

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Фоминов И. В.** Обобщенная структура адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта..... 5
- Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.** Метод поиска оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площади рассеивания отделяемых частей ..... 10

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Данилова Т. В., Архипова М. А.** Определение ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты..... 13
- Падерина Т. В., Соколов Д. А.** Варианты конструктивной реализации диаметральной схемы гироинклинометра для высокоширотных систем подземной навигации..... 21

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Смирнов Н. В., Прокофьев А. В.** Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности ..... 27
- Ерофеев И. В.** Автоколлимационная фокусировка оптико-электронных систем инфракрасного спектра ..... 31
- Соколов С. В., Каменский В. В.** Оптический пространственно-частотный аналого-цифровой преобразователь ..... 35
- Саушин А. С., Лещёв А. М., Михеев Г. М.** Расчет неослепляющего светодиодного светильника..... 39
- Васильев А. С., Краснящих А. В., Коротаяев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Широков А. С.** Математическая модель лесного пожара как источника инфракрасного излучения ..... 44

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Астафьев С. А.** Решение интегродифференциального уравнения теплопереноса в задаче моделирования процесса распространения лесного пожара ..... 50
- Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.** Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли ..... 56

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

<b>Каракулев Ю. А.</b> Статистический анализ методов контроля соосности отверстий в корпусных деталях машин .....	62
<b>Медунецкий В. М., Шмидберская А. А.</b> Формирование регулярных микрорельефов на поверхности твердых тел остросфокусированным пучком тяжелых ионов.....	65
<b>Мамалимов Р. И., Щербаков И. П., Мамедов Р. К.</b> Механолюминесценция кварца и органического стекла при ударном воздействии.....	69
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>	
<b>Горбунова Е. В., Павленко Н. А., Чертов А. Н.</b> Модель оптического сепаратора руд твердых полезных ископаемых .....	75
<b>Алешко Р. А., Гурьев А. Т.</b> Методика тематического дешифрирования спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей.....	76
SUMMARY ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ).....	78

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Fominov I. V.** Generalized Structure of Adaptive Information and Measuring Complex of Mobile Object ..... 5
- Averkiev N. F., Bulekbaev D. A.** Search Method for Optimal Program of Launcher Movement to Minimize Jettisonable Elements Scattering Area ..... 10

### GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

- Danilova T. V., Arkhipova M. A.** Calculation of Spacecraft Orientation in Geocentric Equatorial Coordinate System on the Base of Astronomical Measurements in the Absence of Orbit Parameters Data ..... 13
- Paderina T. V., Sokolov D. A.** Design Options of Diametric Schematic of Gyro-Inclinometer for High-Latitude Underground Navigation Systems ..... 21

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Smirnov N. V., Prokofiev A. V.** Optical-Electronic Converter of Linear Displacement of Submicron Accuracy ..... 27
- Erofeev I. V.** Autocollimation Focusing in Opto-Electronic IR System ..... 31
- Sokolov S. V., Kamensky V. V.** Optical Spatial-Frequency Analog-Digital Converter ..... 35
- Saushin A. S., Leshchev A. M., Mikheev G. M.** Calculation of a No-Glare Light-Emitting Diode Lamp ..... 39
- Vasiliev A. S., Krasnyashchikh A. V., Korotaev V. V., Lashmanov O. Yu., Lysenko D. Yu., Shirokov A. S.** Mathematical Model of Wildfire as a Source of Infrared Radiation ..... 44

### HEAT REGIMES OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Astafiev S. A.** Solution of the Integro-Differential Equation of Heat Transfer in the Problem of Forest Fire Spread Modeling ..... 50
- Bayova Yu. V., Lapovok E. V., Khankov S. I.** Method for Maintenance of Temperature in a Space Vehicle Moving along a Circular Orbit with Shadow Path Section ..... 56

### INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Karakulev Yu. A.** Statistical Analysis of Methods of Control over Holes Coaxiality in Machine Body ..... 62
- Medunetsky V. M., Shmidberskaya A. A.** Formation of Regular Microrelief on Solid Surface with Sharply Focused Beam of Heavy Ions ..... 65
- Mamalimov R. I., Shcherbakov I. P., Mamedov R. K.** Mechanoluminescence of Quartz and Organic Glass upon a Shock ..... 69

**BRIEF NOTES**

<b>Gorbunova E. V., Pavlenko N. A., Chertov A. N.</b> Model of Optical Separator for Solid Minerals.....	75
<b>Aleshko R. A., Guriev A. T.</b> Method for Thematic Interpretation of Satellite Images of Forest Areas on the Base of Structural Models.....	76
SUMMARY.....	78

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

И. В. ФОМИНОВ

## ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА АДАПТИВНОГО ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Рассматривается теоретический подход к построению адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта, основанный на применении теории адаптивного управления измерительной системой на разных уровнях ее иерархии. Предложенная методология направлена на повышение точности информации о параметрах ориентации и навигации подвижного объекта, функционирующего в условиях случайных возмущающих воздействий.

**Ключевые слова:** *адаптивный информационно-измерительный комплекс, подвижный объект, навигация и ориентация, априорная неопределенность.*

Развитие современных систем управления подвижными объектами различного класса непосредственно связано с ужесточением требований к качеству управления, уровню автономности, надежности и продолжительности функционирования объектов наряду с ограничениями на массогабаритные параметры и характеристики ресурсоемкости и энергопотребления.

Одним из основных компонентов системы управления подвижным объектом является информационно-измерительная система (ИИС), обеспечивающая необходимую информацию о текущих параметрах движения объекта и условиях его эксплуатации. Точность, достоверность, своевременность и полнота этой информации во многом определяют качество управления подвижным объектом и эффективность выполнения целевой задачи. Обеспечение точной и своевременной информации осложняется неполнотой знаний о характеристиках объекта управления вследствие изменяющихся условий эксплуатации, влияния возмущающих воздействий, отказов элементов ИИС и возникновения других нештатных ситуаций. Указанные внешние и внутренние дестабилизирующие факторы имеют, как правило, априорно-неопределенный характер.

Системы управления, характеризующиеся способностью варьировать собственные параметры в условиях воздействия дестабилизирующих факторов в целях обеспечения требуемого качества функционирования, называются *адаптивными*. В свою очередь, ИИС, характеризующиеся такими же признаками, относятся к *адаптивным информационно-измерительным системам*.

Началом развития адаптивных систем управления считается конец 50-х — начало 60-х гг. XX века. Основоположниками теории адаптивного управления в нашей стране являются А. А. Красовский, В. В. Солодовников, В. И. Костюк. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах Я. З. Цыпкина, в частности, его монография [1] положила начало широкому распространению алгоритмической теории адаптивных систем во всем мире. В последующие годы как в СССР, так и за рубежом развитие методов адаптивного управления основывалось

на идеях, принятых ранее. Выдающийся вклад в теорию систем адаптивного управления внесли В. А. Якубович, И. Д. Ландау, Р. В. Монополи, Б. Уидроу. Развитием научной школы самонастраивающихся систем в разные годы занимались В. А. Бесекерский, Р. М. Юсупов, Ю. М. Козлов, П. И. Чинаев. Самонастраивающиеся системы достаточно широко изучены и представлены в монографиях [2—4].

В настоящее время последователями теории адаптивных систем управления являются А. А. Жданов, А. В. Тимофеев, Д. В. Ефимов, А. Л. Фрадков и др.: см., например, работы [5—8]. Эти работы посвящены адаптивным системам автоматического управления, основные принципы построения которых — иерархичность, модульность и многофункциональность — могут быть положены в концепцию развития адаптивных ИИС подвижных объектов. Некоторые из этих принципов отражены в работе [9], в которой рассмотрен подход к построению ИИС на основе методов самоорганизации процесса измерения, позволяющий получить наилучшую оценку параметров движения летательного аппарата в изменяющихся условиях эксплуатации. Однако в указанной работе не рассматривается концепция развития адаптивных измерительных устройств (ИУ) и адаптивных методов комплексного использования разнородной информации, поступающей от различных источников, при изменении условий функционирования летательного аппарата и его измерительного комплекса. В этой связи предлагается расширить методологию построения адаптивных ИИС посредством применения методов адаптации на разных уровнях иерархии системы.

Рассмотрим обобщенную структуру адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса (АБИИК, далее — комплекс) некоторого подвижного объекта. Одной из основных функций комплекса является решение задач навигации и определения параметров ориентации объекта по информации от различных источников (например, гравитационного поля Земли, магнитного поля Земли, Солнца, звезд и т.д.). Отметим, что АБИИК может быть построен на системах как платформенного, так и бесплатформенного типа.

В ряде навигационных систем подвижных объектов состав используемых измерительных устройств определяется жесткой логикой функционирования. Как правило, условия функционирования подвижных объектов априори неизвестны либо изменяются вследствие влияния случайных дестабилизирующих факторов, поэтому жестко определить программу функционирования ИИС достаточно сложно. Основная цель АБИИК заключается в обеспечении требуемой полноты и точности определения параметров ориентации и навигации подвижного объекта при воздействии априорно-неопределенных дестабилизирующих факторов.

Для обеспечения требований по точности и своевременности передаваемой информации, а также надежности системы в целом в состав АБИИК подвижного объекта целесообразно включать избыточное количество ИУ. При этом достоверность информации о требуемых физических параметрах объекта в текущий момент времени определяется как характеристиками самих устройств, так и условиями функционирования системы. Выбор состава ИУ должен производиться на основе некоторого принятого критерия (например, минимума среднеквадратического отклонения оценки параметров ориентации и навигации). Автоматический синтез состава ИУ относится к классу задач структурной адаптации.

