nu_1)p_{12}-\nu_1 p_{11}]\right)(L-2l)\dot{\varepsilon}_{ZZ}dl. \quad (2.6)$$

2.2 Приспособление для исследования теплового дрейфа волоконного контура

В существующих конструкциях волоконно-оптических гироскопов крепление волоконного контура, а также расположение функциональных компонент гироскопов, приводит к усложнению переходных процессов при нагреве и охлаждении изделий. Практикуется, например, использование углепластиковых каркасов при намотке контуров [7, 13–17, 28, 29], которые в значительной мере привносят нестабильность и непредсказуемость поведения волоконно-оптического контура в рассматриваемых переходных процессах. В большинстве работ об исследовании теплового дрейфа, проанализированных в главе 1, волоконный контур располагается в конструкции реального гироскопа, но в некоторых работах (например [34, 59–61]) контур помещают в специальную оснастку, обеспечивающую равномерное изменение температуры. Предполагается, что характеристики теплового поведения волоконного контура, изученные с помощью такой оснастки, покажут некое идеальное поведение прибора на основе такого волоконного контура. Данный вопрос, относящийся к методике эксперимента, объектом которого является волоконный контур, представляется исключительно важным.

Далее в работе будет рассматриваться бескаркасный вариант волоконно-оптического контура, имеющий ряд преимуществ по отношению к каркасному.

Поэтому для теоретического и экспериментального исследования теплового дрейфа было спроектировано и изготовлено специальное приспособление (Рис. 2.3), состоящее из двух корпусных деталей: крышки и основания. Волоконный контур в нем удерживается посредством резиновых прокладок. На крышку и основание установлены датчики для контроля температуры. Пружина сжатия позволяет крышке перемещаться относительно основания вдоль оси z. Такая конструкция обеспечивает осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями.

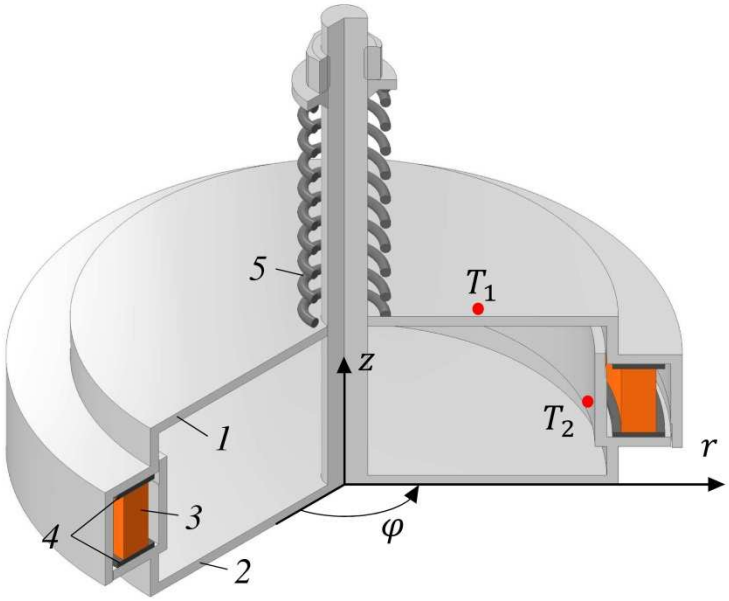

Рис. 2.3. Приспособление: *1* – крышка, *2* – основание, *3* – волоконный контур, *4* – прокладки, *5* – пружина, T_1 и T_2 – датчики температуры

2.3 Математическая формулировка квазистационарной задачи термоупругости в структурно-неоднородной постановке

В качестве расчетной схемы объекта исследования построен двумерный осесимметричный конечно-элементный аналог в программном комплексе ANSYS (Рис. 2.4), в предположении, что геометрия, физико-механические свойства,

температурная нагрузка в конструкции не изменяются вдоль окружной координаты φ. Внутреннее пространство между корпусными деталями, прокладками и контуром заполнено воздухом. Структурно-неоднородное сечение контура, включает в себя оптическое волокно, два защитно-упрочняющих покрытия и эпоксидный компаунд. В предположении, что физико-механические свойства жилы, нагружающих стержней и оболочки (Рис. 2.2) слабо отличаются друг от друга, оптическое волокно представлено в виде однородного изотропного тела со свойствами чистого кварцевого стекла.

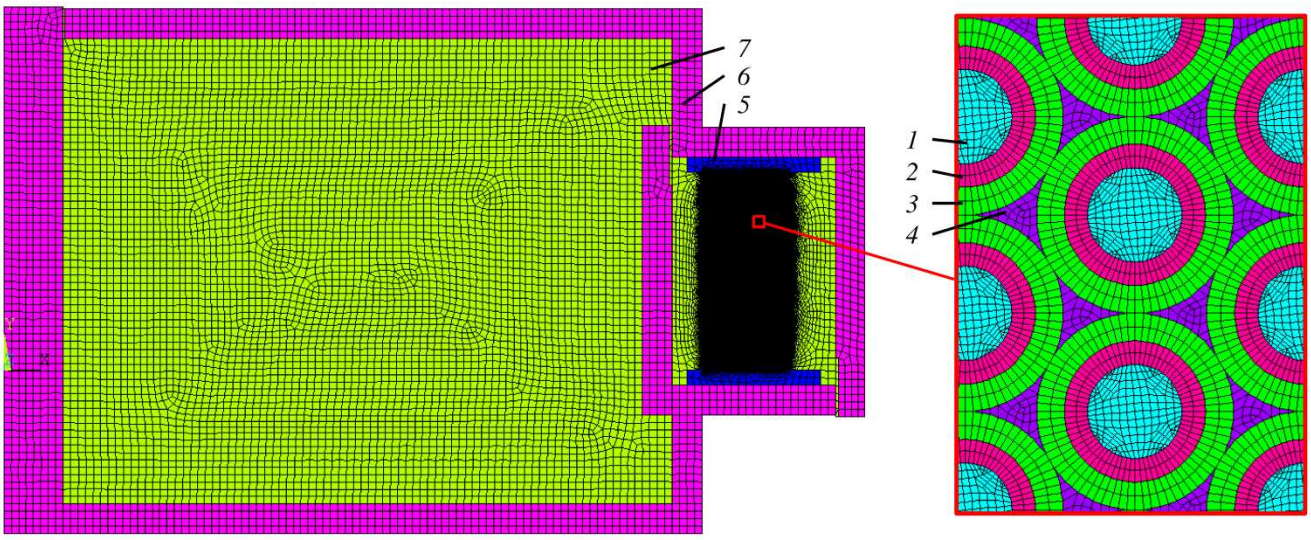

Рис. 2.4. Расчетная схема: *1* – волокно, *2* – первичное покрытие, *3* – вторичное покрытие, *4* – компаунд, *5* – прокладка, *6* – корпус, *7* – воздух

Волокно, первичное и вторичное покрытия, компаунд, резиновые прокладки, корпусные детали и воздух занимают объем V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6 и V_7 соответственно и имеют границы контактов между собой S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{47}, S_{56}, S_{57} и S_{67}. Наружная граница деталей корпуса с окружающей средой обозначена S.

Полагается, что воздействующее температурное поле изменяется медленно, вследствие чего возможно пренебречь инерционными членами в уравнениях

движения и дилатационным членом в уравнении теплопроводности. В цилиндрической системе координат (Рис. 2.3) система уравнений несвязанной квазистационарной задачи термоупругости для изотропного тела с учетом осевой симметрии принимает вид [38]:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0,$$

$$\sigma_{rr} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{rr} + \lambda\left(\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}\right) - 3K\alpha T,$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz}) - 3K\alpha T, \qquad (2.7)$$

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} + \lambda\left(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi}\right) - 3K\alpha T,$$

$$\sigma_{rz} = 2\mu\varepsilon_{rz},$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \qquad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \qquad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \qquad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r}\right),$$

$$(r, z) \in V, \qquad V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6;$$

$$\rho c\dot{T} = k\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \qquad (r, z) \in V \cup V_7. \qquad (2.8)$$

Здесь обозначено: σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и малых деформаций, u_i – компоненты вектора перемещений, T – температура, ρ – плотность массы, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ и $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – коэффициенты Ламе, E – модуль упругости, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ – модуль объемного сжатия, α – коэффициент линейного температурного расширения.

Условия на границах сопряжения материалов считаются следующими:

$$
\begin{gathered}
(\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z)_{V_i} = (\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z)_{V_{i+1}},\\
(\sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z)_{V_i} = (\sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z)_{V_{i+1}},\\
(u_r)_{V_i} = (u_r)_{V_{i+1}}, \qquad (u_z)_{V_i} = (u_z)_{V_{i+1}},\\
i = \overline{1,5}, \qquad (r,z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56};
\end{gathered}
\tag{2.9}
$$

$$
\begin{gathered}
\left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_i} = \left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_{i+1}},\\
(T)_{V_i} = (T)_{V_{i+1}}, \qquad i = \overline{1,5}, \qquad (r,z) \in S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{56};\\
\left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_j} = \left(k\frac{\partial T}{\partial r}l_r + k\frac{\partial T}{\partial z}l_z\right)_{V_7},\\
(T)_{V_j} = (T)_{V_7}, \qquad j = \overline{4,6}, \qquad (r,z) \in S_{47}, S_{57}, S_{67}.
\end{gathered}
\tag{2.10}
$$

где l_r и l_z – направляющие косинусы вектора нормали к соответствующим поверхностям.

При $z = 0$ ставятся граничные условия свободного опирания приспособления:

$$u_z|_{z=0} = 0. \tag{2.11}$$

На границах с воздухом и окружающей средой напряжения отсутствуют:

$$
\begin{gathered}
\sigma_{rr}l_r + \sigma_{rz}l_z = 0,\\
\sigma_{rz}l_r + \sigma_{zz}l_z = 0,\\
(r,z) \in S_{47}, S_{57}, S_{67}, S.
\end{gathered}
\tag{2.12}
$$

Для уравнения теплопроводности на всех наружных поверхностях приспособления используются граничные условия:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}l_r + \frac{\partial T}{\partial z}l_z\right) = h(T - T_c), \qquad (r,z) \in S, \tag{2.13}$$

где h – коэффициент теплоотдачи, T_c – температура окружающей среды.

Начальное условие для уравнения теплопроводности:

$$T|_{t=0} = T_0, \qquad (r,z) \in V \cup V_7. \tag{2.14}$$

Поскольку задача термоупругости решается в цилиндрической системе координат $(r\varphi z)$, а функционал кажущейся угловой скорости записан в

декартовой системе координат (XYZ), далее все результаты вычислений будут представлены в локальной системе координат для волокна (Рис. 2.2).

2.4 Известные количественные данные модели

При исследовании теплового дрейфа ограничимся температурным диапазоном от 20 до 60 °C. Будем полагать, что оптические характеристики светопроводящей жилы и физико-механические свойства материалов являются постоянными в рассматриваемом температурном диапазоне.

В таблице 1 приведены физико-механические характеристики материалов.

Таблица 1. Физико-механические константы материалов

	Волокно	Первичное покрытие	Вторичное покрытие	Компаунд	Резиновые прокладки	Корпусные детали	Воздух
E, МПа	74000 [46]	1,2[1]	950[1]	3000[1]	4,9[2]	72200 [60]	–
ν	0,17 [46]	≤ 0.5[1]	0,33[1]	0,33[1]	0,4997[2]	0,3 [60]	–
k, Вт/(м·К)	1,4 [46]	0,18[1]	0,25[1]	0,34[1]	0,25[1]	115 [60]	0,025 [87]
ρ, кг/м^3	2200 [46]	990[1]	1130[1]	1140[1]	1100[1]	2800 [60]	1,2 [87]
c, Дж/(кг·К)	750 [46]	2200[1]	1500[1]	1200[1]	2000[1]	900 [60]	1000 [87]
α, 10^{-6}·К$^{-1}$	0,55 [46]	660[1]	40[1]	40[1]	300 [68]	28 [60]	–

[1] – заявлены производителем, [2] – определены экспериментально.

В таблице 2 представлены коэффициент преломления [49], термооптическая и упругооптические константы для жилы волокна, которые посчитаны по правилу

смеси, исходные значения для чистых оксидов германия и кремния взяты из работ [46, 82].

Таблица 2. Оптические константы.

n	$\frac{\partial n}{\partial T}$, K^{-1}	p_{11}	p_{12}
1,458	$1{,}14 \cdot 10^{-5}$	0,122	0,271

В таблице 1 для коэффициента Пуассона первичного покрытия приведено число, примыкающее к $\nu_2 = 0{,}5$ – значению соответствующему условию несжимаемости материала. Известно, что вблизи данного значения коэффициента Пуассона численные расчеты существенно зависят от ν_2 вследствие вырождения матрицы жесткости. По этой причине в процессе дальнейшего исследования должно быть предусмотрено прямое экспериментальное установление значения ν_2 (см. раздел 3.1).

Следует отметить, что в случае исследования кажущейся угловой скорости волоконно-оптического гироскопа для существенно более широкого диапазона температур, чем рассматривается в данной работе, от принятой гипотезы о независимости физико-механических свойств материалов от температуры необходимо отказаться ввиду существенной зависимости этих свойств компонентов контура от температуры.

Другой плохо определенной константой является коэффициент теплоотдачи h между наружной поверхностью приспособления, удерживающего волоконный контур, и движущимся потоком воздуха в термокамере, фигурирующий в граничных условиях (2.13). Данный коэффициент также следует определить экспериментально, что будет сделано в разделе 3.2.

2.5 Алгоритм расчета кажущейся угловой скорости

Для вычисления кажущихся угловых скоростей (2.6) написан скрипт в программном пакете MATLAB, алгоритм которого представлен на рисунке 2.5.

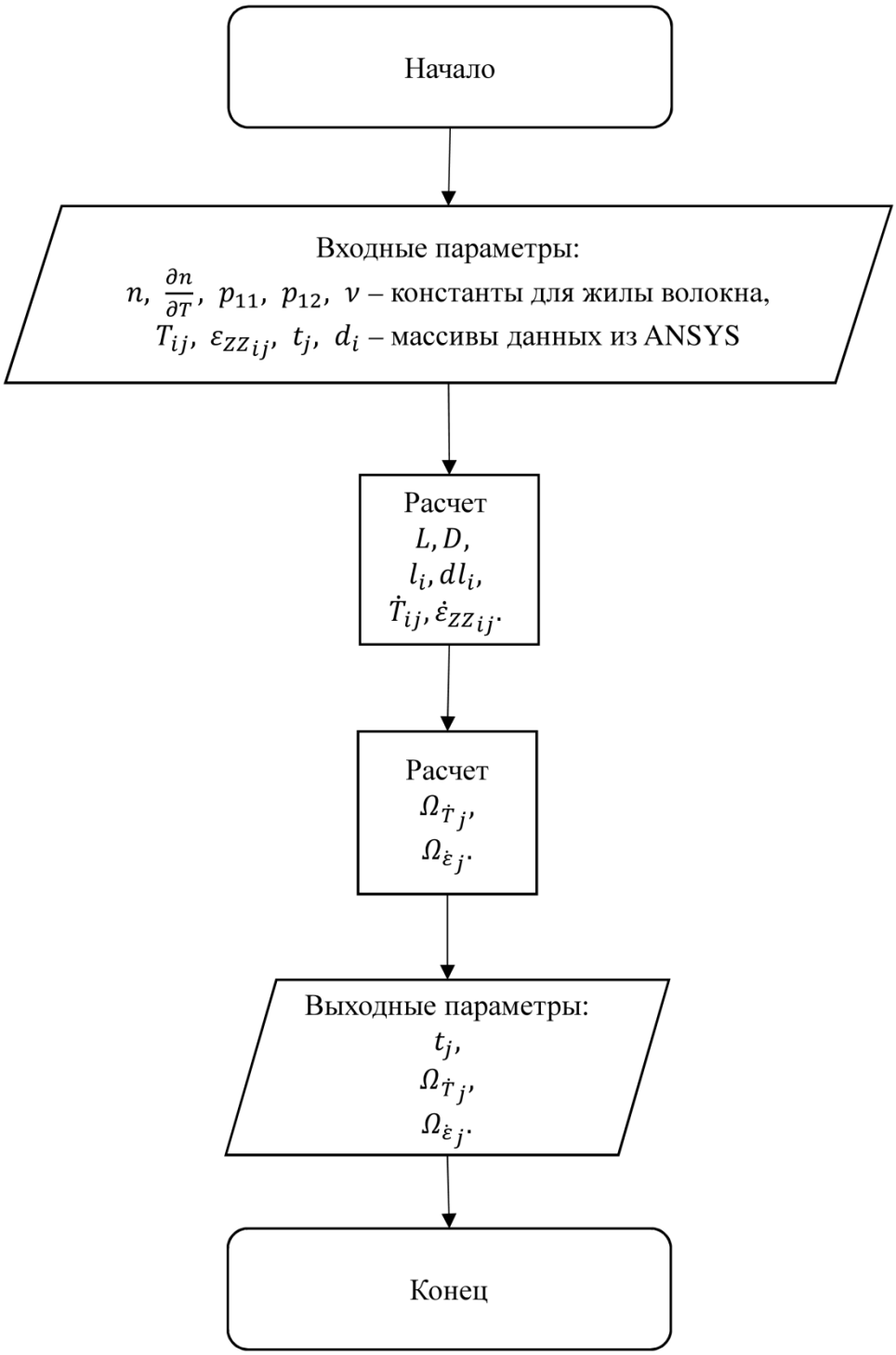

Рис. 2.5. Блок-схема расчета кажущейся угловой скорости

В качестве известных величин вводятся оптические константы n, $\frac{\partial n}{\partial T}$, p_{11}, p_{12} и коэффициент Пуассона ν_1 для жилы оптического волокна, загружаются массивы расчетных данных ANSYS. Массивы включают в себя температуры T_{ij} и деформации $\varepsilon_{ZZ\,ij}$, снимаемые из центра каждого волокна в момент времени t_j, и диаметры витков d_i. Номер i определен последовательностью схемы намотки волоконного контура.

На первом этапе определяются длина контура L, средний диаметр D, длина волокна l_i, длина каждого витка dl_i, скорости температур $\dot{T}_{ij}$ и деформаций $\dot{\varepsilon}_{ZZ\,ij}$:

$$L = \pi \sum_{i=1}^{N} d_i,$$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d_i,$$

$$l_1 = 0, \qquad l_i = l_{i-1} + \pi d_i, \qquad i = \overline{2, N},$$

$$dl_i = \pi d_i, \qquad i = \overline{1, N},$$

$$\dot{T}_{i1} = 0, \qquad \dot{T}_{ij} = \frac{T_{ij} - T_{ij-1}}{t_j - t_{j-1}}, \qquad i = \overline{1, N}, \qquad j = \overline{2, M},$$

$$\dot{\varepsilon}_{ZZ\,i1} = 0, \qquad \dot{\varepsilon}_{ZZ\,ij} = \frac{\varepsilon_{ZZ_{ij}} - \varepsilon_{ZZ_{ij-1}}}{t_j - t_{j-1}}, \qquad i = \overline{1, N}, \qquad j = \overline{2, M},$$

где N – количество витков в контуре, M – количество временных шагов.