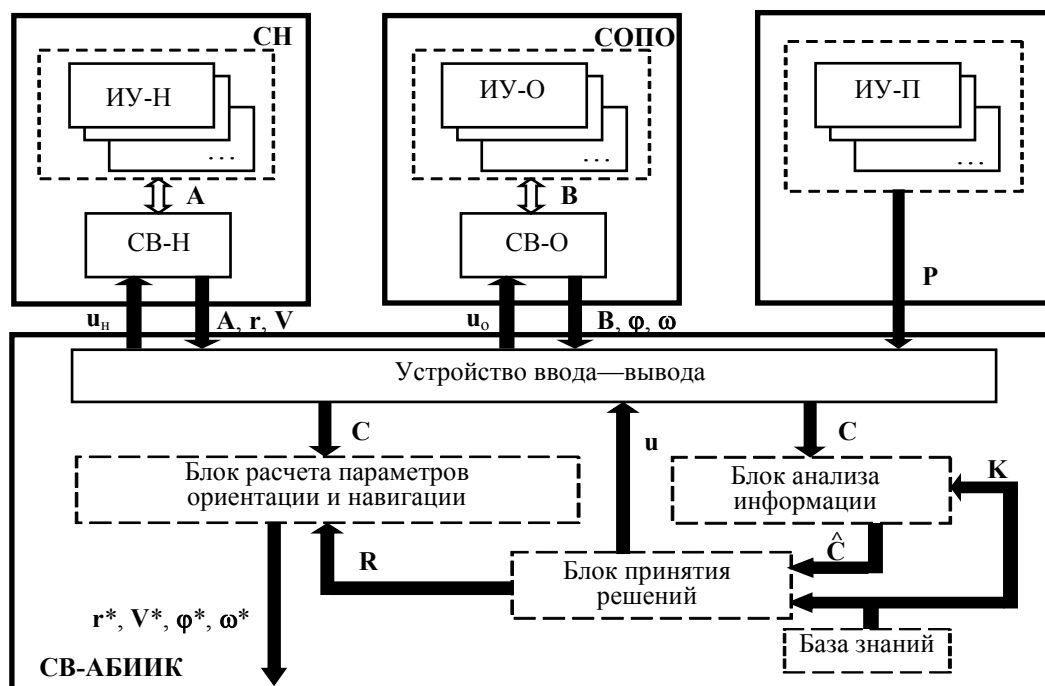
Структурная адаптация комплекса влечет за собой необходимость модификации как алгоритмов расчета параметров движения, так и алгоритмов комплексного использования информации, поступающей с выходов ИУ. Например, для системы ориентации и навигации алгоритм расчета параметров поступательного и вращательного движения объекта определяется в соответствии с наличием тех или иных ИУ: гироскопов направления, измерителей угловой скорости, акселерометров, навигационной аппаратуры потребителя СРНС ГЛОНАСС и т.д. Особенности технических характеристик ИУ, таких как частота передачи первичной информации, диапазон измерения, погрешности измерения в текущий момент времени, обуславливают необходимость адаптации алгоритма обработки и оценивания параметров ориентации и навигации объекта к изменению состава ИУ.

Вследствие изменения условий эксплуатации объекта управления (изменения динамики его движения, появления вибраций основания, вариаций температуры окружающей среды) изменяются и точностные характеристики ИУ. Причем для некоторых измерительных устройств и систем такие изменения условий эксплуатации могут привести не только к снижению точности измерения параметров движения, но и к невозможности их определения.

Обеспечить требуемые характеристики ИУ можно разными путями. Так, существуют способы парирования возмущающих факторов с использованием специальных стабилизирующих или компенсирующих устройств. Например, для обеспечения стабильности измерения параметров движения объекта посредством инерциального измерительного модуля, состоящего из гироскопов и акселерометров, используются системы термостабилизации или термокомпенсации. Такой подход, как правило, сопровождается увеличением массогабаритных характеристик измерительного модуля, что во многих случаях может стать препятствием к его применению.

Одним из перспективных способов обеспечения стабильности точностных характеристик ИУ является создание самонастраивающихся измерительных устройств. Такие ИУ должны представлять собой некоторые специальные системы автоматического управления с адаптивным контуром, т.е. системы, которые построены на базе известных поисковых или беспоисковых самонастраивающихся систем. Преимуществом самонастраивающихся измерителей является снижение дополнительных погрешностей ИУ, вызванных изменением условий их эксплуатации, что позволяет обеспечить требуемые метрологические характеристики, не применяя дополнительные стабилизирующие системы и не усложняя конструкцию устройства [10].

Обобщенная структура АБИИК подвижного объекта (см. рисунок) состоит из системы навигации (СН), системы определения параметров ориентации (СОПО), периферийных измерительных устройств (ИУ-П) и бортового компьютера. В состав СН входят навигационные измерительные устройства (ИУ-Н) и специализированный вычислитель системы навигации (СВ-Н). СОПО состоит из измерительных устройств (ИУ-О) и специализированного вычислителя системы ориентации (СВ-О).



К числу основных задач комплекса относятся следующие:

— измерение первичных параметров движения объекта управления и физических параметров среды его функционирования;

- управление режимами работы ИУ-Н и ИУ-О в соответствии с задачами объекта и условиями его функционирования;
- проведение автономной калибровки ИУ-Н и ИУ-О;
- самонастройка ИУ-Н и ИУ-О в соответствии с изменениями условий функционирования объекта;
- расчет параметров навигации и ориентации в соответствии с адаптивными алгоритмами, модифицируемыми в зависимости от целей и задач управления подвижным объектом при различных составах ИУ;
- комплексное использование информации о параметрах движения, полученной системами ориентации и навигации от измерителей различных типов;
- структурная адаптация комплекса при возникновении нештатных ситуаций.

Особенности функционирования комплекса определяются назначением его систем и элементов.

Система навигации предназначена для измерения первичных навигационных параметров  $\mathbf{A}$  и расчета параметров движения центра масс: например, координат  $\mathbf{r}$  и составляющих вектора скорости  $\mathbf{V}$  подвижного объекта в требуемой системе координат.

Система определения параметров ориентации предназначена для измерения первичных параметров  $\mathbf{B}$  углового движения объекта — вектора  $\boldsymbol{\varphi}$  углового положения и вектора  $\boldsymbol{\omega}$  угловой скорости — и расчета параметров его текущей ориентации, например углов Эйлера, относительно требуемой системы координат.

Периферийные измерительные устройства представляют собой датчики температуры, параметров ионизирующего излучения, влажности и давления, а также средства измерений других характеристик среды функционирования объекта.

В специализированном вычислителе комплекса (СВ-АБИИК) осуществляется расчет текущих параметров поступательного ( $\mathbf{r}^*$ ,  $\mathbf{V}^*$ ) и вращательного ( $\boldsymbol{\varphi}^*$ ,  $\boldsymbol{\omega}^*$ ) движения объекта управления по алгоритмам, реализуемым в блоке расчета параметров ориентации и навигации.

В блоке анализа информации осуществляется сравнение данных, поступающих от систем навигации и ориентации:  $\mathbf{C} = \{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{r}, \mathbf{V}, \boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\omega}\}$ , а также от периферийных датчиков  $\mathbf{P}$ , с априорными данными  $\mathbf{K}$ , хранящимися в базе знаний. Априорные данные  $\mathbf{K}$  включают в себя предельные значения параметров движения объекта, а также параметры, характеризующие условия его эксплуатации (например, диапазоны измерения, предельные значения вибраций, перегрузки, засветка солнечным излучением и др.), при которых определенные типы измерительных устройств функционируют недостаточно эффективно либо не способны функционировать. В результате сравнения формируются предварительные оценки  $\hat{\mathbf{C}}$ , на основе которых в блоке принятия решения определяется критерий  $\mathbf{R}$ . В соответствии с этим критерием осуществляется синтез алгоритмов определения параметров ориентации и навигации, обеспечивающий требуемую точность измерения параметров движения объекта, а также алгоритмов управления  $\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_n, \mathbf{u}_o\}$  режимами работы СН и СОПО (автономная калибровка, самонастройка и т.д.).

Изложенный в данной статье подход к построению АБИИК подвижного объекта, по мнению автора, может быть реализован с учетом современных технологий и методов адаптивного управления.

В заключение можно выделить три основных направления развития методов построения АБИИК подвижных объектов:

- разработка методов и технических средств параметрической самонастройки измерительных устройств, входящих в ИИС, и их автономной калибровки;
- разработка методов и технических средств структурной адаптации ИИС;



— разработка адаптивных методов обработки навигационной информации и методов ее комплексного использования.

Развитие этих направлений позволит расширить области применения существующих и перспективных ИИС, повысить точность передаваемой информации в требуемые моменты времени, повысить надежность ИИС в целом и уровень их интеллектуализации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400 с.
2. Козлов Ю. М., Юсупов Р. М. Беспойсковые самонастраивающиеся системы. М.: Наука, 1969. 456 с.
3. Аналитические и самонастраивающиеся системы автоматического управления / Под ред. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1965. 326 с.
4. Самонастраивающиеся системы: Справочник / Под ред. П. И. Чинаева. Киев, Наукова Думка, 1969. 528 с.
5. Жданов А. А., Земских Л. В., Беляев Б. Б. Система стабилизации углового движения космического аппарата на основе нейроподобной системы автономного адаптивного управления // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 3. С. 280—294.
6. Тимофеев А. В. и др. Методы оптимального, робастного и адаптивного управления роботами, машинами и аэрокосмическими аппаратами // Информационный бюллетень РФФИ. 1994. Т. 2, № 1. С. 193.
7. Ефимов Д. В. Анализ устойчивости адаптивных нейросетевых систем управления на основе метода разделения движений // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 1. С. 20—25.
8. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.
9. Пупков К. А., Неусыпин К. А., Кэ Фан. Интеллектуализация измерительного комплекса летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 8. С. 18—23.
10. Фоминов И. В., Малетин А. Н. Алгоритм самонастройки маятникового автоколебательного акселерометра при воздействии периодических возмущений // Там же. 2011. Т. 54, № 9. С. 28—33.

#### *Сведения об авторе*

**Иван Вячеславович Фоминов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления, Санкт-Петербург;  
E-mail: i.v.fominov@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
автономных систем управления

Поступила в редакцию  
20.12.12 г.

Н. Ф. АВЕРКИЕВ, Д. А. БУЛЕКБАЕВ

## МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДВИЖЕНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПЛОЩАДИ РАССЕИВАНИЯ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ

Рассматривается задача синтеза оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площадей эллипсов рассеивания их отделяемых частей. Изложен метод целенаправленной замены оптимизируемых функционалов для построения программы опорного управления.

*Ключевые слова:* ракета-носитель, отделяемая часть, район падения, эллипс рассеивания, функционал.

В настоящее время в связи со строительством нового космодрома „Восточный“ особенно актуальным является вопрос наличия районов падения отделяемых частей ракет-носителей (ОЧРН). Размеры отчуждаемых территорий выбираются в соответствии с необходимостью обеспечить падение отделяемых частей в определенный район с заданной вероятностью. К отделяемым частям относятся элементы конструкции РН, сброс которых предусмотрен штатной циклограммой полета (отработавшие ступени, створки головного обтекателя, хвостовой отсек, двигательная установка системы аварийного спасения и т.д.). Для уменьшения затрат при эксплуатации штатных и открытии новых районов падения необходимо минимизировать площадь выделяемых территорий для приема ОЧРН.

Координаты точек падения ОЧРН на земной поверхности при номинальной (расчетной) траектории движения непосредственно зависят от вектора фазовых координат  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  на момент отделения от РН отделяемых частей.

Возмущающие факторы при движении ракеты-носителя на активном участке траектории приводят к разбросу кинематических параметров относительно расчетных значений и, в конечном счете, к разбросу начальных параметров на момент отделения от РН отделяемых частей. Область, которой принадлежат начальные значения параметров движения ОЧ, представляет собой  $n$ -мерный эллипсоид. Характеристики данного эллипсоида однозначно определяют расположение и размеры эллипса рассеивания точек падения  $j$ -й ОЧ,  $j = \overline{1, m}$ .

Как известно из теории полета баллистических ракет [1—3], при выборе программы управления движением на активном участке траектории в качестве критерия оптимальности часто рассматривают минимальное рассеивание головной части. Для заданного диапазона дальностей стрельбы определяется своя программа минимального рассеивания. Один из возможных путей повышения точности стрельбы — увеличение крутизны траектории. Для ракеты космического назначения при условиях достаточного запаса топлива и обеспечении требуемой массы выводимой полезной нагрузки и требуемых значений параметров целевой орбиты в моменты  $t_j$  отделения от РН отделяемых частей можно изменить величины  $V = g_1(\mathbf{x}, t)$ ,  $\theta = g_2(\mathbf{x}, t)$ ,  $H = g_3(\mathbf{x}, t)$ , где  $V$ ,  $\theta$ ,  $H$  — скорость ракеты, угол наклона вектора ее скорости к местному горизонту и высота над поверхностью Земли соответственно. Такое изменение позволяет уменьшить влияние отклонений параметров движения от расчетных в момент  $t_j$  на характеристики эллипсов рассеивания точек падения ОЧ, а также сократить время их полета в атмосфере; в результате уменьшится собственное рассеивание точек падения ОЧ вследствие снижения влияния вариаций термодинамических параметров атмосферы на траекторию движения.

Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть движение ракеты-носителя описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} \in X$ ,  $X$  — множество допустимых значений вектора  $\mathbf{x}$ ;  $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$  — вектор правых частей дифференциальных уравнений;  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_r]^T$  — вектор управления,  $\mathbf{u} \in U$ ,  $U$  — множество допустимых значений вектора  $\mathbf{u}$ ;  $t \in [t_0, t_k]$  — текущее время.

Пусть известны начальные условия движения РН (координаты точки старта)

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (2)$$

и конечные координаты (точка выведения космического аппарата на орбиту)

$$\mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}_k. \quad (3)$$

Требуется найти вектор управления движением РН  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , такой что для дифференциальных связей (1) выполняются условия (2), (3), достигается минимум функционала

$$J = \sum_{j=1}^m S_j(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t_j) \quad (4)$$

и обеспечивается условие, при котором координаты фазового вектора в моменты  $t_j$  принадлежат соответствующему эллипсоиду  $\varepsilon_j$ :

$$\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_j)\| \in \varepsilon_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где  $S_j$  — площадь эллипса рассеивания точек падения  $j$ -й ОЧРН;  $\mathbf{x}^*(t_j)$  — номинальное значение фазового вектора в момент  $t_j$ ;  $\|\cdot\|$  — евклидова норма в пространстве  $R^n$ .

Методы поиска программы квазиоптимального управления движением РН с ограничениями на фазовые переменные известны, при этом предполагается, что допустимое (опорное) управление, обеспечивающее выполнение условий (2), (3) и (5), уже найдено. К таким методам относится, например, модифицированный метод локальных вариаций [4]. Исходная же постановка задачи и известные методы ее решения требуют построения программы опорного управления, удовлетворяющего условию (5). Для ее поиска произведем целенаправленную замену оптимизируемых функционалов таким образом, чтобы формулируемые при этом задачи могли быть решены известными методами. Тогда получим последовательность  $1 \dots l \dots m+1$  задач для  $\mathbf{x} \in X$ ,  $\mathbf{u} \in U$ .

*Задача 1.* Найти вектор управления  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , обеспечивающий выполнение условий (2) и (3) для уравнений связи (1) и доставляющий минимум функционала  $G_1(\mathbf{x}, t_1) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_1)\|$ .

*Задача 2.* Найти вектор управления  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , обеспечивающий выполнение условий (2), (3) и  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_1)\| \in \varepsilon_1$  для уравнений связи (1) и доставляющий минимум функционала  $G_2(\mathbf{x}, t_2) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_2)\|$ .

...

*Задача 1.* Найти вектор управления  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , обеспечивающий выполнение условий (2), (3) и  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_1)\| \in \varepsilon_1$ ,  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_2)\| \in \varepsilon_2, \dots, \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_l)\| \in \varepsilon_l$  для уравнений связи (1) и доставляющий минимум функционала  $G_l(\mathbf{x}, t_l) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_l)\|$ .

...

*Задача  $m+1$ .* Найти вектор управления  $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ ,  $t \in [t_0, t_k]$ , обеспечивающий выполнение условий (2), (3),  $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*(t_j)\| \in \varepsilon_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ , и доставляющий минимум функционала (4).

Анализ сформированной последовательности задач позволяет сделать вывод, что решение каждой предыдущей задачи обеспечивает выполнение не только граничных условий, но и ограничений на фазовые координаты в промежуточных точках траектории. Поэтому найденная программа управления движением РН может быть использована в качестве опорного (начального) приближения для решения последующей задачи. Формулировка  $(m+1)$ -й задачи представляет собой исходную постановку. Таким образом, решение данной последовательности задач известными методами приведет к решению задачи в исходной постановке, что позволит минимизировать площади эллипсов рассеивания точек падения отделяемых частей заданного типа РН и, в конечном итоге, площадь отводимых территорий для районов падения ОЧРН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анпазов Р. Ф., Лавров С. С., Мишин В. П. Баллистика управляемых ракет дальнего действия. М.: Наука, 1966. 308 с.
2. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. М.: Машиностроение, 2005. 608 с.
3. Сихарулидзе Ю. Г. Баллистика летательных аппаратов. М.: Наука, 1966. 352 с.
4. Аверкиев Н. Ф. Синтез оптимального управления движением динамической системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 8. С. 21—25.

#### Сведения об авторах

**Николай Федорович Аверкиев**

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург;  
E-mail: averkievnf@yandex.ru

**Дастанбек Абдыкалыкович Булекбаев**

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра высшей математики, Санкт-Петербург; E-mail: atiman@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
навигационно-баллистического  
обеспечения применения  
космических средств и теории  
полетов летательных аппаратов

Поступила в редакцию  
06.11.12 г.

---

---

# ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 527.62:523.2+623.466.33

Т. В. ДАНИЛОВА, М. А. АРХИПОВА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ НА ОСНОВЕ АСТРОИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ О ПАРАМЕТРАХ ОРБИТЫ

Предлагается способ определения ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат при отсутствии данных о параметрах орбиты на основе астроизмерений и последующего распознавания звезд.

*Ключевые слова:* распознавание звезд, автономная ориентация космического аппарата, оптико-электронный прибор, астроизмерения.

Задача определения ориентации корпуса космического аппарата (КА) в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат (ГЭИСК) решается при следующих предположениях:

- КА находится в состоянии орбитального полета, при этом априорные данные о параметрах орбиты отсутствуют;
- на корпусе КА жестко закреплен оптико-электронный прибор (ОЭП) под углами  $\lambda$  и  $\rho$ ;
- КА оснащен системой стабилизации, которая удерживает корпус аппарата относительно осей текущей орбитальной системы координат с некоторой постоянной или меняющейся в малом диапазоне погрешностью; эта погрешность по тангажу, рысканью и крену может достигать единиц градусов.

На каждом измерительном сеансе задача расчета направляющих векторов осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  связанной системы координат (ССК), где  $X$  — продольная ось,  $Y$  и  $Z$  — боковые, решается в три этапа [1, 2]:

- 1) распознавание звезд, наблюдаемых в поле зрения ОЭП;
- 2) расчет ортов приборной системы координат (ПСК) в ГЭИСК;
- 3) определение ориентации КА в ГЭИСК.

Рассмотрим эти этапы подробно.

**Распознавание звезд.** Распознавание звезд производится на основе базы звезд, сформированной по каталогу HIPPARCOS, который в настоящее время является наиболее точным и в силу этого наиболее пригодным для решения задач навигации и ориентации на борту. Каталог HIPPARCOS содержит 118 218 записей (в каждой 78 полей), из которых отобрано 117 955 записей по критерию  $\alpha \neq 0$  и  $\delta \neq 0$ , здесь  $\alpha$  и  $\delta$  — прямое восхождение и склонение звезды соответственно.

Каждая из выбранных записей содержит следующую информацию о звезде: номер по каталогу HIPPARCOS, значения  $\alpha$  и  $\delta$ , звездная величина, собственное движение по  $\alpha$ , собственное движение по  $\delta$ , тригонометрический параллакс. Три последних параметра предназначены для приведения сформированного каталога звезд к эпохе, отвечающей заданным дате и времени, например началу мерного интервала.

При рассмотрении модели ОЭП, чувствительность которого обозначим через  $q$ , создается динамическая (или рабочая) база звезд, куда включаются звезды, звездная величина которых, с учетом погрешности измерения, не превосходит  $q$ .

Алгоритмом предусмотрена разбивка небесной сферы на четырнадцать областей, в соответствии с чем и динамическая база разбивается на четырнадцать частей с учетом таких характеристик ОЭП, как чувствительность и поле зрения.

В общем случае распознавание звезд может производиться в одном из следующих режимов: локальном, смешанном и глобальном, первые два из которых применяются при наличии априорных данных об орбите, когда рассчитывается примерное направление оптической оси ОЭП и определяется область, в которую эта ось направлена [2]. В рассматриваемом случае, при отсутствии априорных данных об орбите, распознавание производится в глобальном режиме последовательно по всем четырнадцати областям.

Максимальное количество распознаваемых звезд ( $Q$ ) может варьироваться от 10 до 50. Очевидно, что при увеличении  $Q$  надежность результатов распознавания повышается. Однако опыт моделирования показывает, что эти результаты достаточно надежны и при  $10 \leq Q \leq 20$ . Если наблюдаемое количество звезд  $\tilde{Q} < Q$ , то полагается  $Q = \tilde{Q}$ . Распознавание не проводится, если  $\tilde{Q} < 5$ .

Начальным шагом для всех режимов распознавания является формирование матрицы  $Z^{(0)} = \left\| Z_{kl}^{(0)} \right\|$ ,  $k, l = 1, \dots, Q$ , элементы которой представляют собой угловые расстояния между звездами, наблюдаемыми в поле зрения ОЭП, которые рассчитываются после измерения приборных координат звезд:

$$Z_{kl}^{(0)} = \begin{cases} \arccos(a_k, a_l), & k = 1, \dots, Q-1; l = k+1, \dots, Q; \\ 0, & k = 1, \dots, Q; l = 1, \dots, k. \end{cases} \quad (1)$$

Направляющие косинусы звезд в ПСК  $a_k \left( \xi_k^0, \eta_k^0, \zeta_k^0 \right)$  рассчитываются известным образом по измеренным приборным координатам звезд  $(\xi_k, \eta_k)$ ,  $k = 1, \dots, Q$ , и фокусному расстоянию прибора  $f$  [1, 3].

Ключевым является алгоритм распознавания по области разбиения небесной сферы с заданным номером. Суть этого алгоритма заключается в следующем.