На втором этапе вычисляются кажущиеся угловые скорости, вызванные термооптическим $\Omega_{\dot{T}\,j}$ и упругооптическим $\Omega_{\dot{\varepsilon}\,j}$ эффектами:

$$\Omega_{\dot{T}\,j} = \frac{n}{LD} \frac{\partial n}{\partial T} \sum_{i=1}^{N} \dot{T}_{ij} (L - 2l_i) dl_i,$$

$$\Omega_{\dot{\varepsilon}\,j} = \frac{n^2}{LD} \left(1 - \frac{n^2}{2} [(1 - \nu_1) p_{12} - \nu_1 p_{11}]\right) \sum_{i=1}^{N} \dot{\varepsilon}_{ZZ\,ij} (L - 2l_i) dl_i.$$

Таким образом, с помощью данного скрипта определяются кажущиеся угловые скорости по распределениям температур T и деформаций ε_{ZZ} в жиле оптического волокна в каждый момент времени t.

Необходимо отметить, что волоконный контур в нормальных климатических условиях имеет преднапряженное состояние [8], которое получает в процессе изготовления (натяжение при намотке, полимеризация компаунда). Однако принята гипотеза о том, что в начальный момент времени $t = 0$ при температуре $T = 20$ °C деформации в волоконном контуре отсутствуют $\varepsilon_{ZZ} = 0$, ввиду того, что на величину теплового дрейфа влияют изменения (скорости) деформаций вдоль жилы оптического волокна.

2.6 Выводы по главе

1. Для оптически анизотропного волокна типа «Panda», используемого в качестве волновода в контуре волоконно-оптического гироскопа, построен функционал кажущейся угловой скорости, включающий оба механизма возникновения теплового дрейфа: термооптический и упругооптический. Подстановка в функционал распределений скоростей температур и деформаций вдоль жилы волокна в каждый момент времени позволяет вычислить кажущуюся угловую скорость волоконно-оптического гироскопа, вызванную нестационарным тепловым воздействием.

2. Спроектирована и изготовлена специальная осесимметричная оснастка, в которой бескаркасный контур между крышкой и основанием удерживается посредством резиновых прокладок. Такая конструкция позволяет обеспечить осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями.

3. Для расчета температур и деформаций поставлена несвязанная начально-краевая задача квазистационарной термоупругости с детальным учетом неоднородности физико-механических свойств контура в приспособлении.

4. Написан скрипт в среде MATLAB, позволяющий по известным распределениям температур и деформаций в жиле оптического волокна вычислить кажущуюся угловую скорость.

ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ СХЕМЫ НАМОТКИ ВОЛОКОННОГО КОНТУРА

Комплексный подход предполагает решение ряда задач, предшествующих количественному расчету теплового дрейфа, с целью дополнительной экспериментальной верификации параметров модели.

В качестве объекта исследования принят контур длиной 1000 м с модифицированной квадрупольной схемой намотки, расположение витков в которой условно показано на рисунке 3.1. Исследуемый контур состоит из 40 слоев (10 ячеек периодичности) по 80/79 витков в каждом слое. Суммарное количество витков – 3180.

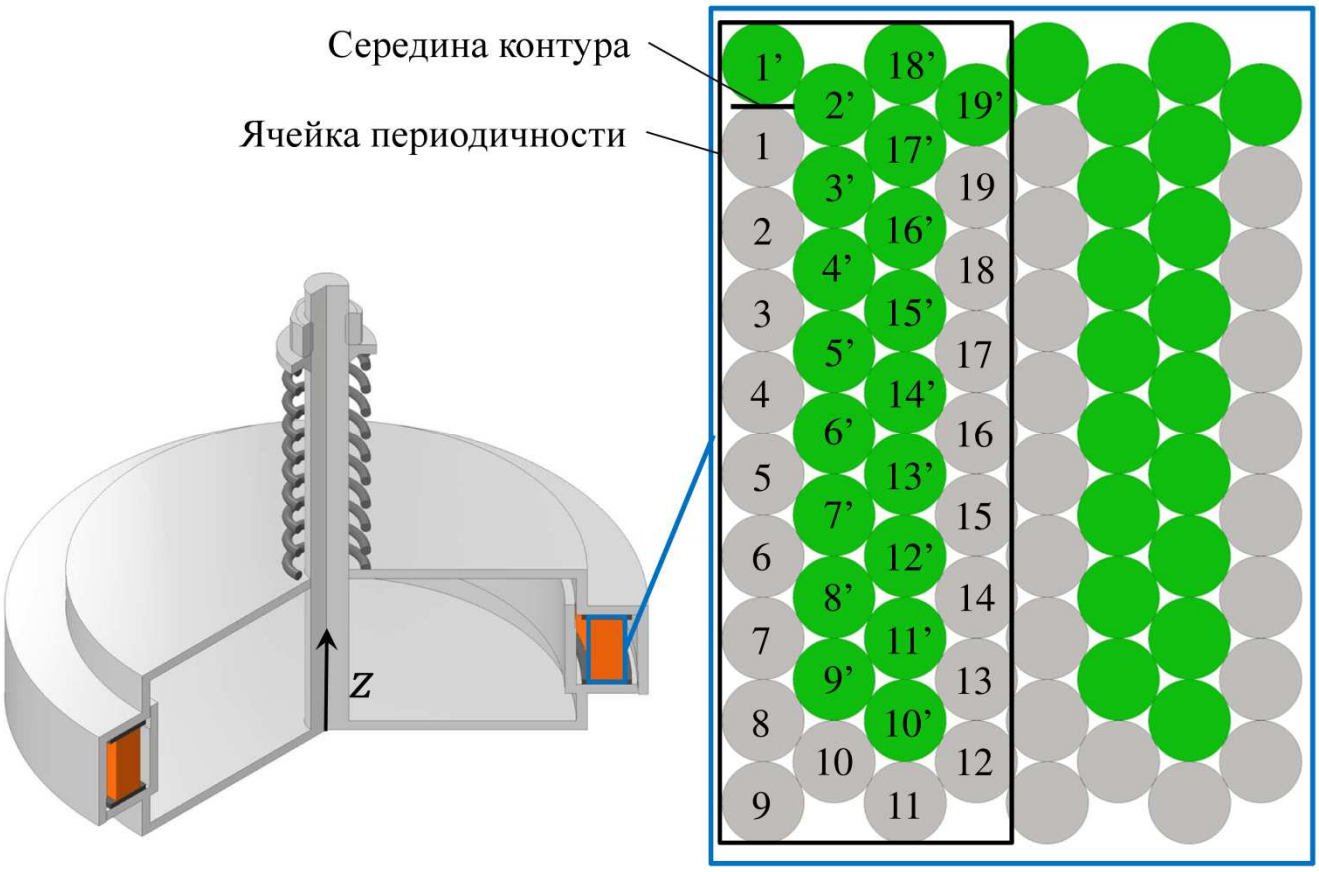

Рис. 3.1. Модифицированная квадрупольная схема намотки.

3.1 Расчет упругих деформаций в контуре и их экспериментальное подтверждение при стационарном температурном воздействии

На первом этапе для проверки гипотезы (2.2) и верификации упругих деформаций ε_{ZZ} в жиле волокна ставится стационарная задача термоупругости (2.7) при краевых условиях (2.9), (2.11), (2.12) с однородным полем температуры. Решение выполнено методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Для дискретизации расчетной геометрии (Рис. 2.4) выбран конечный элемент PLANE186 с двумя степенями свободы (u_x и u_y), учитывающий осевую симметрию и имеющий квадратичную аппроксимацию функций формы. На рисунке 3.2 представлены распределения диагональных компонент тензора деформаций вдоль волокна при T = 40 °C, которые показывают, что компоненты деформаций ε_{XX} и ε_{YY} равны между собой и приближенно равны $-\nu_1\varepsilon_{ZZ}$.

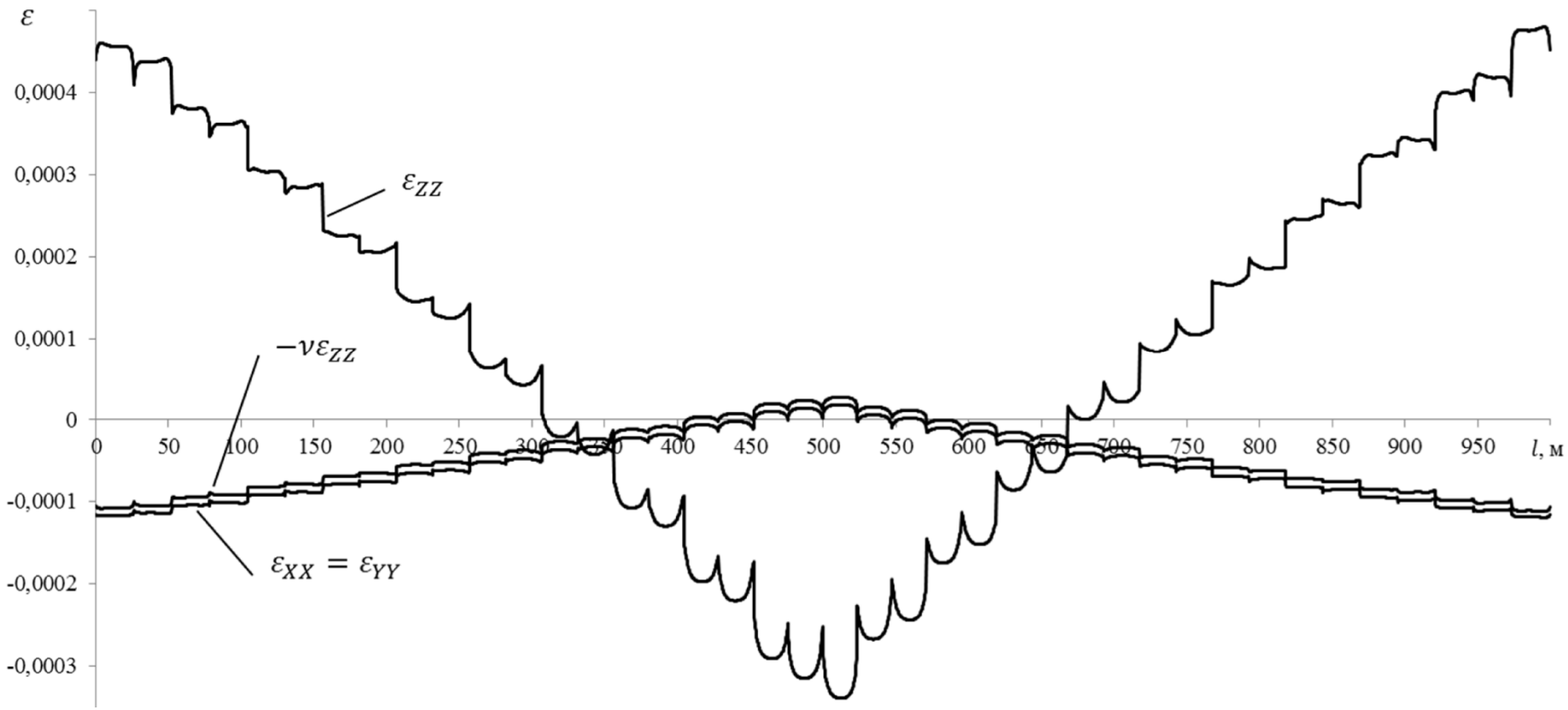

Рис. 3.2. Распределение деформаций ε_{XX}, ε_{YY}, ε_{ZZ} и $-\nu_1\varepsilon_{ZZ}$ по длине волокна

При расчете кажущейся угловой скорости от действия упругооптического эффекта (2.6) вклад деформаций зависит от их распределения относительно середины контура, поэтому для оценки сходимости численного решения задачи термоупругости используется невязка:

$$\delta_k = \frac{\int_0^L \left(\varepsilon_{zz_k} - \varepsilon_{zz_1}\right)(L-2l)dl}{\int_0^L \varepsilon_{zz_k}(L-2l)dl} \cdot 100\%, \qquad k = \overline{2,4}, \tag{3.1}$$

где k – номер вычислительного эксперимента при сгущении сетки.

Первоначальное количество узлов сетки расчетной схемы (Рис. 2.4) составило N_1 = 1,3 млн. Дальнейшее сгущение производилось по формуле:

$$N_k = 2N_{k-1}, \qquad k = \overline{2,4}. \tag{3.2}$$

На рисунке 3.3 представлены результаты оценки сходимости вычислительного эксперимента. Из рисунка видно, что восьмикратное сгущение сетки дает относительную погрешность меньше 0,2 %.

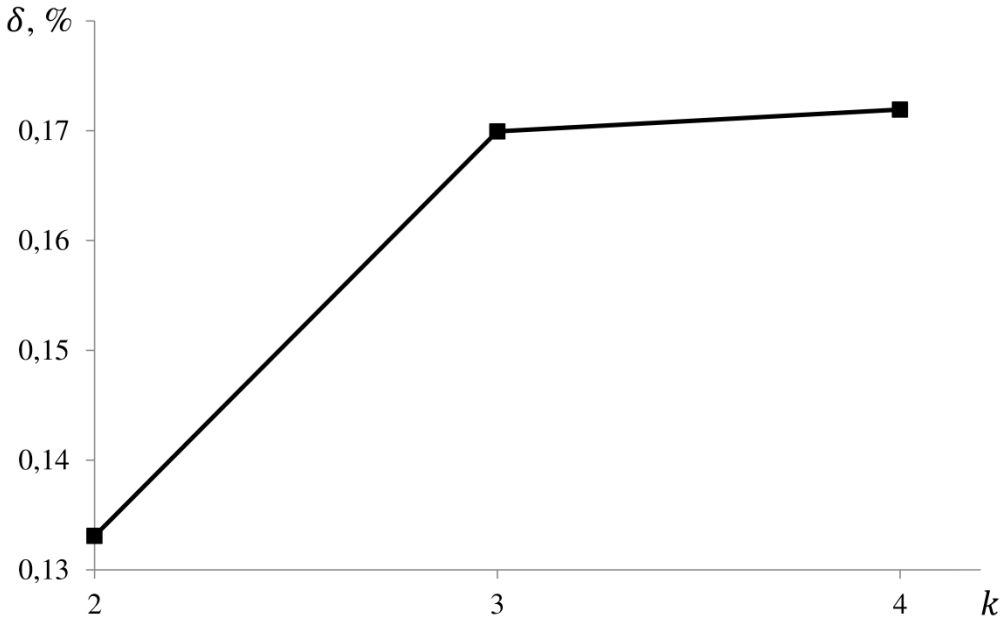

Рис. 3.3. Относительная погрешность решения стационарной задачи термоупругости при сгущении сетки

Для экспериментальной верификации распределения упругих деформаций по длине волокна был использован оптический импульсный анализатор BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, работающий на эффекте вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна [1]. Измерения сдвига бриллюэновской частоты проводились на температурах $T = 20$ °C и $T = 60$ °C после часовой выдержки в термокамере. Схема и методика эксперимента подробно описаны в работе [8]. На рисунке 3.4 показаны сдвиги бриллюэновских частот.

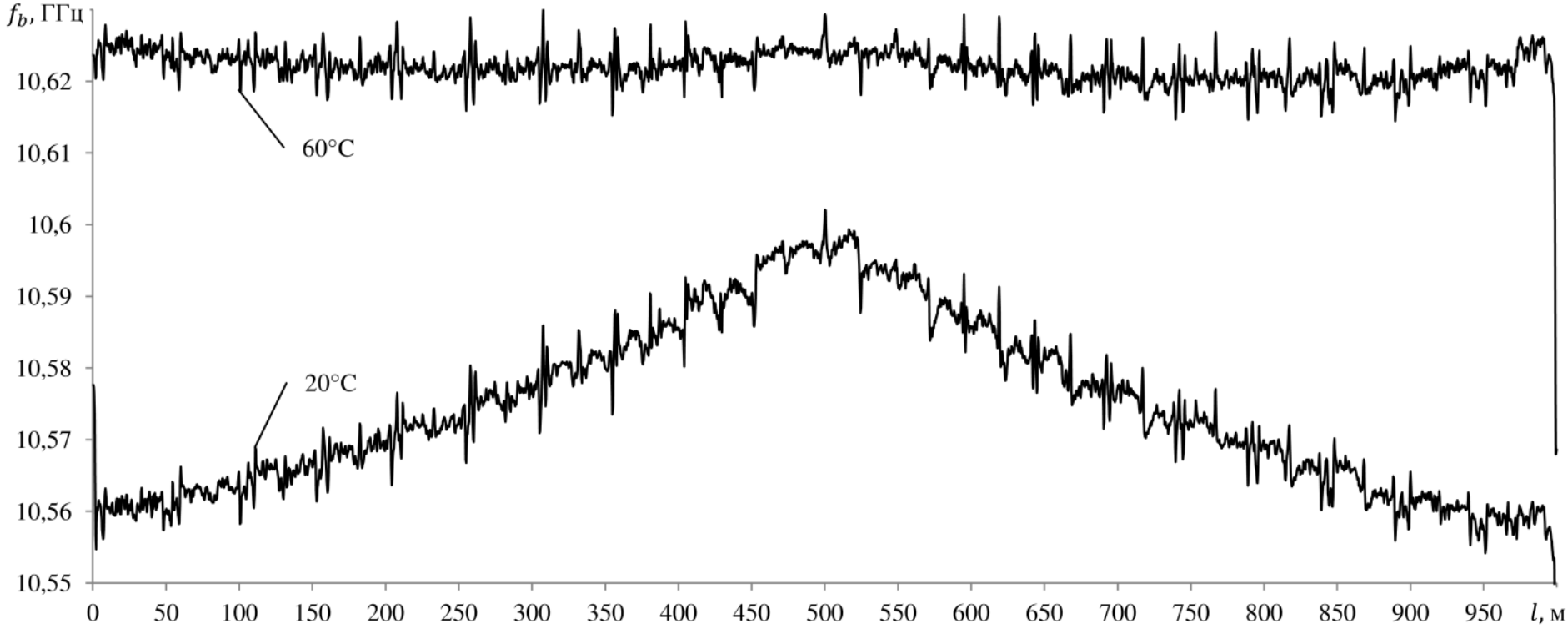

Рис. 3.4. Экспериментальные данные для бриллюэновских частот

Изменение сдвига бриллюэновской частоты при действии температуры и упругих деформаций дается выражением [64, 65]:

$$\Delta f_b = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon_{ZZ}, \quad (3.3)$$

где C_T и C_ε – коэффициенты пропорциональности.