Для каждой звезды с измеренными параметрами  $(\xi_k, \eta_k, m_k)$ , где  $m_k$  — звездная величина,  $k = 1, \dots, Q$ , формируется список „претендентов“, в который включаются звезды, принадлежащие данной области и близкие к данной звезде по звездной величине. Степень этой „близости“ определяется точностными характеристиками ОЭП по оценке звездной величины, при этом приборная погрешность измерения звездной величины ( $\Delta q$ ) известна и задается в процентах. Отметим, что проверка алгоритма распознавания на имитационной модели [2, 4] показала его надежность при  $\Delta q \in [3, 0; 50, 0]$ .

Путем перебора звезд из этих списков, организованного по разработанному оригинальному алгоритму [2], формируются цепочки звезд размером  $Q$  (по одной звезде из каждого списка). При включении звезды в цепочку проверяются следующие условия: все звезды цепочки должны быть одновременно „наблюдаемы“ в поле зрения ОЭП, т.е. их взаимные угло-

вые расстояния не должны превышать поля зрения ОЭП; контролируется разность измеренных и фактических угловых расстояний, т.е. проверяется истинность условия

$$|Z_{kl} - Z_{kl}^{(0)}| < \Delta U, \quad (2)$$

где  $Z_{kl}$  — фактические угловые расстояния между звездами, определяемые по бортовому каталогу;  $\Delta U$  — малая величина, рассчитываемая в зависимости от погрешности измерения координат звезд:

$$\Delta U = K_U \sqrt{2} \cdot (|\Delta P| + 3\sigma P), \quad (3)$$

здесь  $\Delta P$ ,  $\sigma P$  — систематическая и случайная погрешности ОЭП соответственно;  $K_U \in [1; 2]$  — коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от используемого режима распознавания.

Если не выполняется хотя бы одно из проверяемых условий, то звезда в цепочку не включается, цепочка на этом „обрывается“, и выбирается следующая звезда из этого же списка „претендентов“.

По окончании формирования допустимой цепочки размером  $Q$  рассчитывается матрица  $Z = \|Z_{kl}\|$ ,  $k = 1, \dots, Q-1$ ,  $l = k+1, \dots, Q$ , и вычисляется значение функции

$$S(Z) = \sum_{k=1}^{Q-1} \sum_{l=k+1}^Q (Z_{kl} - Z_{kl}^{(0)})^2. \quad (4)$$

Функция  $S$  определяет меру различия между двумя рисунками звезд, один из которых наблюдается в поле зрения ОЭП, а другой составлен из звезд — элементов допустимых цепочек.

Далее определяется минимальное значение функции  $S$  по всем допустимым цепочкам, которое и обеспечивает результат распознавания — массив звезд, в наибольшей степени отвечающий наблюдаемому в поле зрения ОЭП рисунку звезд. Результат распознавания формируется путем сравнения найденного значения  $S_{\min}$  с некоторым малым допустимым значением  $\Delta S$ , которое рассчитывается исходя из погрешностей измерения и величины  $Q$ :

$$\Delta S = K_S \frac{2000}{9} \left( 1 + \frac{(Q-1)^2}{2} \right) (|\Delta P| + 3\sigma P) \left( \frac{3600 \cdot 180}{\pi} \right)^2 C_1, \quad (5)$$

где  $K_S \in [1, 5; 25]$  — коэффициент, значение которого изменяется в зависимости от используемого режима распознавания;  $C_1 = 0,8860987877''$  — усредненное значение величины  $S_{\min}$ , полученное опытным путем при  $\Delta P = 0$ ,  $\sigma P = 0,1$  и  $Q = 10$ .

Если

$$S_{\min} < \Delta S, \quad (6)$$

то результат распознавания принимается, в противном случае звезды считаются нераспознанными.

Изменение величин  $\Delta U$  и  $\Delta S$  (формулы (3) и (6)) имеет большое значение для различных целей исследования. Если необходимо добиться на мерном интервале наибольшего числа положительных распознаваний (например, при отсутствии данных об орбите, т.е. в рассматриваемом случае), тогда эти величины следует увеличить, а при моделировании решения задачи навигации и ориентации — уменьшить в целях исключения грубых измерений.

**Определение ориентации ОЭП в ГЭИСК.** В результате распознавания звезд, осуществленного согласно формулам (1)—(6), имеем  $Q$  идентифицированных звезд. Принимая во внимание равенство угловых расстояний между ортами  $a_0$  наблюдаемых звезд и осями ПСК,

с одной стороны, и между направляющими косинусами распознанных звезд и осями ГЭИСК — с другой, можно определить орты осей  $\xi, \eta, \zeta$  ОЭП путем решения трех систем  $Q$  линейных уравнений с тремя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} b_{11}c_{n1} + b_{12}c_{n2} + b_{13}c_{n3} &= a_{1n}; \\ b_{21}c_{n1} + b_{22}c_{n2} + b_{23}c_{n3} &= a_{2n}; \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ b_{Q1}c_{n1} + b_{Q2}c_{n2} + b_{Q3}c_{n3} &= a_{Qn}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\mathbf{b}_k = (b_{k1}, b_{k2}, b_{k3})$  — направляющие косинусы распознаваемых звезд в ГЭИСК;  $\mathbf{c}_n = (c_{n1}, c_{n2}, c_{n3})$  — искомый вектор направляющих косинусов осей ОЭП,  $n = 1$  соответствует оси  $\xi$ ,  $n = 2$  — оси  $\eta$  и  $n = 3$  — оси  $\zeta$ .

Каждая из систем вида (7) решается методом наименьших квадратов: ее решением является такой вектор  $\mathbf{c}_n$ , который минимизирует длину вектора невязки (разности правой и левой частей системы), т.е.

$$f(\mathbf{c}) = \sum_k (b_{k1}c_{n1} + b_{k2}c_{n2} + b_{k3}c_{n3} - a_{kn})^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

После расчета частных производных функции (8) с учетом  $\frac{\partial f}{\partial c_n} = 0$  составляется система нормальных уравнений

$$B \cdot \mathbf{c}_n = \mathbf{A}, \quad (9)$$

при этом  $B = (B_{ij})$ ,  $B_{jk} = \sum_{k=1}^Q b_{ki}b_{kj}$ ;  $\mathbf{A} = (A_j)$ ,  $A_j = \sum_{k=1}^Q b_{kj}a_{kn}$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ .

Из формулы (9), после обращения матрицы  $B$ , определяется искомый вектор

$$\mathbf{c}_n = B^{-1} \cdot \mathbf{A}. \quad (10)$$

**Определение ориентации КА в ГЭИСК.** Задача определения направляющих векторов  $x_0, y_0, z_0$  осей ССК (в ГЭИСК) решается следующим образом.

Из векторов  $\mathbf{c}_n$ , полученных согласно уравнениям (7)—(10), составляется матрица

$$M_1 = \{m_{nj}\}, \quad m_{nj} = c_{nj}, \quad n, j = 1, 2, 3,$$

которая является матрицей перехода из ГЭИСК в ПСК.

По известным значениям углов крепления ОЭП на корпусе КА формируется матрица перехода из ПСК в ССК [1, 2]:

$$M_1 = \begin{vmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda \sin \rho & -\sin \lambda \sin \rho & \cos \rho \\ \cos \lambda \cos \rho & \sin \lambda \cos \rho & \sin \rho \end{vmatrix}.$$

Матрица

$$M_3 = M_2^T M_1,$$

являющаяся матрицей перехода из ГЭИСК в ССК, дает решение задачи; искомые векторы  $x_0, y_0, z_0$  — соответственно первая, вторая и третья строки матрицы  $M_3$ .



Точность решения задачи определяется точностью расчета элементов матриц  $M_1$  и  $M_2$ .

**Результаты моделирования.** Для исследования точности предложенного алгоритма в среде программирования C++ Builder 6.0 была создана имитационная модель. Согласно принципам объектно-ориентированной технологии разработаны классы, моделирующие функционирование отдельных элементов бортового комплекса навигации и ориентации. К таковым относятся классы AS\_VOZMU (модель возмущений), AS\_SUN\_SYSTEM (модель солнечной системы), AS\_INTEGR (интегрирование уравнений движения), AS\_ORBITA (модель движения КА с учетом заданных возмущений и методов интегрирования), AS\_OEP\_PRIBOR (модель оптико-электронного прибора, реализующая функции измерения координат, звездных величин, распознавания звезд и расчета ортов приборных осей) и др. Для целей исследования разработан класс AS\_STATISTIC, который позволяет рассчитывать статистические характеристики по заданной выборке (среднее, среднеквадратическое отклонение, минимум, максимум и др.).

Эксперименты проводились для орбит, параметры которых представлены в табл. 1. Данные об орбите использовались для моделирования измерений. В модели движения КА гравитационное поле представлялось в виде точечных масс [1, 2], в зависимости от высоты орбиты учитывались гравитационное влияние Солнца и Луны, световое давление, тормозящее воздействие атмосферы. Интегрирование уравнения движения КА проводилось методом Рунге — Кутты и Адамса четвертого порядка с корректировкой [5]. При этом варьировались погрешности системы стабилизации, углы закрепления ОЭП на корпусе КА ( $\lambda, \rho$ ), систематическая и случайная погрешности ОЭП.

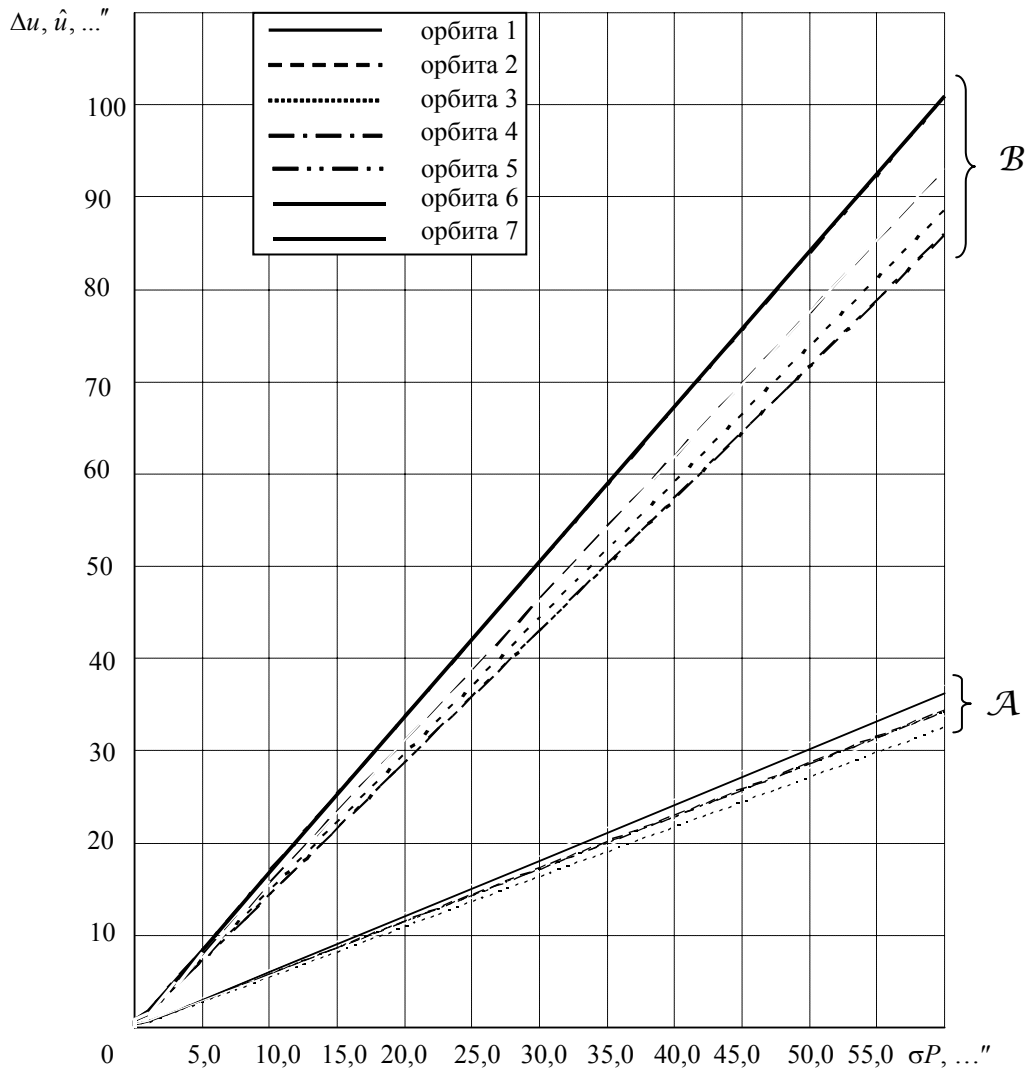
Таблица 1

Номер орбиты	Параметры орбиты					
	Большая полуось $a$ , км	Эксцентриситет $e$	Наклонение $i, \dots^\circ$	Восходящий узел $\Omega, \dots^\circ$	Точка перигея $\omega, \dots^\circ$	Истинная аномалия $\vartheta, \dots^\circ$
1	6780	0,01	85	60	0	0
2	7378	0,01	84	0	0	0
3	7378	0,01	85	0	0	0
4	25478	0,01	63	120	60	0
5	27800	0,75	0,01	120	60	0
6	29000	0,75	63	0	0	0
7	42400	0,01	0	0	30	0
Дата (день, месяц, год)			Время (часы, минуты, секунды)			
02.03.2011			01:02:03.860			

Измерения проводились с интервалом 50 с для низких орбит, 180 с — для средних, 300 с — для геостационара и орбит 4, 5, 6; количество измерений — не менее 100...200 на мерном интервале в один виток.

Анализировались углы  $u$  между фактическими и расчетными направлениями оптической оси  $\zeta$  ОЭП и осей КА, определяющие точность представленного алгоритма. Для угла  $u$  рассчитывалось среднее значение ( $\Delta u$ ), среднеквадратичное отклонение ( $\sigma_u$ ), минимальное ( $u_{\min}$ ) и максимальное ( $u_{\max}$ ) значения, а также оценка  $\hat{u} = \Delta u + 3\sigma_u$ .

На рисунке представлен график зависимости  $\Delta u$  и  $\hat{u}$  от  $\sigma P$  (группы кривых  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$  соответственно) при погрешности стабилизации в  $1^\circ$  (по тангажу, рысканью и крену),  $\lambda = 45^\circ$ ,  $\rho = 45^\circ$  и  $\Delta P = 0$  для всех исследованных орбит. Анализ графиков показывает, что характеристики  $\Delta u$  и  $\hat{u}$  слабо зависят от орбиты. Более того, аналогичная закономерность обнаруживается и при других значениях погрешностей стабилизации и углах крепления ОЭП.



Результаты моделирования для орбиты 1 представлены в табл. 2, из которой видно, что при  $\Delta P = 0$  погрешность определения ориентации корпуса КА примерно в шесть раз больше погрешности расчета ориентации оптической оси ОЭП, а при  $\Delta P \neq 0$

$$\hat{u}_{КА} = \kappa \hat{u}_{ОЭП}, \quad \kappa \in (0,6; 3).$$

Таблица 2

$\Delta P, \sigma P, \dots$	Ось	Погрешности расчета направлений оптической оси $\zeta$ ОЭП и осей X, Y, Z ССК				
		$\Delta u, \dots$	$\sigma u, \dots$	$u_{\min}, \dots$	$u_{\max}, \dots$	$\hat{u}, \dots$
0,0; 0,1	$\zeta$	0,05689	0,0336862	0,00435	0,17362	0,15795
	X	0,29266	0,2044993	0,02766	0,92855	0,90616
	Y	0,28731	0,2000521	0,01792	0,87297	0,88747
	Z	0,26675	0,2145556	0,01229	1,01040	0,91042
0,0; 0,5	$\zeta$	0,28469	0,1682043	0,02608	0,86809	0,78931
	X	1,46341	1,0224021	0,13964	4,64278	4,53062
	Y	1,43665	1,0001982	0,09175	4,36489	4,43725
	Z	1,33383	1,0727300	0,06101	5,05203	4,55202
0,0; 1,0	$\zeta$	0,56940	0,3364002	0,05216	1,73620	1,57860
	X	2,92683	2,0447993	0,27931	9,28552	9,06123
	Y	2,87331	2,0003880	0,18354	8,72975	8,87447
	Z	2,66765	2,1454652	0,12179	10,10418	9,10405

Продолжение табл. 2

$\Delta P, \sigma P, \dots''$	Ось	Погрешности расчета направлений оптической оси $\zeta$ ОЭП и осей $X, Y, Z$ ССК				
		$\Delta u, \dots''$	$\sigma u, \dots''$	$u_{\min}, \dots''$	$u_{\max}, \dots''$	$\hat{u}, \dots''$
0,0; 3,0	$\zeta$	1,70822	1,0092208	0,15645	5,20879	4,73588
	$X$	8,78049	6,1344057	0,83796	27,85609	27,18371
	$Y$	8,61992	6,0010818	0,55078	26,18897	26,62316
	$Z$	8,00296	6,4364526	0,36538	30,31391	27,31232
0,0; 5,0	$\zeta$	2,84707	1,6820610	0,26093	8,68166	7,89325
	$X$	14,63415	10,2240282	1,39659	46,42601	45,30623
	$Y$	14,36651	10,0016707	0,91806	43,64782	44,37152
	$Z$	13,33827	10,7275207	0,60890	50,52547	45,52083
0,0; 10,0	$\zeta$	5,69428	3,3642552	0,52283	17,36506	15,78704
	$X$	29,26825	20,4481537	2,79312	92,84803	90,61271
	$Y$	28,73288	20,0026822	1,83657	87,29328	88,74092
	$Z$	26,67654	21,4555405	1,21740	101,06237	91,04316
0,0; 30,0	$\zeta$	17,08458	10,0943795	1,57995	52,11603	47,36771
	$X$	87,80423	61,3457032	8,37870	278,49604	271,84134
	$Y$	86,19704	60,0002378	5,51489	261,85161	266,19776
	$Z$	80,02964	64,3726410	3,64734	303,32401	273,14757
1,0; 0,1	$\zeta$	1,39915	0,0488519	1,28191	1,55028	1,54571
	$X$	1,42002	0,1535081	0,96011	1,89920	1,88054
	$Y$	0,77920	0,2720871	0,22850	1,57643	1,59546
	$Z$	1,24492	0,1919204	0,92673	1,95810	1,82068
1,0; 0,5	$\zeta$	1,40399	0,2462114	0,81876	2,18038	2,14263
	$X$	2,03828	0,9192998	0,62515	4,92618	4,79618
	$Y$	1,62074	1,0500766	0,05171	5,03172	4,77097
	$Z$	1,86938	0,9248337	0,66181	5,81358	4,64388
3,0; 0,5	$\zeta$	4,19530	0,2446639	3,61293	4,95515	4,92929
	$X$	4,42872	0,7979229	2,06687	6,80972	6,82249
	$Y$	2,59873	1,2239888	0,48638	6,44935	6,27070
	$Z$	3,90494	0,9123128	2,60707	7,68343	6,64188
3,0; 1,0	$\zeta$	4,19792	0,4913845	3,03267	5,73731	5,67208
	$X$	5,13803	1,7429077	1,32006	10,51613	10,36675
	$Y$	3,62695	2,1654611	0,34223	10,76822	10,12333
	$Z$	4,63830	1,7808345	2,54140	12,49355	9,98080
5,0; 0,5	$\zeta$	6,99578	0,2442565	6,40958	7,75141	7,72855
	$X$	7,10011	0,7675561	4,80055	9,49613	9,40278
	$Y$	3,89601	1,3604198	1,14273	7,88222	7,97727
	$Z$	6,22458	0,9596059	4,63366	9,79064	9,10340
5,0; 1,0	$\zeta$	6,99152	0,4897925	5,82779	8,51564	8,46089
	$X$	7,56832	1,6305750	2,84083	12,30185	12,46005
	$Y$	4,62333	2,3479914	1,09709	12,18633	11,66731
	$Z$	6,70297	1,7936679	4,18338	14,37239	12,08398
5,0; 1,5	$\zeta$	6,99414	0,7365655	5,24749	9,29813	9,20384
	$X$	8,28196	2,5804596	1,96307	16,15348	16,02334
	$Y$	5,66422	3,2851567	0,81863	16,50594	15,51969
	$Z$	7,44418	2,6593206	4,21766	19,19192	15,42215
5,0; 2,0	$\zeta$	7,00361	0,9838830	4,66925	10,09466	9,95526
	$X$	9,17651	3,5674189	3,22365	20,33033	19,87877
	$Y$	6,84100	4,2652661	0,32147	20,83150	19,63680
	$Z$	8,34540	3,6114793	3,86380	24,10711	19,17984

Разработанная имитационная модель позволяет сформировать требования к характеристикам ОЭП для достижения требуемой точности определения ориентации корпуса КА в ГЭИСК. Например, при  $\Delta u \leq 5''$  погрешности ОЭП должны быть следующими:  $\Delta P \leq 1''$ ,  $\sigma P \in [0,1''; 0,5'']$ .

На основе представленного экспериментального материала можно сделать очевидный вывод, что при отсутствии априорных данных об орбите и фактической ориентации корпуса КА относительно текущей орбитальной системы координат точность расчета направлений осей ОЭП и КА в ГЭИСК определяется только погрешностями прибора и не зависит от орбиты, ориентации КА и углов закрепления ОЭП на его корпусе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автоматизированная система исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006.
2. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. Монография. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. В 2 ч.
3. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Алгоритмы распознавания „рабочих“ звезд по звездному полю // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 16—23.
4. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. 2011. Т. 49, № 6. С. 551—562.
5. Смолицкий Х. Л., Рыжиков Ю. И. Вычислительная математика: Учеб. пособие. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1976.