Для определения коэффициента C_ε по аналогии с работой [69] на лабораторном столе была собрана установка (Рис.3.5), в которой волокно длиной 1 м закреплено в микроподвижках, обеспечивающих максимальное перемещение $\Delta l = 4$ мм с шагом 0,5 мм. На волокне выбрано пять точек съема информации (шаг дискретизации BOTDA по координате составляет 0,1 м).

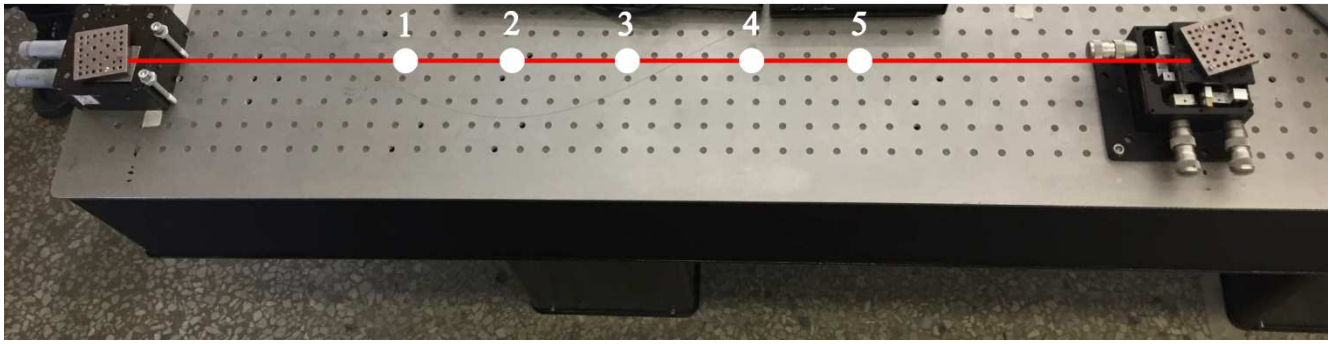

Рис. 3.5. Эксперимент по определению C_ε

По окончанию испытаний была получена диаграмма (Рис. 3.6, а) «сдвиг бриллюэновской частоты – перемещение». Стоит отметить, что при возвращении подвижки на исходную позицию, сдвиг бриллюэновской частоты во всех исследуемых точках не изменился, что говорит об отсутствии проскальзывания в опорах подвижек и о деформировании волокна в упругой зоне. Результат обработки (Рис. 3.6, б) показывает хорошую согласованность между экспериментальными данными в разных точках.

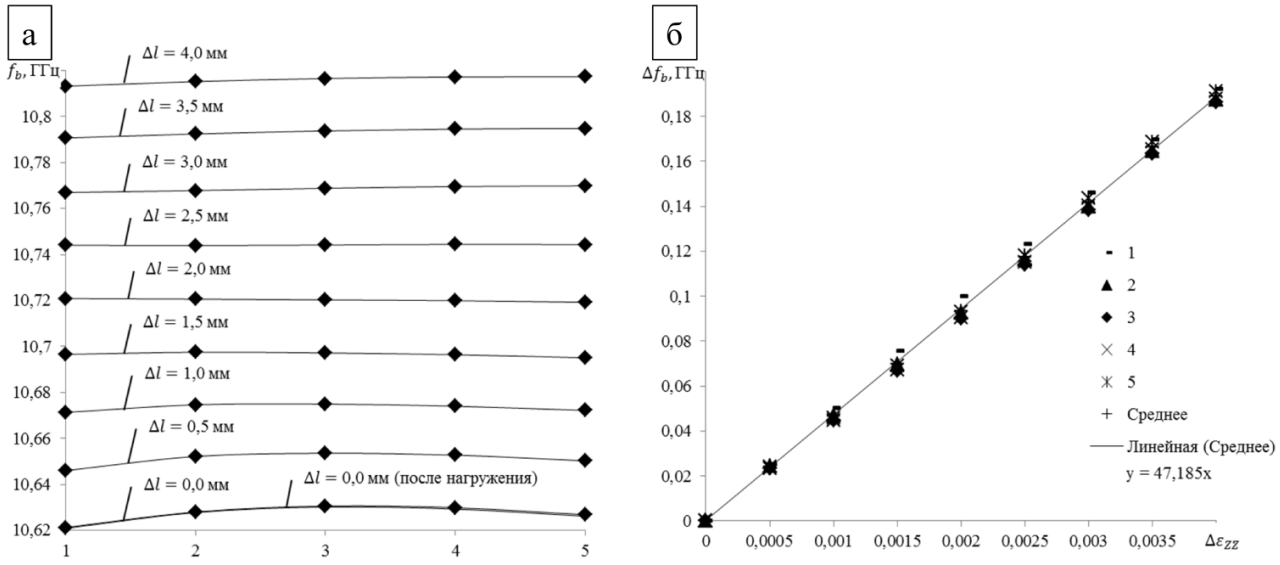

Рис. 3.5. Обработка экспериментальных данных для определения C_ε

Коэффициент C_ε определялся по экспериментальным данным линейной аппроксимацией $\Delta f_b = C_\varepsilon \Delta\varepsilon_{ZZ}$ методом наименьших квадратов. Количественное значение коэффициента $C_\varepsilon = 47{,}2$ ГГц.

При определении коэффициента C_T волокно было помещено в термокамеру. В камере изменялась температура от 25 до 60 °C с шагом 5 °C. Результаты снимались в пяти точках после часовой выдержки на каждой температуре. По окончанию испытаний была получена диаграмма (Рис. 3.7, а) «сдвиг бриллюэновской частоты – температура». Результат обработки (Рис. 3.7, б) показывает хорошую согласованность между экспериментальными данными в различных точках. Коэффициент C_T определялся по экспериментальным данным линейной аппроксимацией $\Delta f_b = C_T \Delta T$ методом наименьших квадратов. Количественное значение коэффициента $C_T = 1{,}05$ МГц/°C.

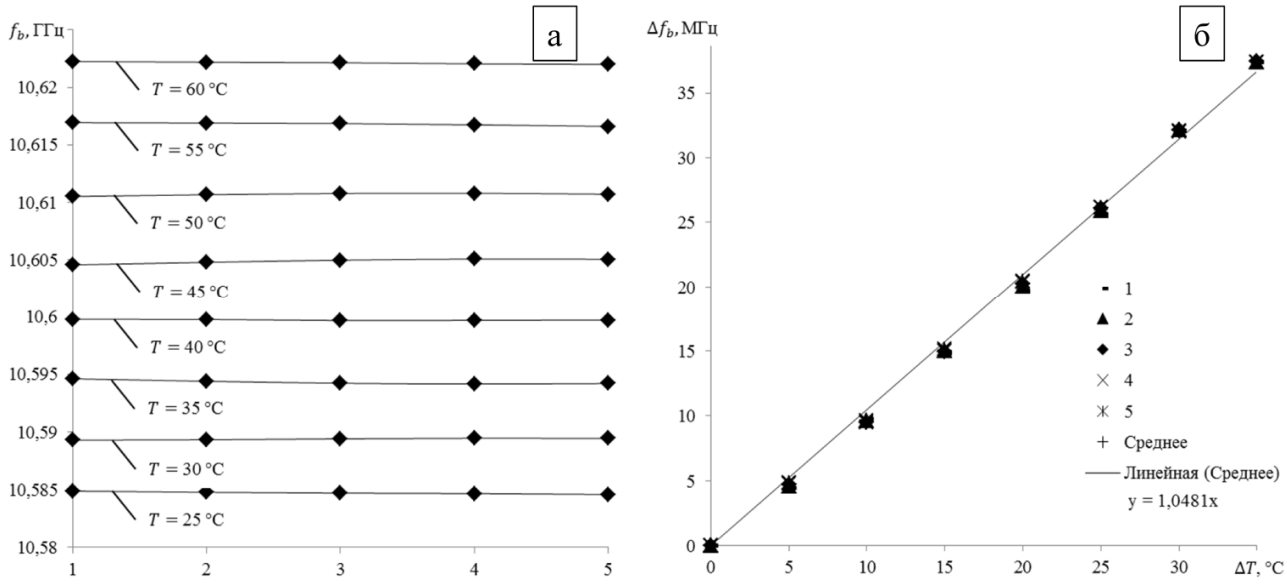

Рис. 3.7. Обработка экспериментальных данных для определения C_T

Из формулы (3.3) следует:

$$\Delta\varepsilon_{ZZ} = \frac{1}{C_\varepsilon}(\Delta f_b - C_T \Delta T).$$

На рисунке 3.8 показано сравнение расчетных деформаций с экспериментальными в жиле волокна контура. Для их совпадения в вычислительном эксперименте варьировался коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия в диапазоне от 0,495 до 0,499 с шагом 0,001. Наилучшее согласование упругих деформаций получается при $\nu_2 =$ 0,498.

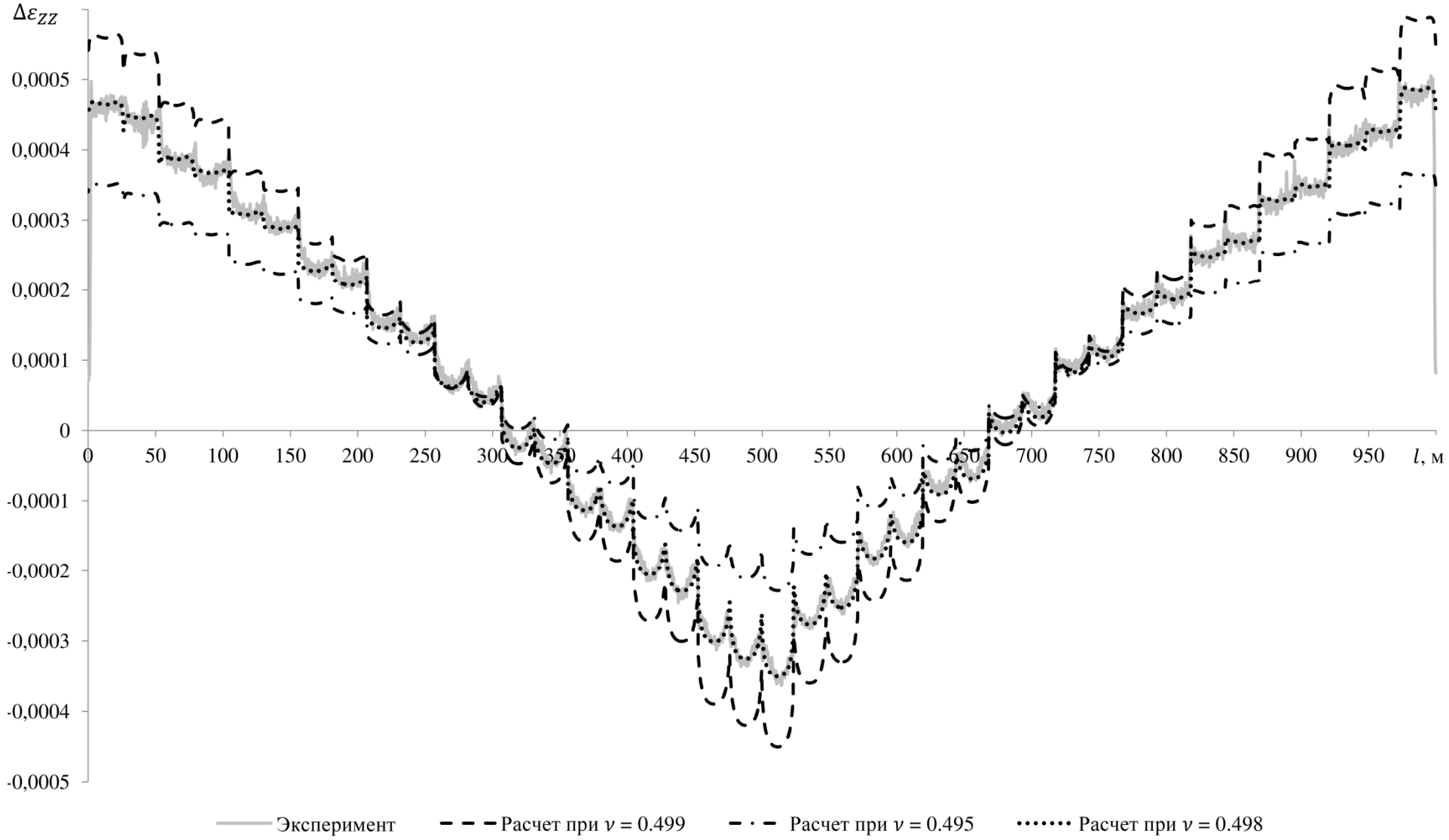

Рис. 3.8. Верификация деформаций $\Delta\varepsilon_{zz}$

3.2 Расчет температур в контрольных точках и их сравнение с показаниями термодатчиков при нестационарном тепловом воздействии

На втором этапе с целью определения коэффициента теплоотдачи h для граничных условий (2.13) между деталями оснастки и принудительно движущимся воздухом в термокамере решается начально-краевая задача теплопроводности (2.8), (2.10), (2.13), (2.14) методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Для дискретизации расчетной геометрии (Рис. 2.4) выбран конечный элемент PLANE77 с одной степенью свободы (T), учитывающий осевую симметрию и имеющий квадратичную аппроксимацию функций формы. В качестве воздействия $T_c(t)$ задается режим нагрева от 20 до 60 °С со скоростью $\dot{T}_c$ = 1 °С/мин. Коэффициент теплоотдачи для поверхности приспособления S варьируется в диапазоне от 5 до 25 Вт/(м^2·К) с шагом 1 Вт/(м^2·К). Шаг интегрирования по времени составляет 10 с. На рисунках 3.9 и 3.10 показано сопоставление расчетных и экспериментальных температур в местах установки датчиков. Совпадение достигается при h = 13 Вт/(м^2·К).

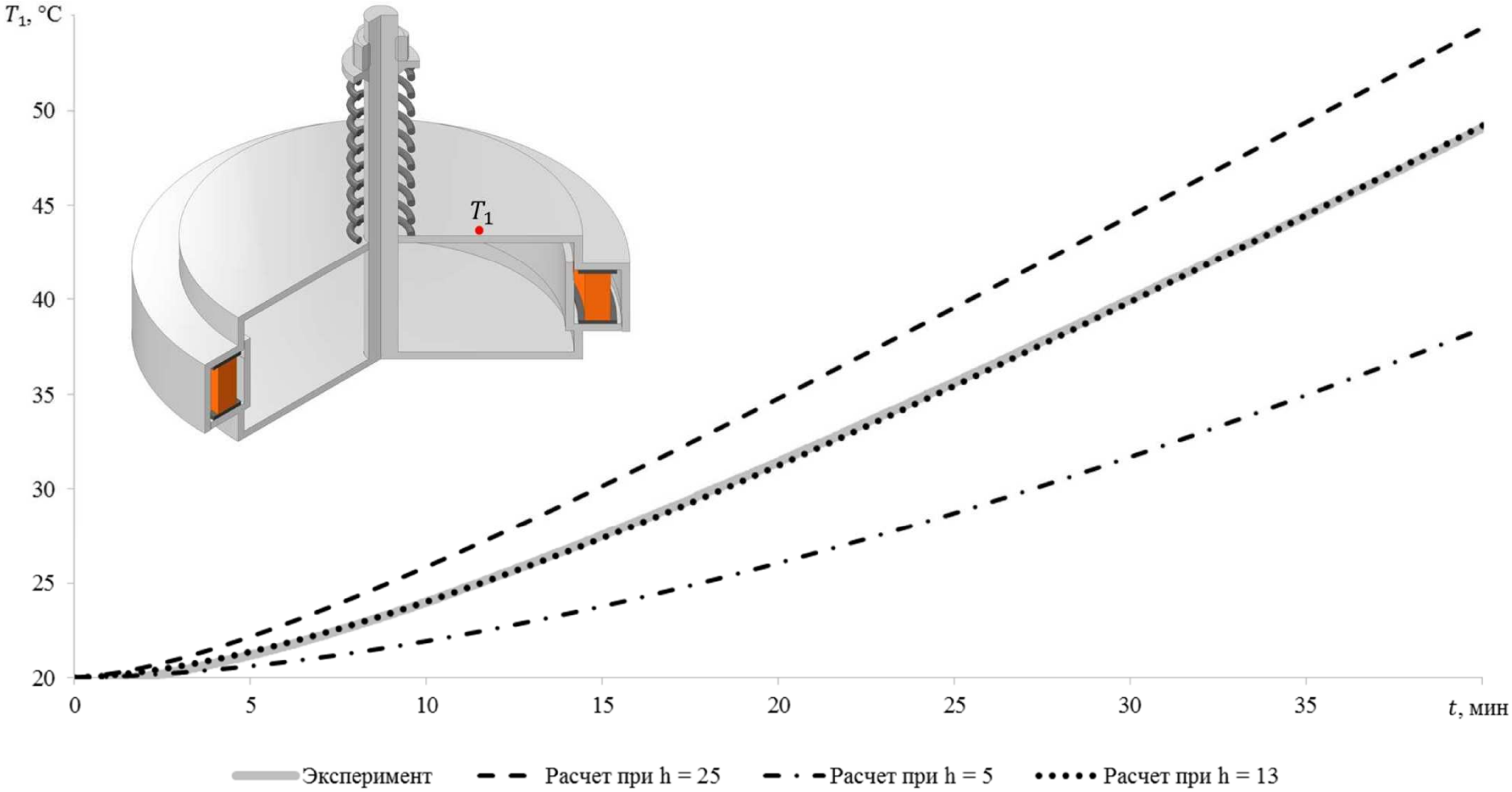

Рис. 3.9. Сопоставление расчетных и экспериментальных температур в первой контрольной точке приспособления

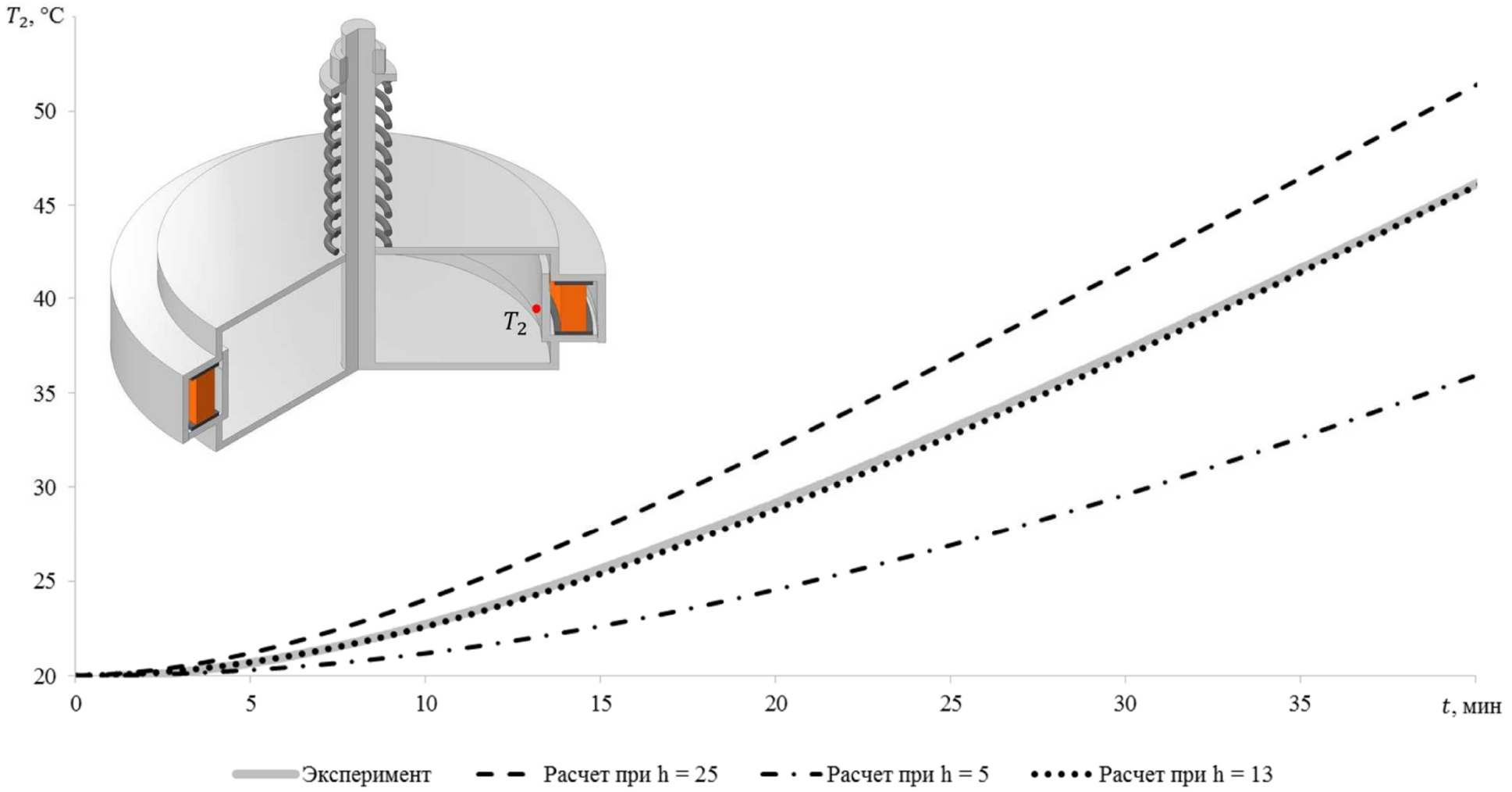

Рис. 3.10. Сопоставление расчетных и экспериментальных температур во второй контрольной точке приспособления

Вклад температур в кажущуюся угловую скорость (2.6) зависит от их распределения относительно центра намотки контура, поэтому аналогично (3.1) для оценки сходимости численного решения используется невязка:

$$\delta_k = \frac{\int_0^L (T_k - T_1)(L - 2l)dl}{\int_0^L T_k(L - 2l)dl} \cdot 100\%, \qquad k = \overline{2,4},$$

где k – номер вычислительного эксперимента при сгущении сетки.

Сгущение сетки производилось по формуле (3.2). На рисунке 3.11 представлены результаты оценки сходимости вычислительного эксперимента. При сгущении сетки относительная погрешность между решениями не превосходит 0,03 %,.

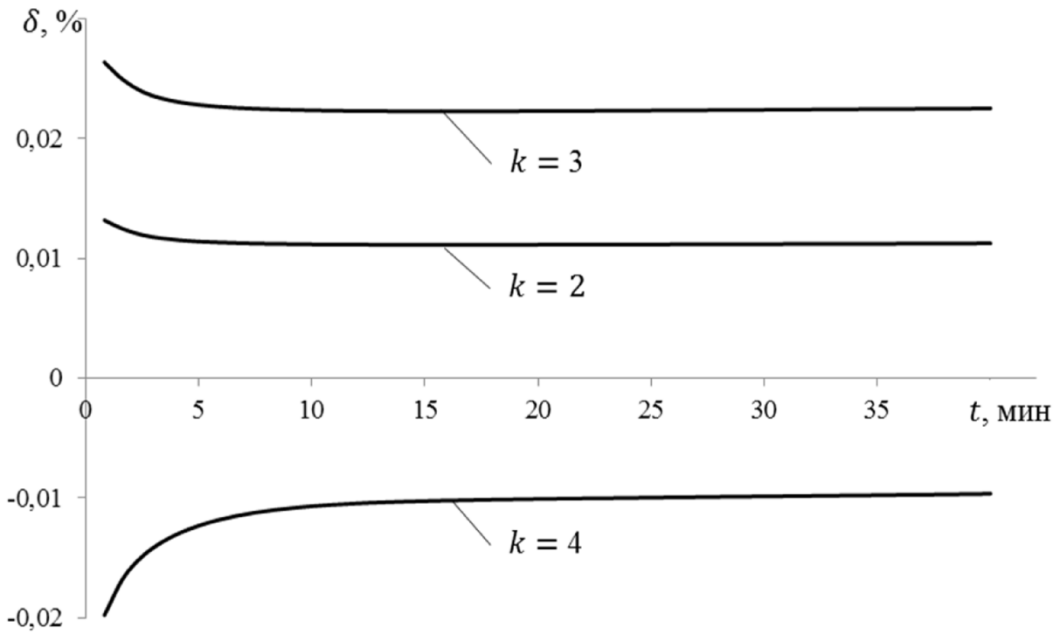

Рис. 3.11 Относительная погрешность решения нестационарной задачи теплопроводности при сгущении сетки

3.3 Расчет полей температур и деформаций при воздействии нестационарной тепловой нагрузки

На третьем этапе для определения скоростей температур и деформаций решается квазистационарная задача термоупругости (2.9)–(2.10) с краевыми условиями (2.11)–(2.14). Для дискретизации расчетной геометрии (Рис. 2.4) выбран конечный элемент PLANE223 с тремя степенями свободы (u_x, u_y и T), учитывающий осевую симметрию и имеющий квадратичную аппроксимацию функций формы. В качестве воздействия $T_c(t)$ задается термопереход от 20 до 60 °C со скоростью изменения температуры $\dot{T}_c = 1$°C/мин с последующей часовой выдержкой при максимальной температуре (Рис. 3.12). Шаг интегрирования по времени составляет 10 с.

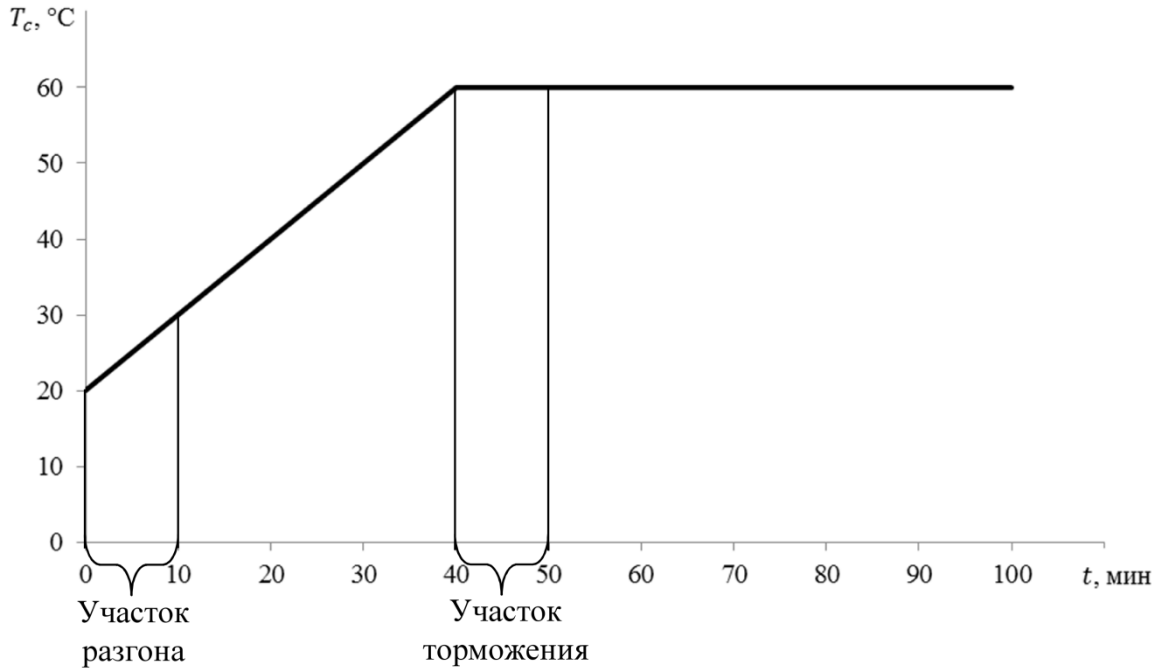

Рис. 3.12. Температура окружающей среды T_c

На рисунках 3.13 и 3.14 представлены зависимости скоростей температуры и деформаций вдоль волокна от времени.

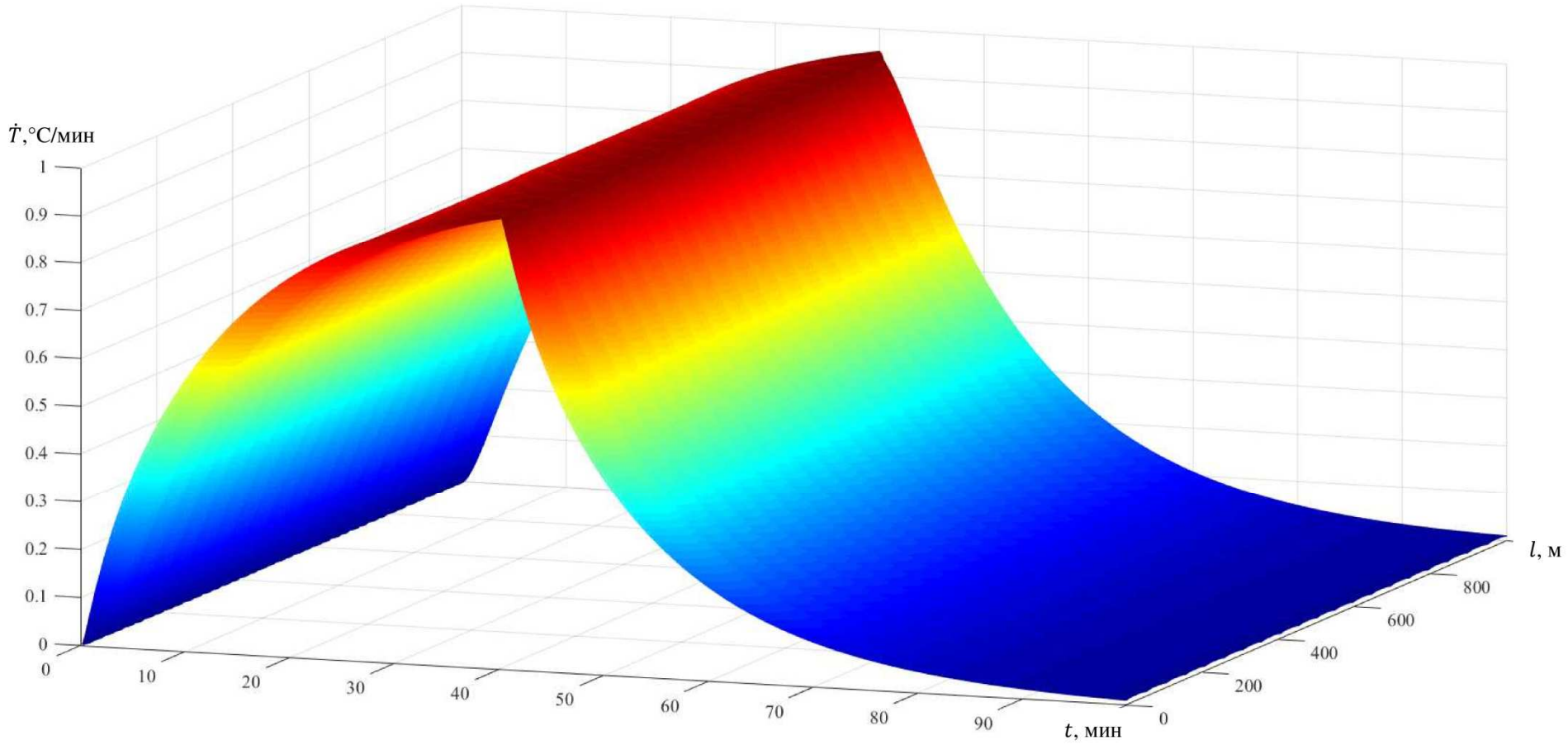

Рис. 3.13. Распределение скорости температуры по длине волокна в зависимости от времени.

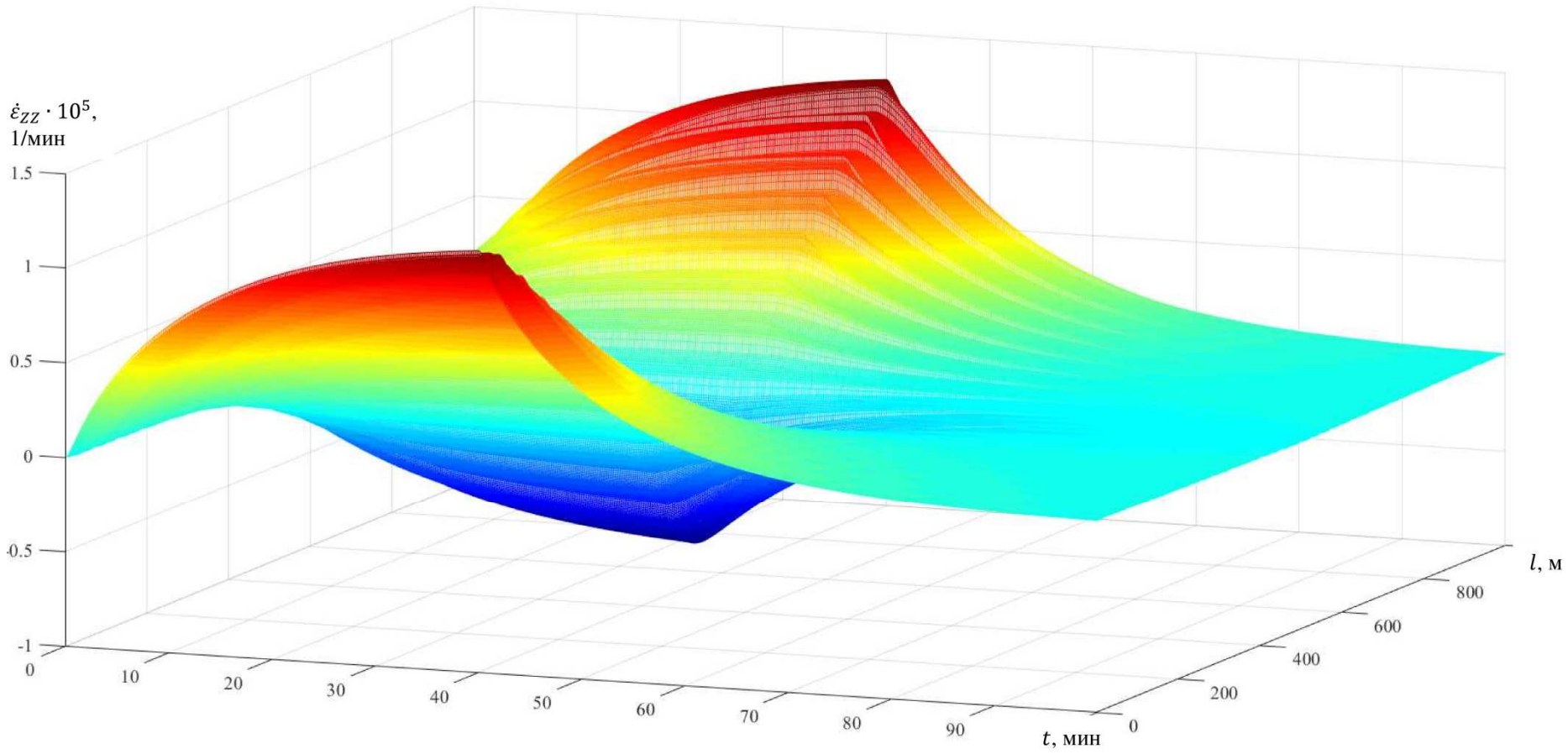

Рис. 3.14. Распределение скорости деформации $\dot{\varepsilon}_{zz}$ по длине волокна в зависимости от времени.

Максимальное различие скоростей температур вдоль волокна наблюдается на участках разгона и торможения. Во временном диапазоне от 35 до 40 минут темп нагрева практически однороден по сечению волоконного контура и выходит на значение окружающей среды $\dot{T}_c$. В отличие от скорости температуры скорость деформации по длине волокна изменяется на протяжении всего участка нагрева и максимальное различие наблюдается во время максимального темпа нагрева (t = 40 мин).

3.4 Изучение относительного вклада компонент функционала теплового дрейфа и экспериментальная верификация

Подстановка скоростей температур и деформаций в функционал (2.6) дает кажущиеся угловые скорости, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами (Рис. 3.15). Волоконный контур в приспособлении исследуется в нормальном (с осью чувствительности, совпадающей с направлением оси z) и перевернутом (с осью чувствительности, противоположно направленной по отношению к оси z) положениях. Равноудаленные от середины волокна в контуре участки при намотке вниз располагаются на расстоянии одного витка друг от друга (2–2’, 3–3’ и т.д. см. рис. 3.1), а при намотке вверх оказываются разнесенными друг от друга на два витка (12–12’, 13–13’ и т.д. см. рис. 3.1). Таким образом, при намотке вверх расстояние между равноудаленными от середины контура участками волокна больше, чем при намотке вниз. Удаленность витков и разница расстояний при намотке приводит к резкому увеличению кажущихся угловых скоростей $\Omega_{\dot{T}}$ и $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$ на участках разгона и торможения. Увеличение скорости температуры (Рис. 3.13) приводит к увеличению неоднородности распределения скоростей деформаций по длине волокна (Рис. 3.14). Это приводит к формированию кажущейся угловой скорости $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$ в диапазоне от 10 до 40 мин, причем, максимальное значение наблюдается при максимальной

скорости нагрева (40 мин). При перевороте контура меняется направление намотки, при намотке вниз расстояние между равноудалёнными от середины контура витками будет больше, чем при намотке вверх. Данная смена расстояний приводит к смене знака угловых скоростей $\Omega_{\dot{T}}$ и $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$ на участках разгона и торможения, что говорит о высокой чувствительности модифицированной квадрупольной схемы намотки к полю скоростей температур. Угловые скорости, вызванные разными механизмами, сопоставимы по величине для данной схемы намотки.