#### *Сведения об авторах*

- Тамара Валентиновна Данилова** — канд. техн. наук; Военный институт Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург;  
E-mail: danitoma58@yandex.ru
- Марина Александровна Архипова** — Военный институт Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; науч. сотрудник;  
E-mail: marina\_arhipova@mail.ru

Рекомендована  
Военным институтом ВКА  
им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
02.04.13 г.

Т. В. ПАДЕРИНА, Д. А. СОКОЛОВ

## ВАРИАНТЫ КОНСТРУКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДИАМЕТРАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГИРОИНКЛИНОМЕТРА ДЛЯ ВЫСОКОШИРОТНЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ

Приводятся основные схемно-конструктивные решения, полученные при разработке компоновок модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации, предназначенной для работы на шельфе арктических морей.

**Ключевые слова:** система подземной навигации, бесплатформенный гироскопический инклинометр, шельф арктических морей.

**Введение.** Строительство нефтегазовых скважин в сложнейших условиях континентального шельфа невозможно без применения современных средств подземной навигации. Так, лидерами мирового нефтесервиса — компаниями “Shlumberger”, “Halliburton”, “Baker Hughes” (все — США) — при бурении с морских платформ, помимо магнитометрических, в обязательном порядке применяются и гироскопические MWD-системы (Measurement While Drilling): соответственно GyroPulse, Evader Gyrotool, GyroTrak. В перечисленных системах, по-видимому, реализуется так называемая продольная схема бесплатформенного гироскопического модуля, включающего, кроме блока акселерометров, гироскопический датчик угловой скорости (ДУС), оси чувствительности которого расположены в плоскости поперечного сечения скважины. Данная схема имеет ограничения при работе на больших зенитных углах и, как правило, применяется только для позиционирования верхних участков стволов при плотной сетке их разбуривания с морской платформы.

Очевидно, что создание систем для разработки арктических шельфовых месторождений нефти и газа представляет собой еще более сложную научно-техническую задачу. В настоящее время самым высокоширотным уже разработанным месторождением является газоконденсатно-нефтяное месторождение Snohvit, расположенное на широте  $\varphi=71^\circ$  с.ш., для  $\varphi \geq 74^\circ$  с.ш. буровые работы только предполагаются.

Как известно, в высоких широтах значительно снижаются уровни полезных сигналов — горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и горизонтальной составляющей угловой скорости вращения Земли, на измерении которых основана работа соответственно магнитометрических и гироскопических инклинометров компасного типа. Из-за появления недопустимо больших погрешностей, обусловленных влиянием естественных флуктуаций магнитного поля Земли (магнитные бури и аномалии) и девиаций, создаваемых искусственно буровыми сооружениями (морской платформой, бурильными и обсадными колоннами и т. д.), магнитометрические инклинометры не могут быть применимы на  $74\text{—}78^\circ$  с.ш. Что же касается хорошо известной процедуры гирокомпасирования, являющейся основой работы точечных гироскопических инклинометров (ГИ), то погрешность определения азимута в этих широтах увеличивается соответственно в 1,8—2,4 раза по сравнению с аналогичной погрешностью на  $60^\circ$  с.ш.

Для обеспечения подземной навигации на арктическом шельфе необходимы нестандартные решения, и одно из таких решений базируется на применении так называемой диаметральной схемы построения ГИ [1].

Основная особенность диаметральной схемы — возможность разворота корпуса ДУС вокруг поперечной оси скважинного прибора (СП), при этом вектор кинетического момента остается перпендикулярным оси разворота и находится в диаметральной плоскости прибора.

Эта схема позволяет создать на основе одного двухосного ДУС новую гироскопическую систему подземной навигации, обладающую рядом характеристик, особо значимых при работе в высоких широтах:

— адаптивностью к траектории скважины, т.е. способностью измерения азимута в любых произвольно ориентированных скважинах;

— возможностью проведения инвариантного компасирования, при котором погрешность определения азимута не зависит от пусковых погрешностей гироскопа [1, 2].

В работе [3] было показано, что реализация режима инвариантного компасирования возможна не только при полном диапазоне разворота корпуса ДУС в диаметральной плоскости, но и при значительном уменьшении этого диапазона.

В настоящей статье представлены результаты исследования схемно-конструктивных решений диаметральной схемы, которые могут быть применены как для кабельного, так и забойного варианта исполнения гироинклинометра.

### Режим инвариантного компасирования в диаметральной схеме гироинклинометра.

В работах [1, 2] исследовалась возможность реализации в диаметральной схеме режима инвариантного компасирования. Поясним этот термин. В силу особенностей точечного компасирования, связанного, прежде всего, с необходимостью включения ДУС в каждом цикле измерения и относительно короткой продолжительностью цикла, пусковая погрешность гироскопа однозначно превалирует над нестабильностью сигнала в процессе работы и определяет точность этого режима. С помощью управления углами разворотов  $\psi$  и  $\chi$  в диаметральной схеме ГИ (рис. 1) в каждом цикле измерения азимута могут быть откалиброваны практически все составляющие ухода ДУС, и, таким образом, обеспечена их последующая компенсация. Вычисление коэффициентов ухода ДУС в этом случае является только промежуточным этапом, который может быть исключен, например, за счет установки измерительных осей датчика в определенные положения, когда составляющие его ухода, зависящие от вектора перегрузки, автоматически обнуляются. Такой режим, характеризующийся минимизацией числа установок корпуса ДУС и соответственно минимизацией общего времени цикла измерения, и называется режимом инвариантного компасирования.

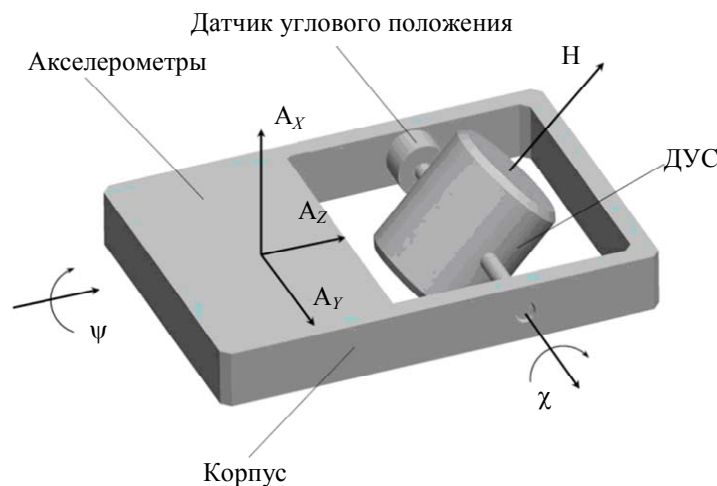


Рис. 1

В работе [1] были получены следующие выражения для проекций угловой скорости вращения Земли на измерительные оси ДУС:

$$\begin{aligned} \omega_x = & \Omega \sin \varphi (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \\ & + \Omega \cos \varphi [\cos A (\cos \theta \cos \psi \cos \chi - \sin \theta \sin \chi) + \sin A \sin \psi \cos \chi] + \tau_x - \\ & - \rho_x (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi) + \varepsilon_x \sin \theta \sin \psi; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \omega_Y = \Omega \sin \varphi \sin \theta \sin \psi - \Omega \cos \varphi (\sin A \cos \psi - \cos A \cos \theta \sin \psi) + \tau_Y - \\ - \rho_Y \sin \theta \sin \psi - \varepsilon_Y (\sin \theta \cos \psi \cos \chi + \cos \theta \sin \chi), \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $\Omega$  — угловая скорость суточного вращения Земли;  $\omega_X, \omega_Y$  — выходные сигналы измерительных каналов ДУС;  $A, \theta$  — азимут и зенитный угол скважины;  $\psi$  — угол разворота корпуса СП вокруг его продольной оси;  $\chi$  — угол разворота вектора кинетического момента гироскопа в диаметральной плоскости относительно поперечной оси СП;  $\tau_X, \tau_Y$  — составляющие ухода ДУС, не зависящие от ускорения (корпусной уход);  $\rho_X, \rho_Y$  — составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения на оси чувствительности ДУС (дебаланс);  $\varepsilon_X, \varepsilon_Y$  — составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения на оси, ортогональные к осям чувствительности (квадратурные составляющие).

Определитель  $\Delta$  системы уравнений имеет следующий вид:

$$\Delta = -\cos \theta \cos \chi + \sin \theta \sin \chi \cos \psi, \quad (3)$$

его обнуления можно избежать, если соблюдать условие  $\operatorname{tg} \chi \neq \operatorname{ctg} \theta / \cos \psi$ .

Адаптивность системы к траектории скважины, т.е. определение азимута при любом его значении с одинаковой точностью, можно обеспечить при достижении максимального значения  $\Delta$ , когда выполняется условие

$$\operatorname{tg} \chi = -\operatorname{tg} \theta \cos \psi. \quad (4)$$

Подставляя значение  $\cos \psi$  из формулы (4) в уравнение (3), имеем

$$\Delta_{\max} = -\cos \theta / \cos \chi, \quad (5)$$

после чего из выражений (5) и (4) получаем значения углов для проведения инвариантного компасирования:  $\chi = \pm \theta, \psi = 0, 180^\circ$ . При этом в первом положении ( $\chi = \theta, \psi = 0$ ) имеем

$$\omega_{X_1} = \Omega \cos \varphi \cos A + \tau_X, \quad \omega_{Y_1} = -\Omega \cos \varphi \sin A + \tau_Y, \quad (6)$$

во втором положении ( $\chi = -\theta, \psi = 180^\circ$ ) —

$$\omega_{X_2} = -\Omega \cos \varphi \cos A + \tau_X, \quad \omega_{Y_2} = \Omega \cos \varphi \sin A + \tau_Y. \quad (7)$$

При этих положениях составляющие ухода ДУС, пропорциональные проекциям ускорения, не оказывают влияния на точность режима компасирования. Влияние же корпусного ухода ДУС исключается при вычислении тригонометрических функций азимута:

$$\cos A = \frac{\omega_{X_1} - \omega_{X_2}}{2\Omega \cos \varphi}, \quad \sin A = \frac{\omega_{Y_2} - \omega_{Y_1}}{2\Omega \cos \varphi}.$$

При уменьшении диапазона разворота по углу  $\chi$ , например, до  $\chi_0$  также возможно обеспечение режима инвариантного компасирования [3]. Используя два положения:  $\chi = \chi_0, \psi = \arccos(-\operatorname{tg} \chi_0 \operatorname{ctg} \theta)$  и  $\chi = -\chi_0, \psi = \pi + \arccos(\operatorname{tg} \chi_0 \operatorname{ctg} \theta)$ , по аналогии с выражениями (6), (7) имеем:

$$\cos A = \frac{\omega_{X_1} - \omega_{X_2}}{2\Omega \cos \varphi} \frac{\sin \theta}{\sin \chi_0}, \quad \sin A = \frac{\omega_{Y_2} - \omega_{Y_1}}{2\Omega \cos \varphi} \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \chi_0}.$$

**Схемно-конструктивные решения диаметральной схемы гироинклинометра.** В работе [4] были приведены результаты прочностного и температурного расчетов конструкции скважинного модуля ориентации (СМО) ГИ, реализующего диаметральную схему, а также результаты расчета собственных частот механических колебаний данной конструкции. В продолжение этой работы в настоящей статье рассматриваются схемно-конструктивные решения, полученные при разработке вариантов компоновок СМО для высокоширотных систем подземной навигации.

Прежде всего, рассмотрим конструктивное исполнение скважинного модуля ориентации для схемы, в которой управление разворотом по углам  $\chi$  и  $\psi$  осуществляется без ограничений. Данный вариант модуля может быть использован в промерочном гириноклинометре, предназначенном для съемки уже пробуренных участков скважины.

Для того чтобы совместить возможность реализации разворота блока чувствительных элементов (БЧЭ) СМО вокруг продольной оси и полные диапазоны разворотов по углам  $\chi$  и  $\psi$  с требованиями по наружному диаметру скважинного прибора (42 мм), предлагается применить следующее решение: БЧЭ выполняется в отдельном корпусе, соединенном с основной частью СП при помощи вращающегося полого вала, по которому проложены линии для подачи питания и осуществления обмена информацией между частями прибора (рис. 2). При такой реализации возникает проблема уплотнения вращающегося вала, так как СП во время эксплуатации может находиться в жидкости под давлением до 80 МПа. Решением этой проблемы является использование специальных узлов уплотнения (производства компании “Trelleborg”, Германия), которые удовлетворяют требованиям по давлению и условиям эксплуатации в агрессивной среде.

Кинематическая схема скважинного модуля ориентации с отдельным корпусом БЧЭ представлены на рис. 2, где 1 — плата электроники СМО; 2 — привод разворота БЧЭ вокруг продольной оси; 3 — датчик угла разворота БЧЭ; 4 — арретир БЧЭ; 5 — узел уплотнения вращающегося вала; 6 — плата электроники БЧЭ; 7 — привод разворота корпуса ДУС на угол  $\chi$ ; 8 — ДУС.

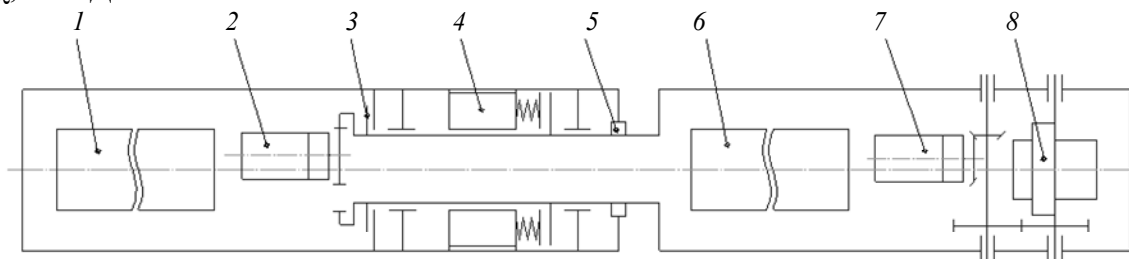


Рис. 2

Рассмотрим далее вариант конструктивного исполнения диаметральной схемы гириноклинометра, позволяющий существенно упростить конструкцию СМО благодаря размещению БЧЭ внутри прочного корпуса скважинного прибора. Такое конструктивное решение схематично показано на рис. 3, где 1 — плата электроники СМО; 2 — привод разворота БЧЭ вокруг продольной оси; 3 — арретир БЧЭ; 4 — плата электроники БЧЭ; 5 — привод разворота корпуса ДУС на угол  $\chi$ ; 6 — ДУС; 7 — датчик угла разворота БЧЭ.

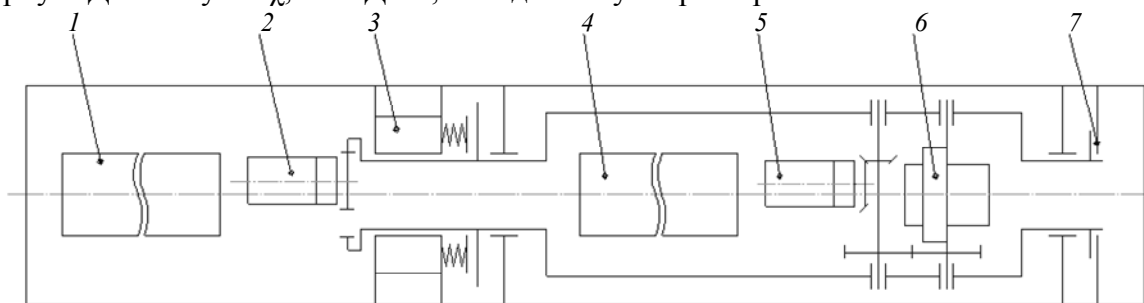


Рис. 3

Данная компоновка не позволяет осуществлять разворот корпуса ДУС в полном диапазоне по углу  $\chi$ . С учетом габаритных размеров применяемого ДУС для обеспечения требуемого диаметра корпуса прибора (не более 42 мм) необходимо сократить диапазон разворота по углу  $\chi$  до  $\pm 45^\circ$ .

Данное конструктивное исполнение СМО может применяться как для кабельного, так и забойного варианта гириноклинометра.



В ряде случаев при разработке забойного ГИ, исключив устройство разворота БЧЭ, можно максимально упростить компоновку. Такая модификация становится возможной благодаря тому, что в определенных пределах управление продольным разворотом осуществляется с помощью вращения буровой колонны. Кроме того, данная конструкция позволяет применить более прочный несущий корпус СП, наружный диаметр которого соответствует принятому на практике стандартному диаметру для забойных геофизических приборов (44,5 или 48 мм).

Для представленных конструктивных решений (см. рис. 2 и 3) необходимо привести данные о применяемых чувствительных элементах.

Центральным функциональным элементом СМО ГИ является малогабаритный двухосный ДУС. Характеристики применяемого гироскопа непосредственно влияют как на точность измерения траекторий скважин, так и на один из главных эксплуатационных параметров ГИ — наружный диаметр скважинного прибора.

Выбор базового гироскопического элемента для построения ГИ обусловлен выполнением следующих требований:

- габаритные размеры гироскопа должны обеспечивать требуемый диаметр СП;
- случайная составляющая дрейфа гироскопа — не более  $0,2 \dots 0,3$  °/ч;
- гироскоп должен иметь высокую ударную прочность;
- ресурс гироскопа — не менее 5000 ч;
- гироскоп должен быть доступен для приобретения и иметь приемлемую стоимость.

С учетом перечисленных требований для построения универсального гироскопа предлагается применить динамически настраиваемый гироскоп с внутренним упругим подвесом ротора, в частности, из серии ГВК, производимый ОАО „Раменское приборостроительное конструкторское бюро“ (Московская обл.).

Для измерения проекций кажущегося ускорения в гироскопе целесообразно использовать одноосные микромеханические акселерометры ADXL 103 фирмы “Analog Devices” (США). В качестве датчика углового положения гироскопа предусмотрена установка на его корпус двухосного микромеханического акселерометра ADXL 203 фирмы “Analog Devices”. Такое решение позволяет получать информацию об угле  $\chi$  непосредственно на оси вращения гироскопа в диаметральной плоскости.

В соответствии с предложенными кинематическими схемами СМО (см. рис. 2 и 3) были обоснованы конструктивные решения наиболее сложных узлов компоновки модуля с использованием современных систем автоматизированного проектирования.

Рассмотрим вариант компоновки, реализующий диаметральную схему с ограничением диапазона разворота по углу  $\chi$  (см. рис. 3). На рис. 4 показана модель сборки блока чувствительных элементов и узлов его разворотов.

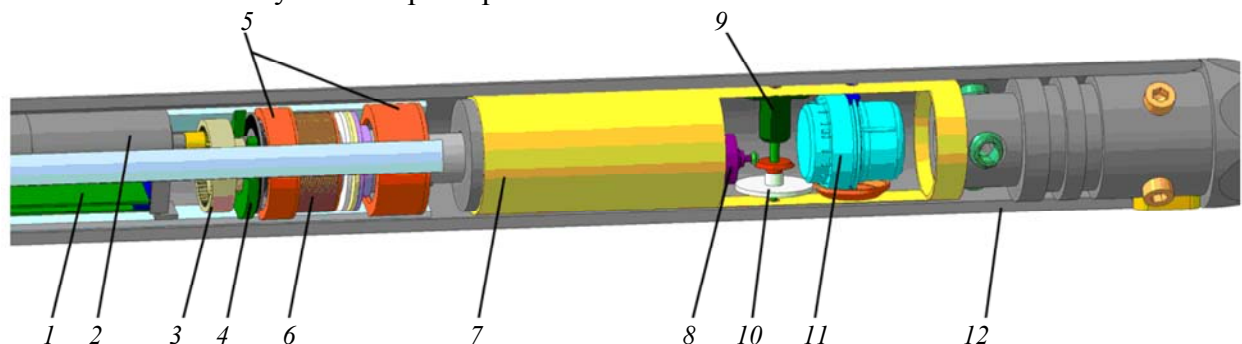


Рис. 4

Приведение в движение установленного на подшипниках качения 5 вращающегося вала с БЧЭ 7 осуществляется с помощью электромотора с редуктором 2 (производства компании “Faulhaber”, Германия) и зубчатого колеса 3 внутреннего зацепления, установленного

непосредственно на вращающемся валу. Фиксация блока производится с помощью арретирующего устройства 6 на основе электромагнита. Угол продольного разворота БЧЭ считывается с кодового диска с помощью блока фототранзисторов датчика углового положения 4. Для обеспечения вращения гироскопа 11, находящегося в БЧЭ, применяется малогабаритный электромотор с редуктором 8. Для передачи вращающего момента на корпус гироскопа используются коническая и цилиндрическая пары зубчатых колес 10. Непосредственно на корпусе ДУС установлено колесо специальной формы для того, чтобы вписать гироскоп в цилиндрический корпус 12. В качестве датчика углового положения ДУС используется абсолютный оптический энкодер 9. Управление работой элементов БЧЭ и приводами разворотов на углы  $\psi$  и  $\chi$  осуществляется контроллером, установленным на плате блока управления 1.

**Заключение.** Изложен современный подход к разработке конструкций модуля ориентации гироинклинометра для высокоширотных систем подземной навигации. Модуль реализует диаметральною схему построения ГИ, обеспечивающую требуемую точность ориентации скважин на арктическом шельфе.

Анализ приведенных конструктивных решений подтверждает вывод о том, что наиболее простым и надежным является вариант диаметральной схемы с ограничением диапазона разворота по углу  $\chi$ .