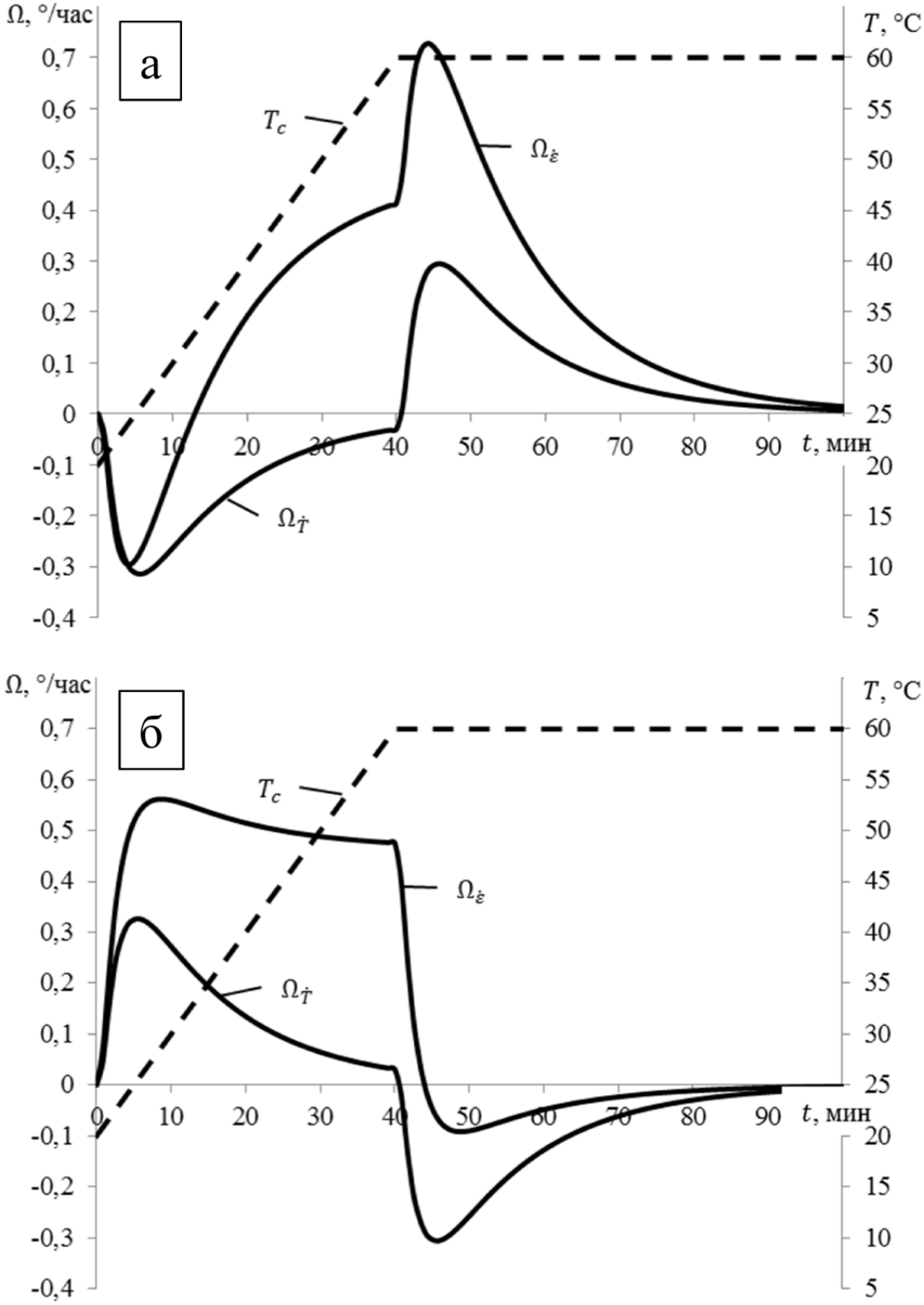

Рис. 3.15. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

Данные рис. 3.15 свидетельствуют о существенной трансформации графиков $\Omega_{\dot{T}}$ и $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$ при технологически простой операции переворачивания волоконного контура в приспособлении. Поэтому данные испытания нормального и перевернутого контуров являются весьма ценными для экспериментального подтверждения расчетов по предложенной математической модели.

На рисунке 3.16 представлены суммарные угловые скорости, в сравнении с экспериментальными данными. Результаты экспериментальных данных были сглажены простым скользящим средним на интервале 10 секунд. Также из сигнала была исключена постоянная составляющая скорости вращения Земли. Из рисунка видно, что функционал кажущейся угловой скорости при условии достоверно найденных температур и деформаций хорошо качественно и количественно описывает тепловой дрейф нормального и перевернутого волоконных контуров в приспособлении.

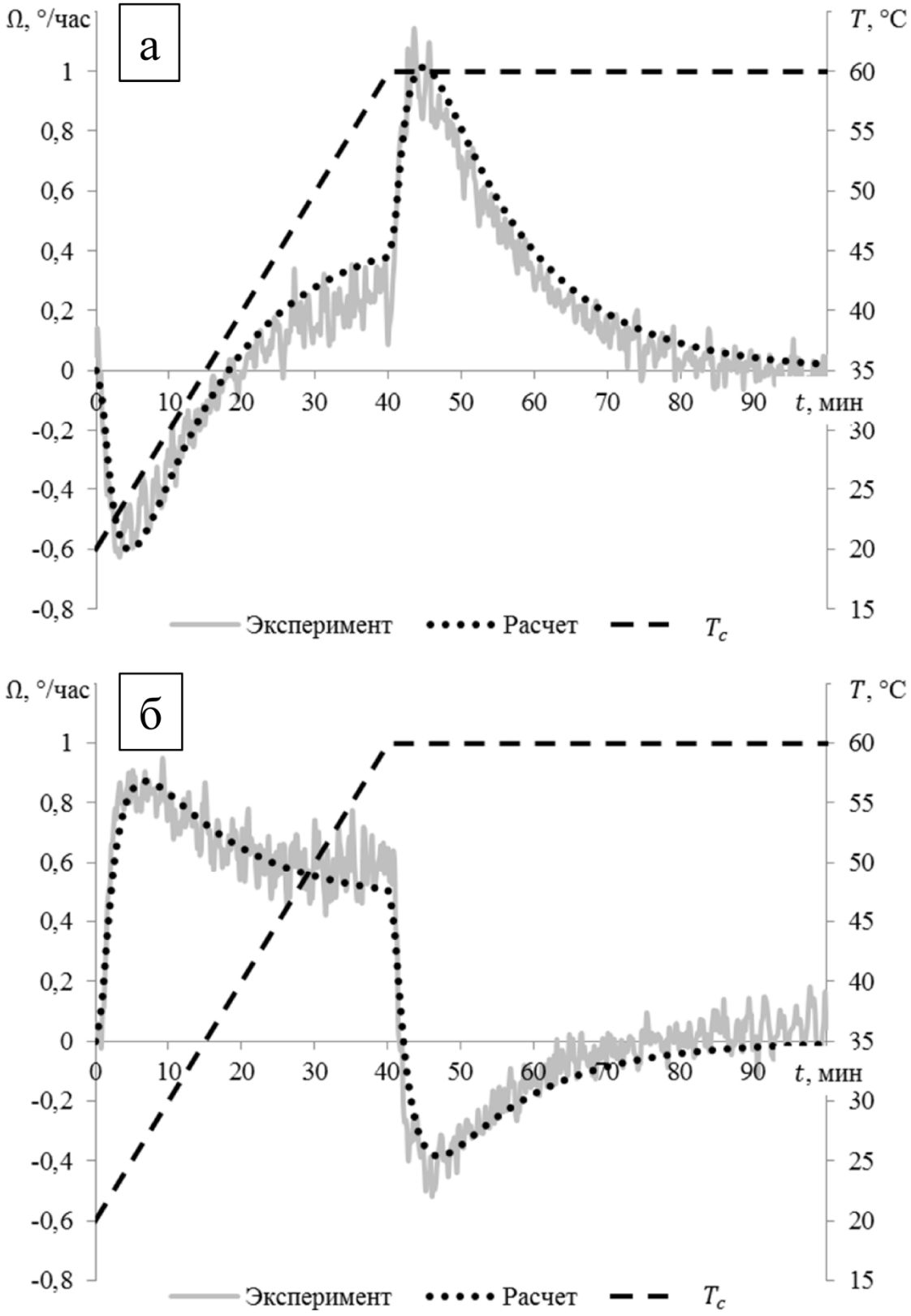

Рис. 3.16. Верификация теплового дрейфа в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

3.5 Выводы по главе

1. Для верификации упругих деформаций при однородном температурном воздействии решена задача стационарной термоупругости. С помощью оптического импульсного анализатора при двух значениях температуры экспериментально установлены сдвиги бриллюэновских частот, на основе которых получено распределение деформаций. Их сопоставление с расчетными позволило уточнить коэффициент Пуассона слабо сжимаемого первичного покрытия.

2. Сопоставление температур из решения нестационарной задачи теплопроводности и показания двух установленных в приспособлении датчиков позволило определить коэффициент теплопередачи между оснасткой и движущимся в термокамере воздухом.

3. Подстановка скоростей температур и деформаций из решения квазистационарной задачи термоупругости в функционал кажущейся угловой скорости позволил сравнить между собой влияние термооптического и упругооптического эффектов для модифицированной квадрупольной схемы намотки.

4. Использование комплексного подхода к математическому моделированию теплового дрейфа позволило получить качественные и количественные совпадения расчетных и экспериментальных кажущихся угловых скоростей при исследованиях волоконного контура в двух направлениях оси чувствительности.

ГЛАВА 4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА

Использование модифицированной квадрупольной схемы в волоконном контуре было обусловлено технологией намотки, а именно процессом организации перехода волокна со слоя на слой. Как показало исследование, у данной схемы есть существенные недостатки, которые сказываются на величине теплового дрейфа:

– равноудаленные от центра световода участки располагаются не вплотную друг к другу, а на расстоянии;

– при намотке вверх и вниз расстояния между равноудалёнными от середины контура витками разные.

Необходимо отметить, что при воздействии нестационарного теплового поля на контур с модифицированной схемой намотки со скоростью температуры 1 °С/мин снижает точность волоконно-оптического гироскопа относительно стационарных условий на 2 порядка. А алгоритмическая компенсация теплового дрейфа в приборе с таким контуром представляет особо сложную задачу, ввиду сильной чувствительности данной намотки к распределению температуры.

Дальнейшие исследования теплового дрейфа будут направлены на его минимизацию. Поэтому необходимо поменять схему намотки на такую, которая бы не имела описанных выше недостатков.

4.1 Оригинальная квадрупольная схема намотки волоконного контура

Следующим исследуется волоконный контур, имеющий те же самые геометрические характеристики (длина – 1000 м, 40 слоев, 80/70 витков в слое), с оригинальной квадрупольной схемой намотки (Рис. 4.1). Данная схема также имеет ячейку периодичности – 4 слоя. А при намотке вниз (1–1’, 2–2’, 3–3’ и т.д.)

и вверх (11–11’, 12–12’, 13–13’ и т.д.) равноудаленные от середины контура витки располагаются вплотную друг к другу, что минимизирует разницу скоростей температур и деформаций.

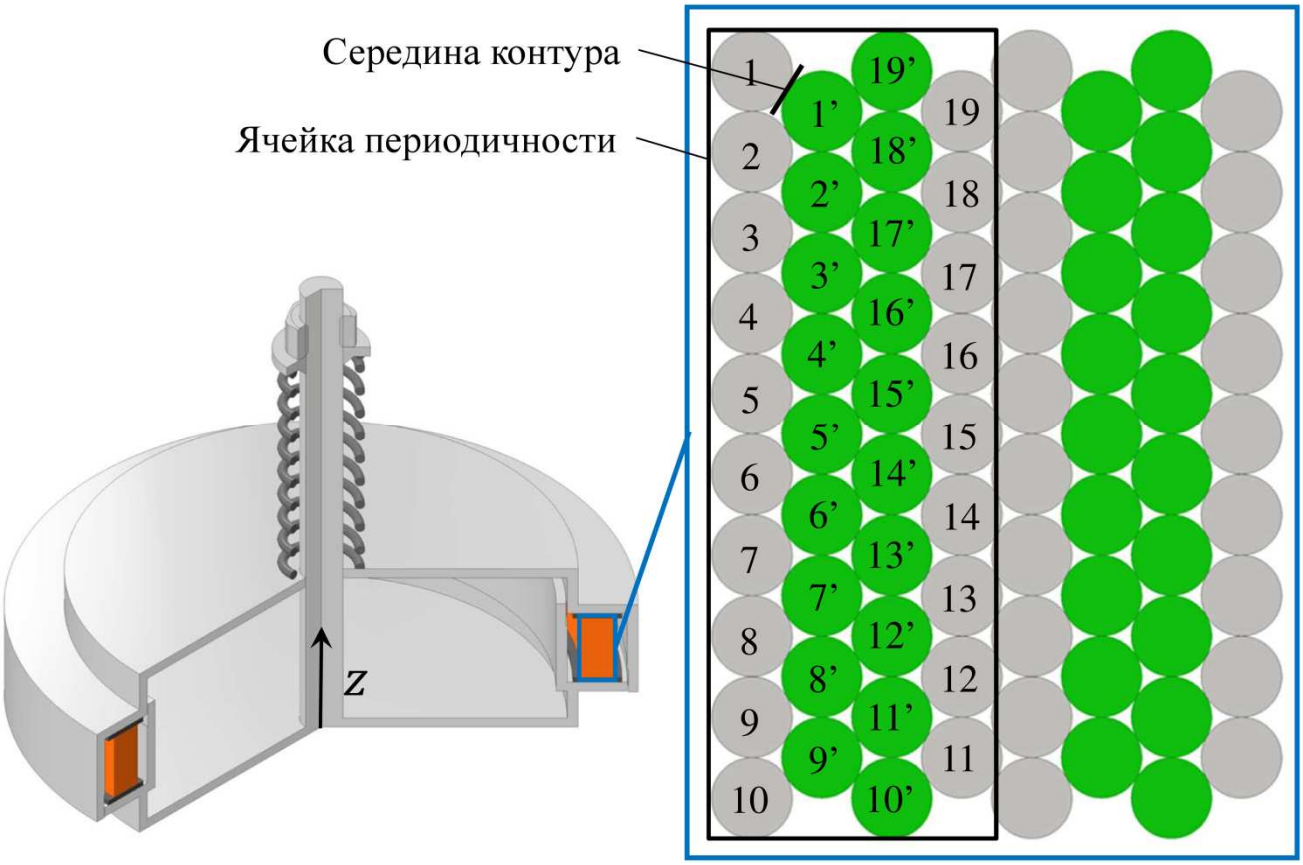

Рис. 4.1 Оригинальная квадрупольная схема намотки

На рисунке 4.2 показаны составляющие кажущейся угловой скорости, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами.

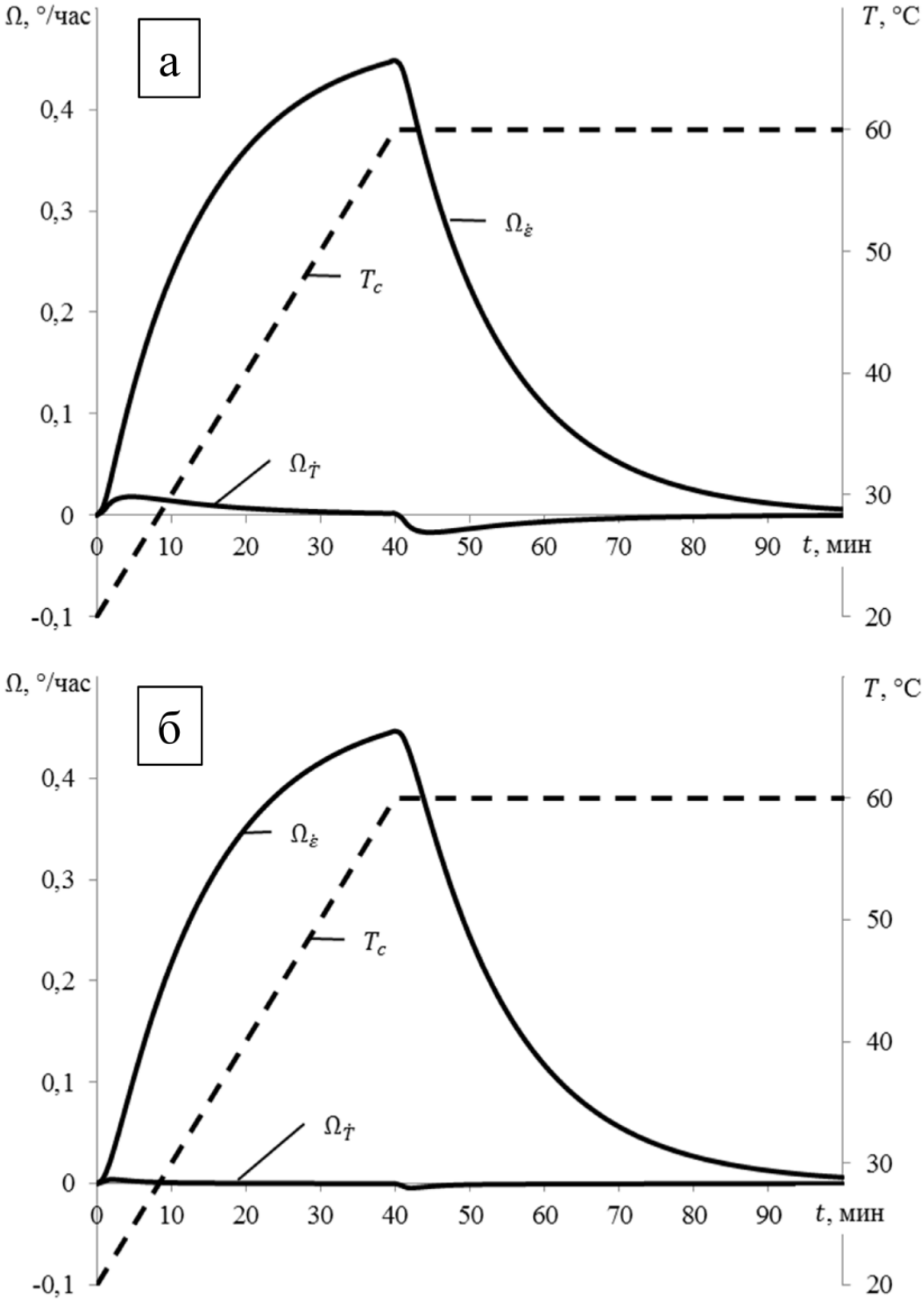

Рис. 4.2. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура

Результат расчета показывает существенную разницу между модифицированной и оригинальной схемами намоток. Ввиду того, что в оригинальной квадрупольной схеме равноудаленные от центра световода участки располагаются вплотную друг к другу, качественно и количественно меняются поведения кажущихся угловых скоростей, вызванных разными механизмами. Решающую роль в формировании теплового дрейфа играет упругооптический эффект, причем, угловая скорость $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$ не имеет резких скачков на участках разгона и торможения и не изменяется при перевороте контура. Составляющая кажущейся угловой скорости $\Omega_{\dot{T}}$, вызванная термооптическим эффектом, при перевороте контура изменяется по амплитуде в четыре раза, но ее вклад в суммарный тепловой дрейф ничтожен. Таким образом, оригинальная квадрупольная схема намотки имеет преимущества по сравнению с модифицированной с точки зрения компенсации исходного теплового дрейфа в волоконно-оптическом гироскопе. Суммарная кажущаяся угловая скорость имеет меньшую амплитуду и практически не изменяется от переворота, поэтому может быть надежно алгоритмически скомпенсирована на уровне прибора методами теории автоматического управления.

На рисунке 4.3 представлены сопоставления расчетных и экспериментальных кажущихся угловых скоростей. Результаты экспериментальных данных были сглажены простым скользящим средним на интервале 10 секунд. Также из сигнала была исключена постоянная составляющая скорости вращения Земли. Сравнение данных показывает хорошее совпадение, что в очередной раз доказывает непротиворечивость разработанной математической модели.

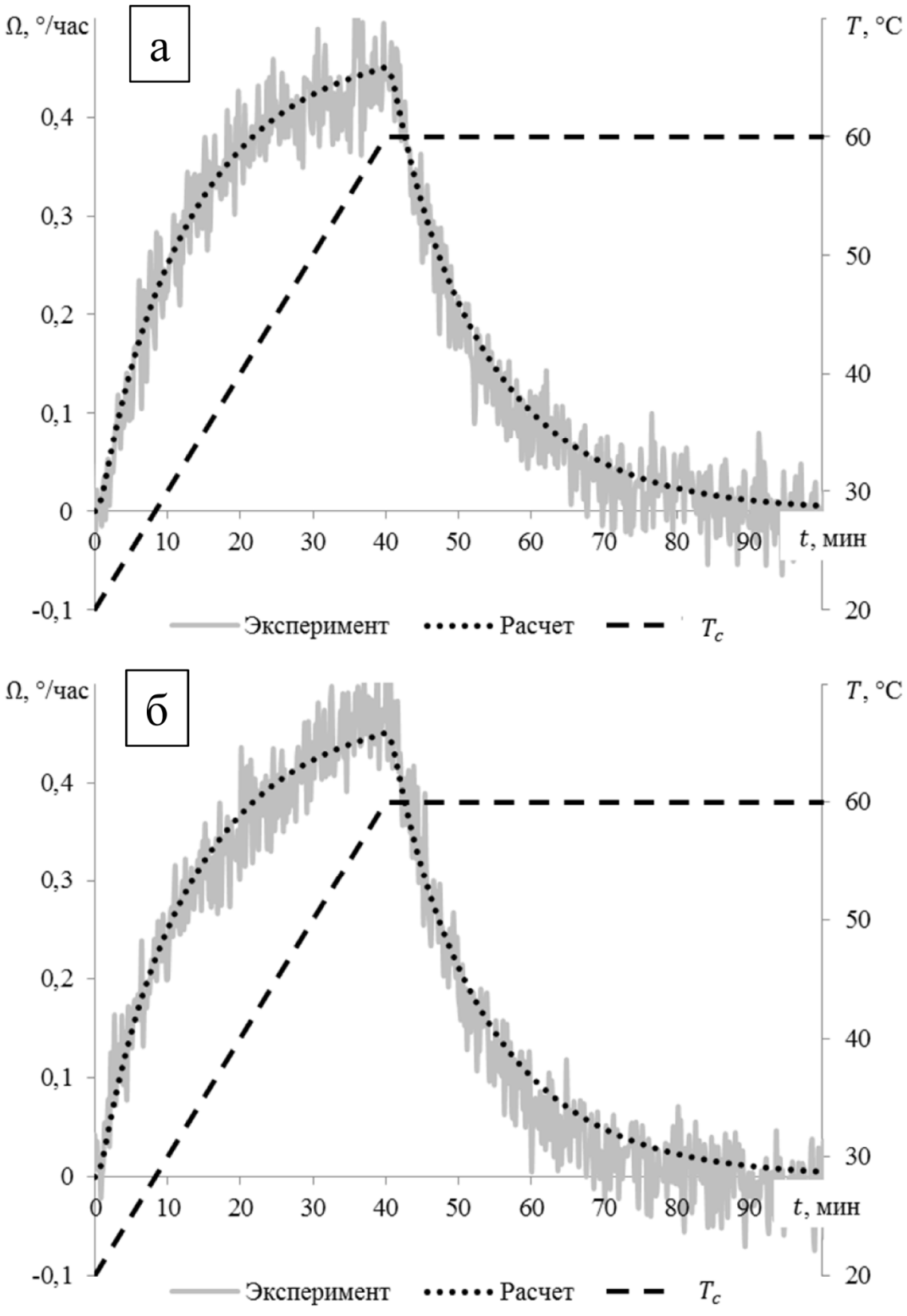

Рис. 4.3. Верификация теплового дрейфа в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура с оригинальной квадрупольной схемой намотки

4.2 Изменения геометрических параметров волоконного контура с оригинальной квадрупольной схемы намотки

В целях снижения амплитуды теплового дрейфа при использовании контура с оригинальной квадрупольной схемой намотки был опробован вариант варьирования геометрии волоконного контура. При условии постоянства длины и среднего диаметра волоконного контура изменялось количество слоев (кратно 4) и витков в слое. На рисунке 4.4 показаны максимальные амплитуды суммарной кажущейся угловой скорости после серии вычислительных экспериментов. Точкой на графике обозначен вариант, рассмотренный в разделе 4.1. Увеличение количества слоев не приводит к значительному снижению теплового дрейфа и усложняет технологический процесс самой намотки контура.

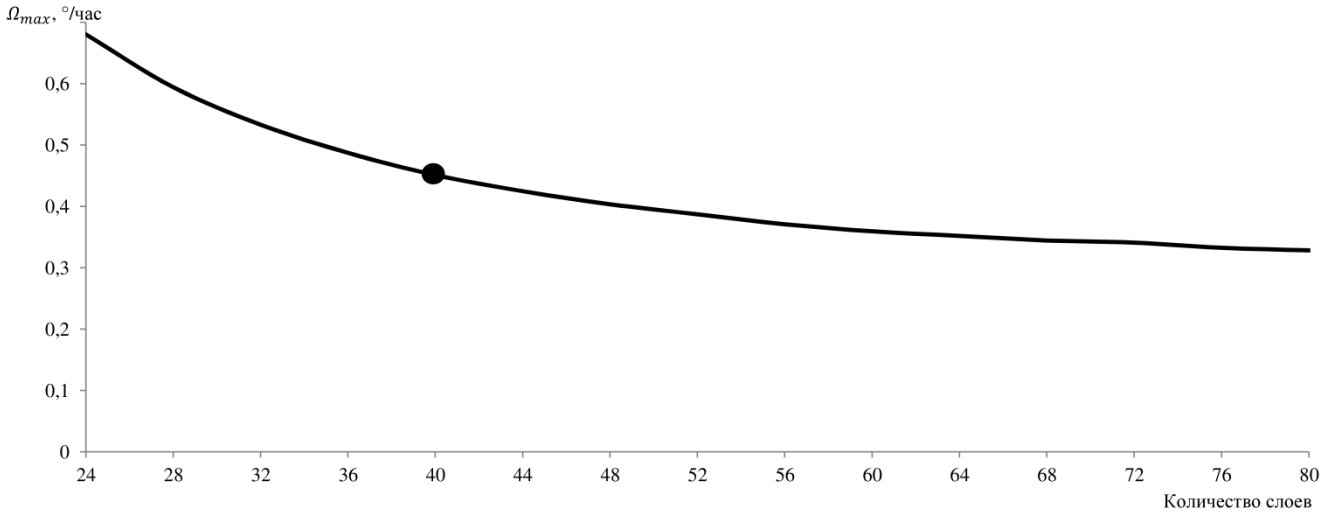

Рис. 4.4. Варьирование геометрии волоконного контура с оригинальной квадрупольной схемой намотки

4.3 Октупольная схема намотки волоконного контура

В разделах 4.1 и 4.2 подробно исследована схема с максимально близким расположением равноудаленных от центра витков. Однако существуют схемы

намотки с большим количеством слоев ячейке периодичности. На рисунке 4.5 представлена октупольная схема намотки контура.

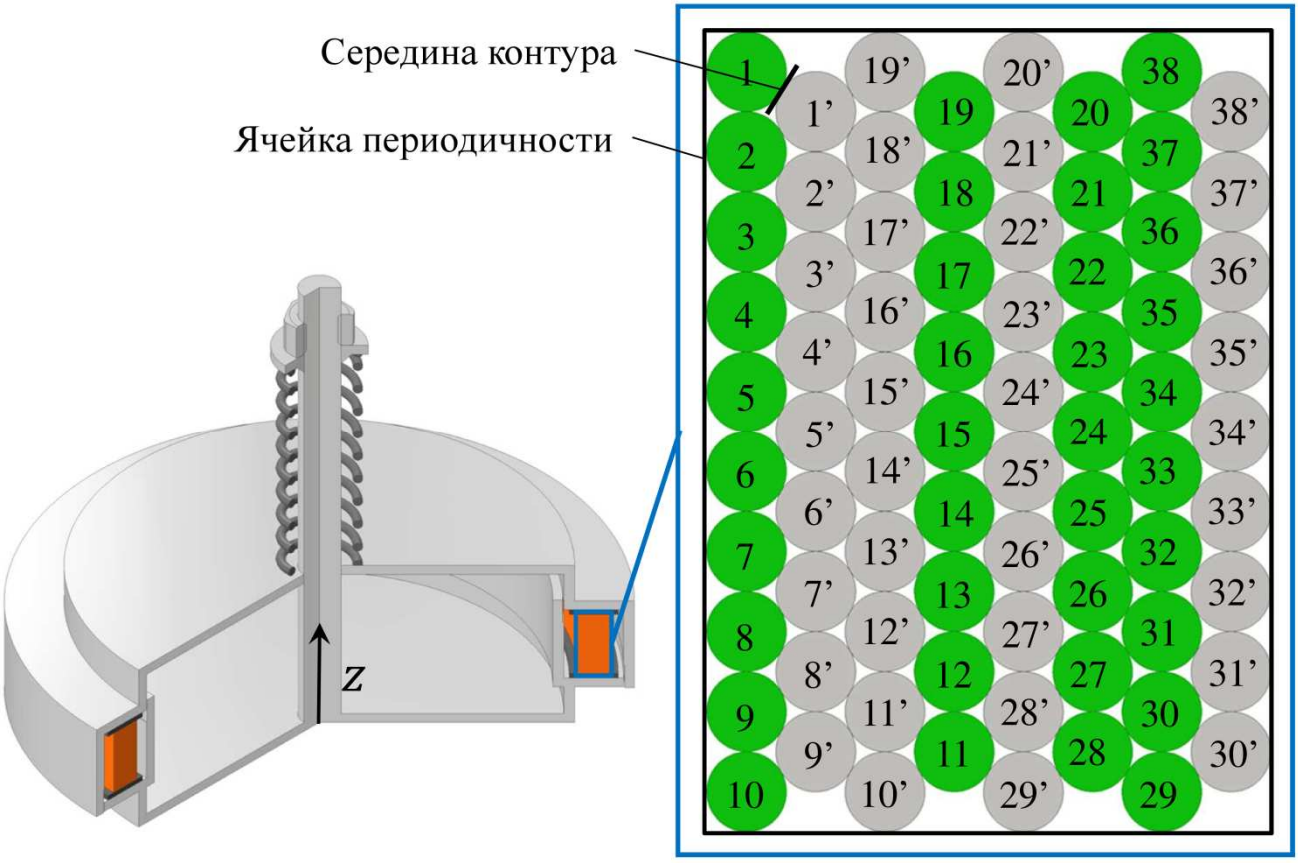

Рис. 4.5. Октупольная схема намотки волоконного контура

На рисунке 4.6 представлены составляющие кажущейся угловой скорости, вызванные термооптическим и упругооптическим эффектами, для волоконного контура с октупольной схемой намотки в нормальном и перевернутом положениях.

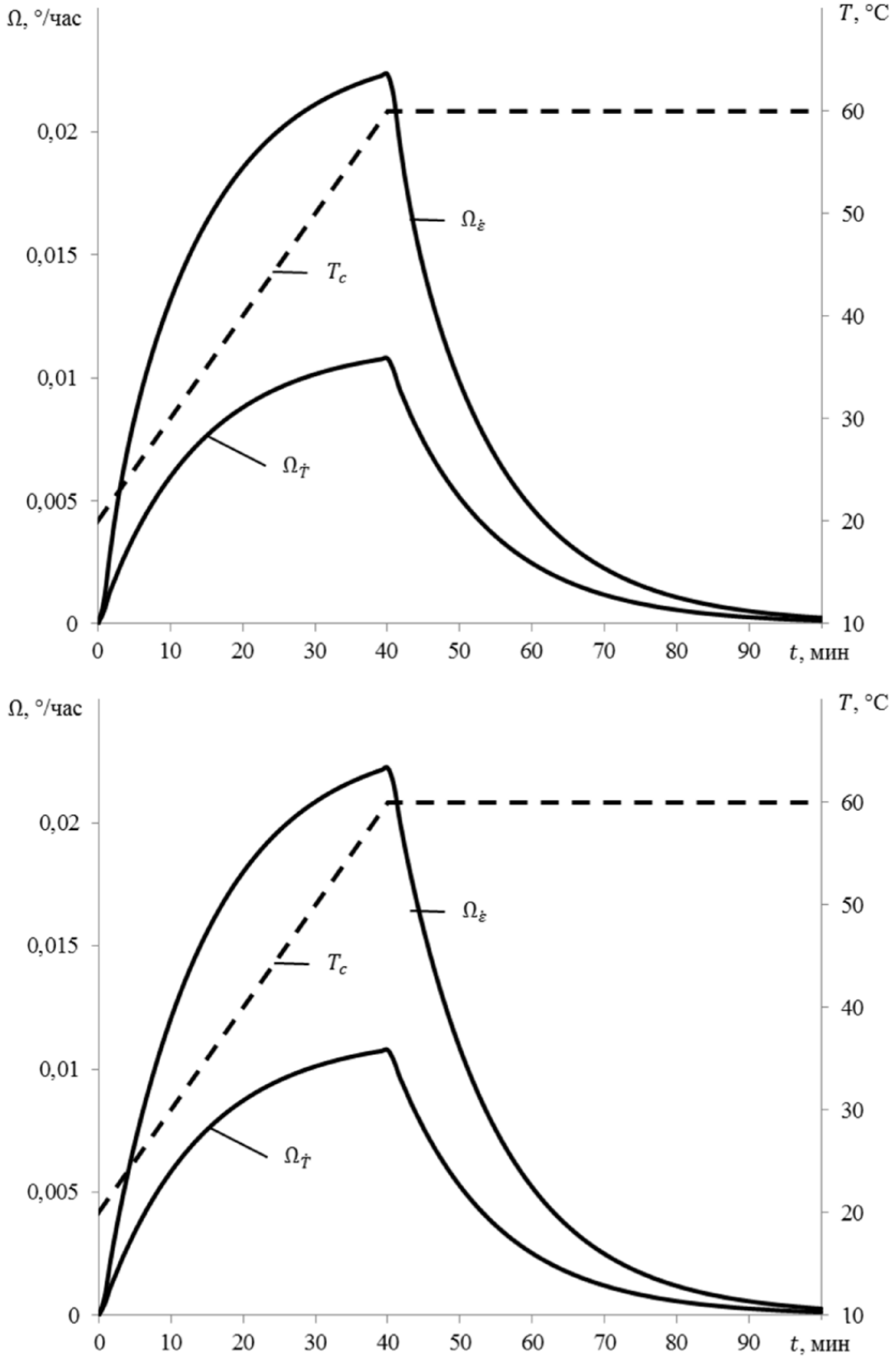

Рис. 4.6. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура с октупольной схемой намотки

Результат расчета показывает существенную разницу между октупольной и оригинальной квадрупольной схемами намоток. Амплитуда кажущейся угловой скорости $\Omega_{\dot{\varepsilon}}$, вызванная упругооптическим эффектом, снизилась в 20 раз. Кажущаяся угловая скорость $\Omega_{\dot{T}}$, вызванная термооптическим эффектом, изменила свою форму (Рис. 4.7). Обе компоненты теплового дрейфа оказываются нечувствительными к перевороту контура.

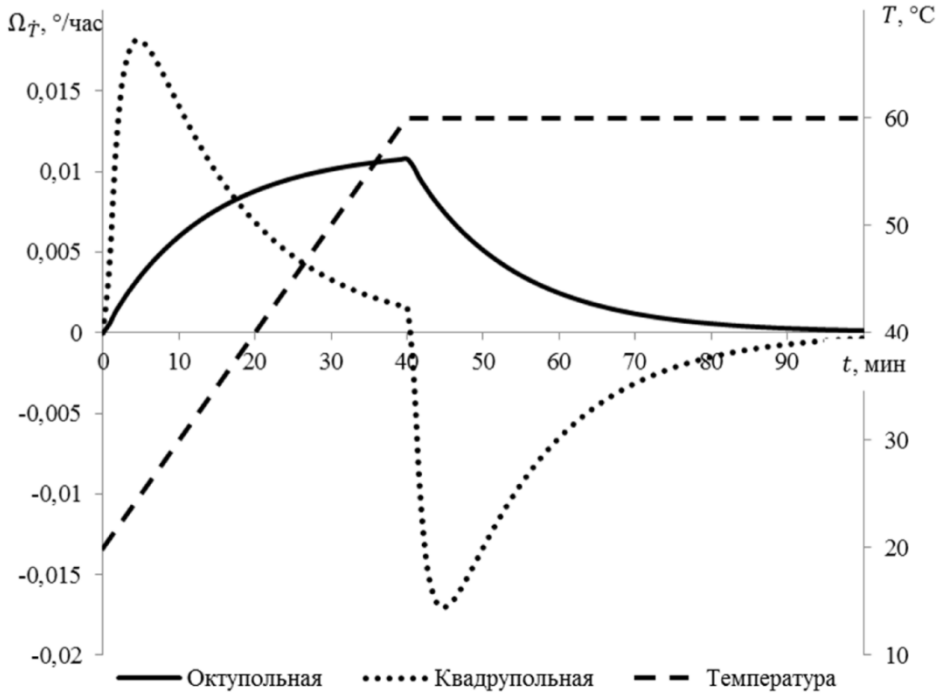

Рис. 4.7. Сравнение кажущихся угловых скоростей, вызванных термооптическим эффектом, октупольной и оригинальной квадрупольной схем намотки

На рисунке 4.8 представлены сопоставления расчетных и экспериментальных кажущихся угловых скоростей для октупольной схемы в сравнении с оригинальной квадрупольной. Результаты экспериментальных данных, как и ранее, были сглажены, и исключена скорость вращения Земли. Сравнение данных показывает преимущество октупольной схемы, тепловой дрейф у которой на порядок ниже, чем у оригинальной квадрупольной.

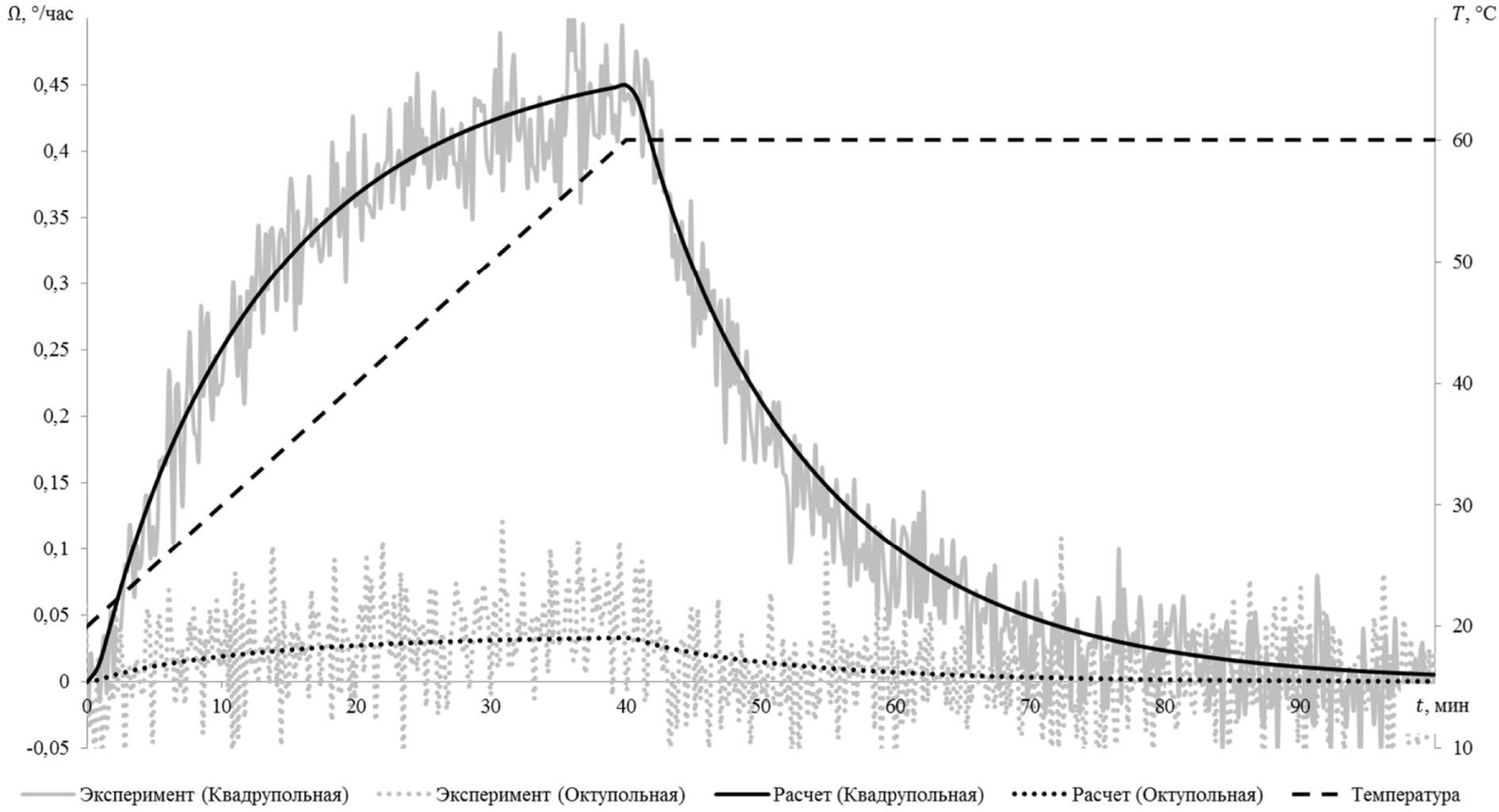

Рис. 4.8. Сравнение тепловых дрейфов квадрупольной и октупольной схем намотки

4.4 Другие рекомендации по минимизации теплового дрейфа

Рассмотренные в разделах 4.1 и 4.3 схемы намотки имеют один недостаток, связанный с чередованием количества витков от слоя к слою (80/79). Последний виток слоя (10, 29 см. рис. 4.5) находится на расстоянии от равноудаленного (10’, 29’), что не может не сказаться величине теплового дрейфа. Поэтому в качестве следующей рекомендации для минимизации теплового дрейфа будет рассмотрена октупольная схема без чередования витков в слое (Рис. 4.9).

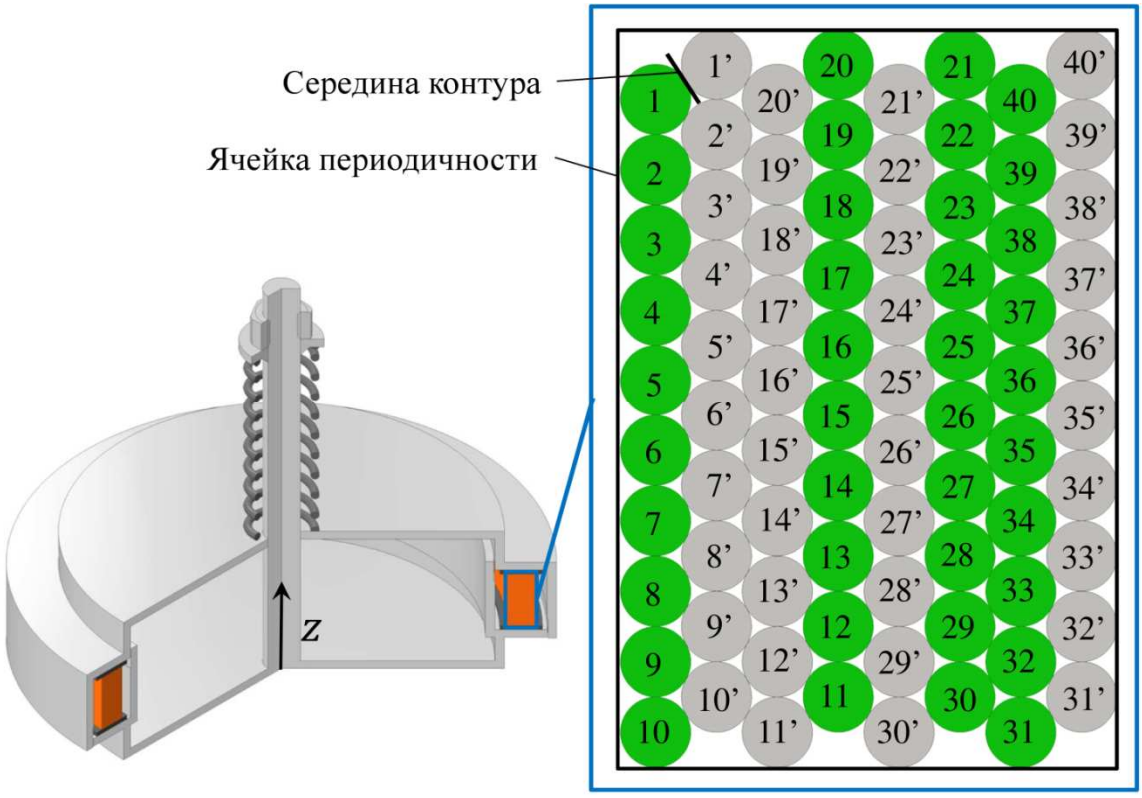

Рис. 4.9. Октупольная схема намотки волоконного контура без чередования витков в слое

На рисунке 4.10 представлены составляющие кажущейся угловой скорости, для волоконного контура с октупольной схемой намотки без чередования витков (80 в каждом слое) в нормальном и перевернутом положениях.

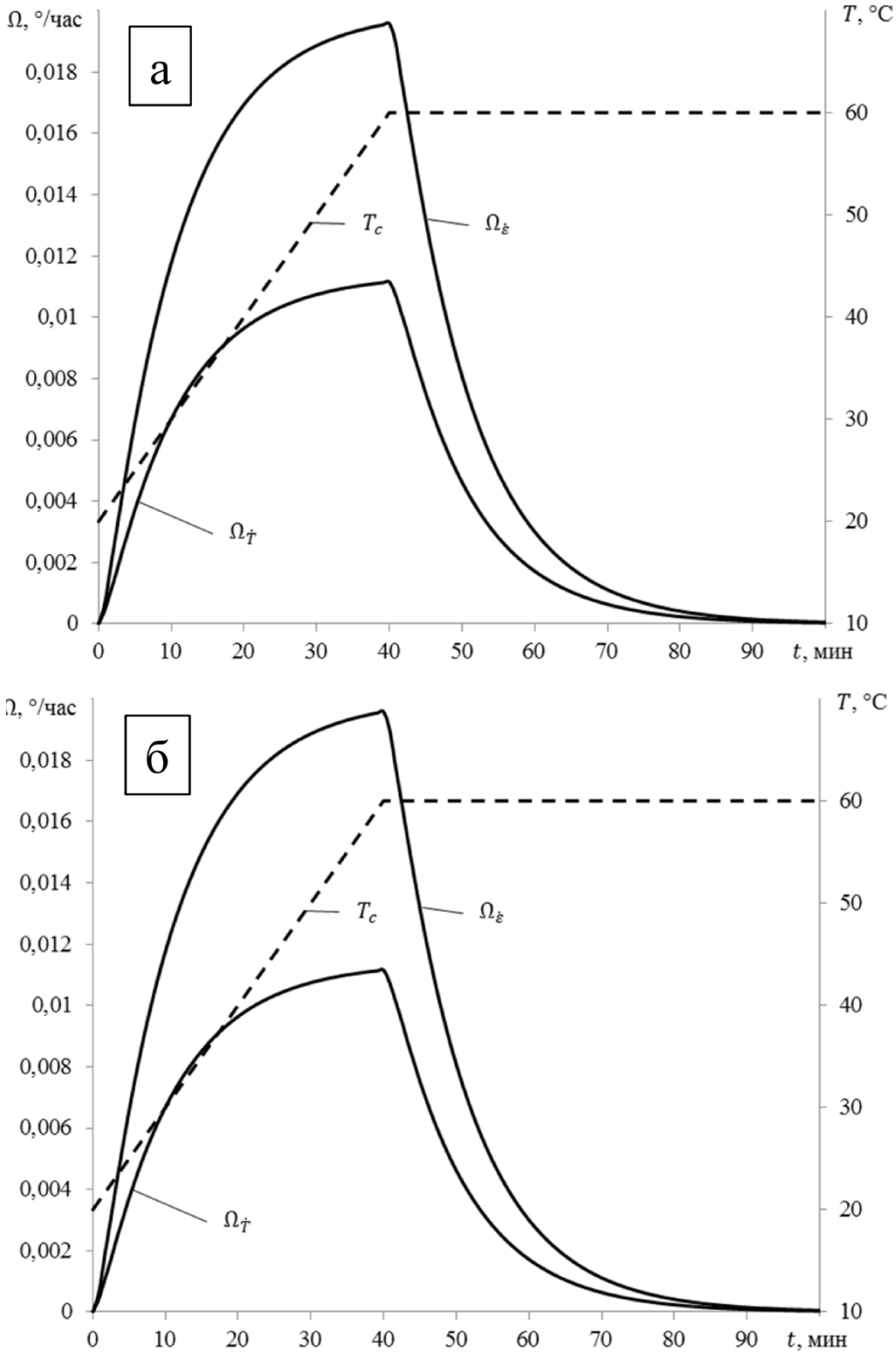

Рис. 4.10. Расчетные кажущиеся угловые скорости в нормальном (а) и перевернутом (б) положениях волоконного контура с октупольной схемой намотки без чередования витков в слое

Для сравнения на рисунке 4.11 представлены суммарные кажущиеся угловые скорости для октупольной схемы намотки без чередования витков (80/80) в сравнении со схемой с чередованием (80/79).

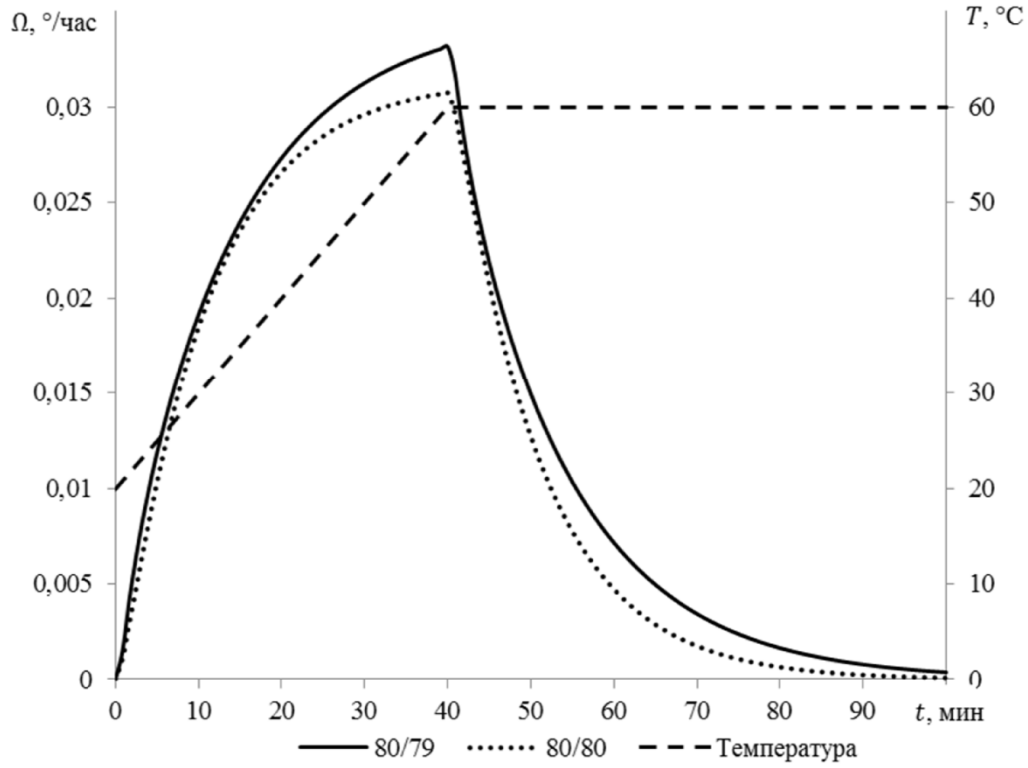

Рис. 4.11. Расчетные кажущиеся угловые скорости для октупольной схемы намотки без чередования витков (80/80) в сравнении со схемой с чередованием (80/79).

Суммарная кажущаяся угловая скорость у схемы без чередования на 8 % ниже, чем у схемы с чередованием.

4.5 Выводы по главе

1. Оригинальная квадрупольная схема намотки волоконного контура имеет ряд преимуществ над модифицированной. Симметричные относительно центра витки располагаются вплотную друг к другу, поэтому на участках разгона и торможения отсутствуют скачкообразное изменение кажущейся угловой скорости, вызванной упругооптическим эффектом. Кажущаяся угловая скорость, вызванная термооптическим эффектом, на порядок меньше, чем у модифицированной схемы, а ее вклад в суммарный тепловой дрейф ничтожен. Переворот контура приводит к незначительным изменениям теплового дрейфа

2. Изменение количества слоев и витков в слое при сохранении длины и среднего диаметра контура с оригинальной квадрупольной схемой намотки не приводит к существенному снижению теплового дрейфа.

3. Использование октупольной схемы с 8 слоями в ячейке периодичности для волоконного контура показало свое превосходство над оригинальной квадрупольной схемой. Кажущаяся угловая скорость, вызванная упругооптическим эффектом, снизилась в 20 раз. Кажущаяся угловая скорость, вызванная термооптическим эффектом, изменила форму и перестала чувствовать переворот. Амплитуда суммарной кажущейся угловой скорости снизилась на порядок.

4. Переворот контура для оригинальной квадрупольной и октупольной схем намотки приводит к незначительным изменениям кажущейся угловой скорости. Таким образом, поведение контура в эксплуатации оказывается более предсказуемым, а, следовательно, алгоритмическая компенсация теплового дрейфа в выходном сигнале волоконно-оптического гироскопа представляется более простой задачей.

5. Исследованные в 4 главе схемы намотки позволяют сделать рекомендации по минимизации и предсказуемости теплового дрейфа при условии осесимметричного распространения теплового поля в волоконном контуре:

– расположение равноудаленных от середины контура участков волокна вплотную друг к другу;

– увеличение числа слоев в ячейке периодичности;

– использование схем без чередования витков в слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Построена математическая модель для расчета теплового дрейфа при нестационарном тепловом воздействии, включающая в себя функционал кажущейся угловой скорости, вызванной термооптическим и упругооптическим эффектами, и несвязанную квазистационарную задачу термоупругости в осесимметричной постановке.

2. Спроектировано и изготовлено приспособление, которое обеспечивает осесимметричное распространение температуры и минимизирует механические нагрузки на контур от сопряжения с корпусными деталями.

3. Сформулирована и численно реализована задача квазистационарного термоупругого поведения волоконного контура в приспособлении с детальным учетом физико-механических свойств волокна, его покрытий и связующего компаунда.

4. Предложен и реализован метод верификации упругих деформаций, достоверное определение которых позволило с высокой точностью спрогнозировать кажущуюся угловую скорость.

5. Идентифицированы коэффициент Пуассона первичного слабо сжимаемого покрытия и коэффициент теплопередачи с помощью дополнительных стационарных и нестационарных испытаний.

6. Проведен качественный и количественный анализ составляющих функционала кажущейся угловой скорости.

7. Проведенные расчетные и экспериментальные исследования конструкторских решений по изменению схем намотки позволили минимизировать на порядок величину теплового дрейфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
2. Алейник А.С., Дейнека И.Г., Макаренко А.А., Мехреньгин М.В., Стригалев В.Е. Стабилизация фазовой характеристики сигнала фазового волоконно-оптического датчика в условиях изменения температуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 6 (88). – С. 26–31.
3. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
4. Андронова И.А., Малыкин Г.Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 8. – С. 849–873.
5. Антонова М.В., Матвеев В.А. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2014. – № 3. – С. 73–80.
6. Барулина М.А., Панкратов В.М., Ефремов М.В. Влияние температурных возмущений на волоконно-оптические гироскопы с фотонно-кристаллическим оптическим волокном с воздушным сердечником // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сб. матер. (30 мая – 01 июня 2016 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2016. – С. 78–82.
7. Барулина М.А., Панкратов В.М., Ефремов М.В. Напряженно-деформированное состояние катушки волоконно-оптического гироскопа в условиях нестационарных периодических тепловых воздействий // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным

навигационным системам: сб. матер. (25–27 мая 2015 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2015. – С. 274–277.

8. Беспрозванных В.Г., Кривошеев А.И., Кель О.Л. Исследование влияния температурного фактора на состояние контура волоконно-оптического гироскопа методом бриллюэновской рефлектометрии // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 2, №4. – С. 329–341.
9. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ивонин А.С., Ошивалов М.А. Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 79–84.
10. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ивонин А.С., Ошивалов М.А., Ульрих Т.А. Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 32–37.
11. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А. Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 1. – С. 32—38. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-32-38
12. Галягин К.С., Ошивалов М.А., Вахрамеев Е.И. Расчетный прогноз теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 127–140.
13. Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А. Учет пьезооптических эффектов при моделировании теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 4. – С. 55–71. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.04
14. Галягин К.С., Ошивалов М.А., Селянинов Ю.А., Савин М.А. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 12. – С. 979–984. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-979-984

15. Галягин К.С., Савин М.А. Моделирование погрешностей волоконно-оптического гироскопа // Master`s journal. – 2015. – №1. – С. 67–72.
16. Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В. Применение пассивных способов уменьшения температурных перепадов в волоконно-оптическом гироскопе на основе использования наноматериалов // Гироскопия и навигация. – 2016. – №2 (93). – С. 33–40. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.2.033-040
17. Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В. Тепловые процессы в бухте волоконно-оптического гироскопа на основе микроструктурированного оптоволокна с углеродными нанотрубками // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18, № 10. – С. 604–613.
18. Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В., Ефремов М.В. Исследование тепловых процессов в волоконно-оптическом гироскопе при разгерметизации БИНС в условиях космоса // Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова: сб. докл. (04–06 октября 2016 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2016. – С. 31–35.
19. Громов Д.С. Тепловая защита и термостабилизация волоконно-оптического гироскопа в составе бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 2 (90). – С. 137–142.
20. Громов Д.С., Шарков А.В. Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, №1. – С. 62–67.
21. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / Под общей редакцией

академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 150 с.

22. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Применение метода элементарных балансов для анализа и синтеза системы терморегулирования на модулях Пельтье для БИНС на ВОГ // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 2 (81). – С. 84–103.
23. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 100. DOI: 10.7868/S0002338814040052
24. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Исследование температурных свойств волоконно-оптического датчика инерциальной информации // Датчики и системы. – 2013. – № 6 (169). – С. 23–28.
25. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А. Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния и погрешности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопического датчика // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 43–52.
26. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В. Активное управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими датчиками // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 1. – С. 67–72.
27. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В. Математическое моделирование управления температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических датчиках // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014. – № 1. – С. 92–100.
28. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В. Иерархические тепловые модели

бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами // Гироскопия и навигация. – 2013. – №1 (80). – С. 49–63.

29. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В. Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы по сигналам распределенных термодатчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 7. – С. 42–47.
30. Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Ефремов М.В., Романов А.В. Активная система терморегулирования на модулях Пельтье для БИУС с ВОГ наземного и космического применения // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сб. матер. (26–28 мая 2014 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – С. 266–269.
31. Драницына Е.В., Егоров Д.Л., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2012. – №4 (79). – С. 10–20.
32. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф. и др. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2014. – №1 (84). – С. 14–25.
33. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Пути повышения точности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2012. – №1 (76). – С. 102–121.
34. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Температурные характеристики чувствительных катушек волоконно-оптического гироскопа // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 7. – С. 735–742.

35. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 208 с.
36. Матвеев В.А. Гироскоп – это просто. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 191 с.
37. Мешковский И.К., Мирошниченко Г.П., Рупасов А.В., Стригалев В.Е., Шарков И.А. Исследование влияния тепловых воздействий на работу волоконно-оптического датчика угловой скорости // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сб. матер. (26–28 мая 2014 г., Санкт-Петербург, Россия). – Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – С. 191–202.
38. Новацкий В. Вопросы термоупругости. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 364 с.
39. Овсеев Н.Ю., Мусалимов В.М. Метод фазового сдвига для измерения стойкости волоконно-оптических кабелей к продольной растягивающей нагрузке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 57. – С. 33–40.
40. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси пер. с япон. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
41. Удд Э. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
42. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
43. Bao Y., Chen G. Temperature-dependent strain and temperature sensitivities of fused silica single mode fiber sensors with pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis // Meas. Sci. Technol. – 2016. – Vol. 27, No. 6. – P. 065101, 11 pp. DOI: 10.1088/0957-0233/27/6/065101

44. Blin S., Kim H.K., Digonnet M., Kino G. Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber // J. Lightw. Technol. – 2007. – Vol. 25, No. 3. – P. 861–865. DOI: 10.1109/JLT.2006.889658
45. Butter C.D., Hocker G.B. Fiber optics strain gauge // Appl. Opt. – 1978. – Vol. 17, No. 18. – P. 2867–2869. DOI: 10.1364/AO.17.002867
46. Dianov E.M., Mashinsky V.M. Germania-based core optical fibers // J. Lightw. Technol. – 2005. – Vol. 23, No 11. – P. 3500–3508. DOI: 10.1109/JLT.2005.855867
47. Digonnet M., Blin S., Kim H.K., Dangui V., Kino G. Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope // Meas. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 18, No 10. – P. 3089–3097. DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S07
48. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Barulina M.A. Mathematical models of thermal stress-strain state and scale factor error of fiber optic gyro sensors // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. – Vol. 42, No. 2. – P. 124–131.
49. Fleming J.W. Dispersion in GeO2 - SiO2 glasses // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23, No. 24. – P. 4486–4493. DOI: 10.1364/AO.23.004486
50. Gao Z., Zhang Y., Gao W. Method to determine the optimal layer number for the quadrupolar fiber coil // Optical Engineering. – 2014. – Vol. 53 (8). – P. 084106, 5 pp. DOI: 10.1117/1.OE.53.8.084106
51. Gao Z., Zhang Y., Wang G., Gao W. Analysis and simulation for the thermal performance of the octupolar fiber coil // Optical Engineering. – 2014. – Vol. 53 (1). – P. 016114, 5 pp. DOI: 10.1117/1.OE.53.1.016114
52. Hocker G.B. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis // Appl. Opt. – 1979. – Vol. 18, No. 21. – P. 3679–3683. DOI: 10.1364/AO.18.003679
53. Hocker G.B. Fiber-optic sensing of pressure and temperature // Appl. Opt. – 1979. – Vol. 18, No. 9. – P. 1445–1448. DOI: 10.1364/AO.18.001445

54. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. Temperature characteristics of fiber optic gyroscope sensing coils // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – Vol. 58, No. 7. – P. 745–752. DOI: 10.1134/S1064226913060107
55. Lagakos N., Bucaro J. A., Jarzynski J. Temperature-induced optical phase shifts in fibers // Appl. Opt. – 1981. – Vol. 20, No. 13. – P. 2305–2308. DOI: 10.1364/AO.20.002305.
56. Lefevre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope: Second Edition. – Boston: Artech House, 2014. – 343 p.
57. Li M., Ma L., Yu H., Hui F., Zhang X. M., Zhang X. Y. The express test of winding symmetry quality in fog fiber coils // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (29–31 May 2017, Saint Petersburg, Russia). – IEEE, 2017. DOI: 10.23919/ICINS.2017.7995668
58. Li X., Ling W., He K., Xu Z., Du S. A thermal performance analysis and comparison of fiber coils with the D-CYL winding and QAD winding methods // Sensors. – 2016. – Vol. 16 (3). – P. 900, 12 pp. DOI: 10.3390/s16060900
59. Ling W., Li X., Xu Z., Wei Y. A dicyclic method for suppressing the thermal-induced bias drift of I-FOGs // IEEE Photonics technology letters. 2016. Vol. 28. No. 3. P. 272–275. DOI: 10.1109/LPT.2015.2494623.
60. Ling W., Li X., Xu Z., Zhang Z., Wei Y. Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress // Optics Communications. 2015. Vol. 356. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.08.002.
61. Ling W., Li X., Yang H., Liu P., Xu Z., Wei Y. Reduction of the Shupe effect in interferometric fiber optic gyroscopes: the double cylinder - wound coil // Optics Communications. – 2016. – Vol. 370. – P. 62–67. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.02.064

62. Lofts C.M., Ruffin P.B., Parker M.D., Sung C.C. Investigation of the effects of temporal thermal gradients in fiber optic gyroscope sensing coils // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34, No. 10. – P. 2856–2863. DOI: 10.1117/12.210771
63. Mendez A., Morse T. Specialty optical fibers handbook. – Academic Press, 2007. – 840 p.
64. Minakuchi S., Sanada T., Takeda N., Mitani S., Mizutani T., Sasaki Y., Shinozaki K. Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application // J. Lightw. Technol. – 2014. – Vol. 33, No. 12. – P. 2658–2662. DOI: 10.1109/JLT.2014.2375198
65. Minakuchi S., Sanada T., Takeda N., Mitani S., Mizutani T., Sasaki Y., Shinozaki K. Thermal strain along optical fiber in lightweight composite FOG: Brillouin-based distributed measurement and finite element analysis // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors (02–06 June 2014, Santander, Spain). – SPIE, 2014. – Vol. 9157. – P. 91572H, 4 pp. DOI: 10.1117/12.2059717
66. Mohr F. Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers // J. Lightw. Technol. – 1996. – Vol. 14, No 1. – P. 27–41. DOI: 10.1109/50.476134
67. Mohr F., Schadt F. Bias error in fiber optic gyroscopes due to elastooptic interactions in the sensor fiber // Second European workshop on optical fibre sensors (9 June 2004, Santander, Spain). – SPIE, 2004. – Vol. 5502. – P. 410–413. DOI: 10.1117/12.566654
68. Mohr F., Schadt F. Rigorous treatment of fiber-environmental interactions in fiber gyroscopes // 8 International conference on computational technologies in electrical and electronics engineering “SIBIRCON 2008” (21-25 July 2008, Novosibirsk, Russia). – IEEE, 2008. – P. 372–375. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2008.4602634
69. Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing // J. Civil Struct.

Health Monit. – 2016. – Vol. 6, No. 3. – P. 321–327. DOI: 10.1007/s13349-016-0172-9

70. Ogut S., Osunluk B., Ozbay E. Modeling of thermal sensitivity of a fiber optic gyroscope coil with practical quadrupole winding // Fiber Optic Sensors and Applications XIV (09–13 April 2017, Anaheim, California, USA). – SPIE, 2017. – Vol. 10208. – P. 1020806, 6 pp. DOI: 10.1117/12.2258030
71. Osunluk B., Ogut S., Ozbay E. Thermally induced bias errors for a fiber coil with practical quadrupole winding // 4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (27–30 March 2017, Kauai, Hawaii, USA). – IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ISISS.2017.7935682
72. Sagnac G. The demonstration of the luminiferous aether by an interferometer in uniform rotation// Comptes rendus. – 1913. – Vol. 157. – P. 708–710.
73. Sagnac G. On the proof for the existence of a luminiferous aether using a rotating interferometer experiment // Comptes rendus. – 1913. – Vol. 157. – P. 1410–1413.
74. Schadt. F., Mohr. F. Error signal formation in FOGs through thermal and elastooptical environment influence on the sensing coil // Inertial sensors and systems conference (20-21 September 2011, Karlsruhe, Germany). – 2011. – P. 2.1-2.13.
75. Shupe D. M. Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19, No. 5. – P. 654–655. DOI: 10.1364/AO.19.000654
76. Teng F., Xu X., Zhang Z., An M., Zhang C. Modeling and reduction of thermally induced non-reciprocal error indifferential interference fiber optic gyroscope sensing coil // Optic. – 2015. – Vol. 126, No. 13. – P. 1295–1299. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.04.004
77. Tirat O.F., Euverte J.-M. Finite element model of thermal transient effect in fiber optic gyro // Fiber optic gyros: 20th anniversary conference (04–09 August 1996, Denver, CO, United States). – SPIE, 1996. – Vol. 2837. – P. 230–238. DOI: 10.1117/12.258183

78. Trufanov A.N., Smetannikov O.Y., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // Opt. Fiber Technol. – 2010. – Vol. 16, no. 3. – P. 156-161. DOI: 10.1016/j.yofte.2010.02.001
79. Wang G., Wang Q., Zhao B., Wang Z. Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine // Appl. Opt. – 2016. – Vol. 55, Issue 5. – P. 1061-1066. DOI: 10.1364/AO.55.001061
80. Wang Y., Ma L., Zhao J., Wu W., Qiao L. Theoretical and experimental on the Shupe-like bias caused by thermal stress of fiber optic gyros // International Symposium on Optoelectronic Technology and Application (09–11 May 2016, Beijing, China). – SPIE, 2016. – Vol. 10158. – P. 101580Y, 6 pp. DOI: 10.1117/12.2246977
81. Webber M., Willig R., Raczkowski H., Dineen A. Modeling of rate error in interferometric fiber-optic gyroscopes due to stress induced by moisture diffusion // J. Lightw. Technol. – 2012. – Vol. 30, No 14. – P. 2356–2362. DOI: 10.1109/JLT.2005.855867
82. Weber M.J. Handbook of optical materials. – CRC Press, 2003. – 499 p.
83. Wemple S.H., Didomenico M.J. Theory of the elasto-optic effect in nonmetallic crystals // Physical Review B. – 1970. – Vol. 1, No. 1. – P. 193–202.
84. Xu X., Teng F., Zhang Z., Zhang C., Song N. Analysis and simulation of a fiber optical gyroscope with Shupe error compensated optically // Journal of Modern Optics. – 2014. – Vol. 61, No. 11. – P. 931–937. DOI: 10.1080/09500340.2014.914593
85. Xu Z., Li X., Hong Y., Liu P., Yang H., Ling W. Temperature dependence of beat-length and confinement loss in an air-core photonic band-gap fiber // Optics Communications. – 2016. – Vol. 366. – P. 38–44. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.12.026

86. Zeni L., Picarelli L., Avolio B., Coscetta A., Papa R., Zeni G., Di Maio C., Vassallo R., Minardo A. Brillouin optical time-domain analysis for geotechnical monitoring // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2015. – Vol. 7, No. 4. – P. 458–462. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.01.008
87. Zhang C., Du S., Jin J., Zhang Z. Thermal analysis of the effects of thermally induced nonreciprocity in fiber optic gyroscope sensing coils // Optik. – 2011. – Vol. 122, No. 1. – P. 20–23. DOI: 10.1016/j.ijleo.2009.10.004
88. Zhang Y., Guo Y., Li C., Wang Y., Wang Z. A new open-loop fiber optic gyro error compensation method based on angular velocity error modeling // Sensors. – 2015. – Vol. 15 (3). – P. 4899–4912. DOI: 10.3390/s150304899
89. Zhang Y., Gao Z., Wang G., Gao W. Modeling of thermal-induced rate error for FOG with temperature ranging from −40 °C to 60 °C // Photonics Technology Letters. – 2014. – Vol. 26, No 1. – P. 18–21.
90. Zhang Z., Du S., Yu F., Wang Q. Thermal design scheme of FOG based on thermal insulation technology // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (07–10 August 2016, Harbin, China). – IEEE, 2016. – P. 2151–2155. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558899
91. Zhang Y., Zhang Y., Gao Z. Thermal-induced phase-shift error of a fiber-optic gyroscope due to fiber tail length asymmetry // Appl. Opt. – 2017. – Vol. 56, No 2. – P. 273–277.

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ПЕРМСКАЯ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ»
Россия, 614990, г. Пермь, ул. 25 Октября, 106
Тел.: +7 (342) 240 05 02, факс: +7 (342) 280 97 19
E-mail: root@ppk.perm.ru, www.ppk.perm.ru

PUBLIC JOINT STOCK "PERM SCIENTIFIC INDUSTRIAL INSTRUMENT-MAKING COMPANY"
Russia, 614990, Perm, 25th October St., 106
Phone: +7 (342) 240 05 02, Fax: +7 (342) 280 97 19
E-mail: root@ppk.perm.ru, www.ppk.perm.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ПАО «ПНППК»
_____ А.Г. Андреев
«13» 10 2017 г.

АКТ

внедрения (использования) результатов диссертационной работы
Есипенко Ивана Александровича.

Комиссия в составе:

председатель:	исполнительный директор – первый заместитель ГД – главный конструктор	В.С. Ермаков
члены комиссии:	заместитель ГД по науке – директор НТЦ	А.В. Субботин
	начальник УБЧЭ – главный конструктор ВОГ	А.С. Парфенов

составили настоящий акт о том, что результаты исследований, изложенные в работе И.А. Есипенко «Построение и верификация модели нестационарного теплового воздействия на контур волоконно-оптического гироскопа с целью минимизации его теплового дрейфа», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в ПАО «ПНППК». Диссертационная работа И.А. Есипенко выполнена в рамках проекта ПАО «ПНППК» по созданию перспективного высокоточного волоконно-оптического гироскопа. Применение разработанной И.А. Есипенко математической модели, как инструмента для оценки конструкторских решений, направленных на минимизацию теплового дрейфа, позволяет исключить проведение дополнительных экспериментальных исследований на этапе проектирования прибора. Таким образом, снижаются сроки и затраты на разработку конечного изделия.

Председатель комиссии _____ В.С. Ермаков

Члены комиссии _____ А.В. Субботин

_____ А.С. Парфенов