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-08-00476-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биндер Я. И. Универсальный гироинклинометр с ориентацией главной оси двухосного датчика угловой скорости в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. 2005. № 4.
2. Биндер Я. И., Соколов Д. А. Управление разворотом корпуса скважинного прибора в инклинометрах с ориентацией главной оси гироскопа в диаметральной плоскости скважины // Там же. 2008. № 2.
3. Биндер Я. И., Падерина Т. В., Соколов Д. А. Подземная навигация на высокоширотном шельфе. Актуальные проблемы и новые технические решения // Тр. VII Российской науч.-техн. конф. „Навигация, гидрография и океанография: приоритеты развития и инновации морской деятельности“ („НГО-2011“). СПб: ГНИНГИ, 2011.
4. Гордеев Ю. М., Падерина Т. В., Соколов Д. А. Прецизионная гироскопическая система подземной навигации для работы в высоких широтах. Основные схемно-конструктивные решения // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 5(75).

#### Сведения об авторах

- Татьяна Владимировна Падерина** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: paderinata@rambler.ru
- Дмитрий Александрович Соколов** — ЗАО „СКБ приборов подземной навигации“, Санкт-Петербург; инженер-конструктор; E-mail: d.a.sokolov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
14.12.12 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.78

Н. В. СМЕРНОВ, А. В. ПРОКОФЬЕВ

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СУБМИКРОННОЙ ТОЧНОСТИ

Рассматривается инкрементный оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности, предназначенный для комплектации многокоординатного механообрабатывающего оборудования. Приведены результаты измерения погрешности преобразователя.

*Ключевые слова:* линейные перемещения, оптико-электронный преобразователь перемещений, дифракционная решетка.

**Введение.** Повышение точности механической обработки деталей на промышленном оборудовании — одна из актуальных проблем современного машиностроения. При этом точность обработки зависит от точности позиционирования исполнительного элемента относительно обрабатываемой детали: фактически задача сводится к необходимости контроля их взаимного положения.

Обеспечить необходимую точность при высоких скоростях перемещения обрабатываемых деталей и исполнительных механизмов станков, сохранив при этом уровень надежности и работоспособности, в большинстве случаев возможно только при использовании преобразователей линейных перемещений. Применение в составе данного оборудования лазерных интерферометрических измерительных систем, в силу их высокой стоимости, трудоемкости настройки, а также малой температурной и динамической устойчивости, нецелесообразно. Таким образом, разработка линейных преобразователей для контроля позиционирования исполнительных механизмов промышленных станков является крайне важной задачей, что обуславливает актуальность прикладных исследований для создания линейных преобразователей субмикронной точности.

В настоящее время единственная модель, удовлетворяющая потребности отечественного высокоточного машиностроения (до 200 мм), — преобразователь МТ 101 К производства компании “Heidenhain” (Германия). Среди отечественных преобразователей подобных приборов не существует [1].

Настоящая статья посвящена решению задачи контроля позиционирования исполнительных механизмов промышленного оборудования с применением инкрементного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений субмикронной точности.

**Конструкция преобразователя.** В рамках поставленной задачи был разработан инкрементный оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности „Л-200“. В основу работы преобразователя положен эффект модуляции светового

потока по интенсивности оптического излучения, реализуемый двумя голографическими дифракционными решетками, одна из которых перемещается относительно другой [2—4].

Уникальность предложенной конструкции состоит в удвоении периода выходных сигналов преобразователя за счет совмещения двух дифракционных решеток с разным разрешением и специального фотоприемного модуля, способного обеспечить необходимый уровень выходного сигнала.

Принцип действия разработанного преобразователя, упрощенная оптическая схема которого представлена на рис. 1, заключается в следующем: поток оптического излучения, формируемый лазерным диодом 1, коллимируется объективом 2, отражается от зеркала 3 и далее падает по нормали на протяженную подвижную голографическую дифракционную решетку  $G_1$ , на которой дифрагирует на два симметричных относительно нормали пучка  $\pm 1$ -го порядка. Далее пучки лучей первых порядков проходят через вторую, неподвижную, дифракционную решетку  $G_2$ , установленную с зазором 0,05 мм относительно первой, при этом штрихи одной решетки ориентированы параллельно штрихам другой. Контроль установки дифракционных решеток осуществляется по интерференционным полосам, формирующимся в плоскости фоточувствительных поверхностей многоэлементного фотоприемника 4.

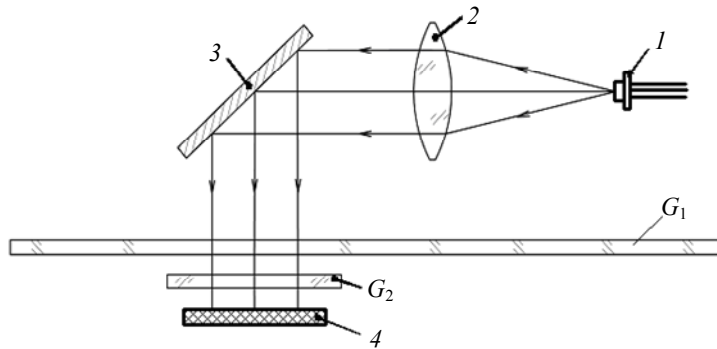


Рис. 1

Первая по ходу лучей решетка  $G_1$  за счет метода изготовления оптимизирована на максимум дифракции  $\pm 1$ -го порядка при перпендикулярном освещении. Вторая по ходу освещения решетка  $G_2$  работает по принципу интерферометрической системы, т.е. расщепляет на нулевой и обратный первый порядки падающие на нее наклонные пучки лучей, расположенные симметрично относительно нормали к поверхности решетки.

При перемещении решетки  $G_1$  в направлении оси  $X$  разность фаз пучков лучей  $\pm 1$ -го порядка изменяется пропорционально смещению решетки, так что смещение на один шаг соответствует изменению разности фаз на  $4\pi$ . В результате интерференции пучков лучей совмещенных порядков интенсивность пучка на выходе дифракционных решеток модулируется при перемещении решетки  $G_1$  по гармоническому закону. При этом один период изменения интенсивности пучка лучей соответствует смещению решетки на  $1/2$  шага.

Голографические дифракционные решетки изготовлены с использованием метода синтеза апертуры линейного интерференционного поля [5] на специальной установке ОАО „СКБ ИС“ (Санкт-Петербург). Период решетки  $G_1$  составляет 2 мкм, решетки  $G_2$  — 1 мкм. Период следования синусоидального сигнала по напряжению на выходе преобразователя равен 1 мкм. Для повышения чувствительности и точности работы преобразователя применялся внешний электронный интерполятор с коэффициентом интерполяции, равным 5; период прямоугольных сигналов на выходе интерполятора составляет 0,05 мкм.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Для контроля точностных характеристик преобразователя линейных перемещений была создана экспериментальная установка, построенная на базе лазерного интерферометра XL-80 фирмы “Renishaw” (Великобритания). Погрешность интерферометра составляет  $\pm 0,01$  мкм, что позволяет его использовать в качестве эталонного средства измерений.

Схема установки приведена на рис. 2, где 1 — неподвижное основание; 2 — приемно-передающий блок лазерного интерферометра XL-80; 3 — блок компенсации атмосферных воздействий; 4 — разделитель лазерного излучения; 5 — отражатель; 6 — подвижная часть; 7 — упор; 8 — шток контролируемого преобразователя; 9 — кронштейн, 10 — контролируемый преобразователь („Л-200“).

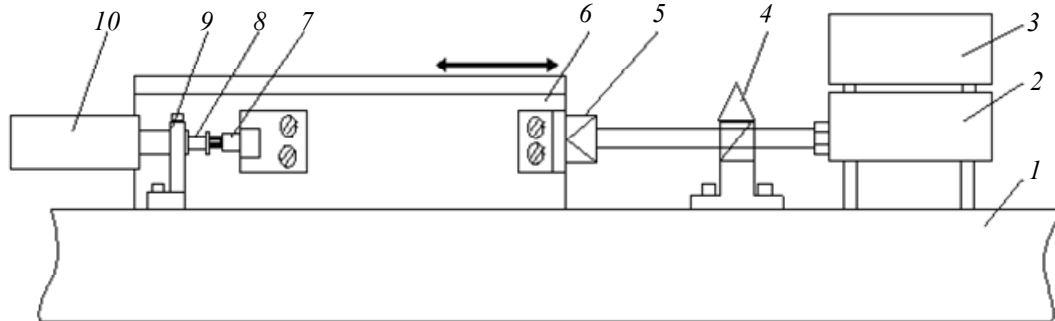


Рис. 2

Для дальнейшей обработки полученных данных использовались электронная плата сопряжения сигнала преобразователя с интерфейсом РС-10/20 и РСМ-20, ноутбук с программным обеспечением лазерного интерферометра XL-80, цифровое устройство ЛИР-510 отображения сигнала контролируемого преобразователя.

Процесс контроля заключается в сравнении результатов измерений величины перемещения штока контролируемым преобразователем и эталонным интерферометрическим датчиком. Шток преобразователя перемещается на заданное расстояние посредством приведения в движение подвижной части установки в прямом и обратном ходе с помощью сервопривода. Между изменениями направления хода подвижной части вводится 5-секундная пауза. Скорость перемещения привода составляет 200 мм/мин. При перемещении штока преобразователя на его выходе формируется сигнал, пропорциональный величине перемещения. Вместе с подвижной частью установки перемещается и закрепленный на ней отражатель лазерного пучка лучей, что приводит к появлению на выходе лазерного интерферометра сигнала, пропорционального величине перемещения отражателя. Сигнал, формируемый на выходе преобразователя, поступает на плату выработки триггерного сигнала, по которому производится фиксация показания лазерного интерферометра.

Для определения точностных характеристик преобразователя было проведено 10 серий измерений в динамическом режиме. Измерения величины перемещения  $L$  производились с интервалом 1 мм.

**Результаты измерений.** Обработка полученных результатов, для прямого и обратного хода, осуществлялась по стандартной методике с расчетом усредненного по 10 сериям измерений значения  $L$  и среднеквадратической погрешности преобразователя ( $\delta L$ ). Плотность распределения величин  $L$  и  $\delta L$ , определенная по критерию Пирсона, подчиняется (по результатам проверки) закону Гаусса и закону равной вероятности [1]. Результаты расчета для нескольких заданных величин перемещения приведены в таблице.

$L$ , мм	$\bar{L}$ , мм	$\delta L \cdot 10^{-8}$ , мм
1,0	0,9998	1,9
2,0	1,9998	2,2
3,0	3,0001	2,0
4,0	4,9999	2,2
5,0	5,0001	2,2

Результаты измерений погрешности  $\Delta L = L - \bar{L}$  исследуемого преобразователя линейных перемещений приведены на рис. 3, а, б соответственно для прямого и обратного хода (на графиках показаны лишь некоторые результаты).

Как видно из графиков, максимальное значение погрешности преобразователя составляет для прямого хода 0,17 мкм, для обратного хода 0,16 мкм; минимальное значение погрешности:  $-0,17$  и  $-0,16$  мкм для прямого и обратного хода соответственно.

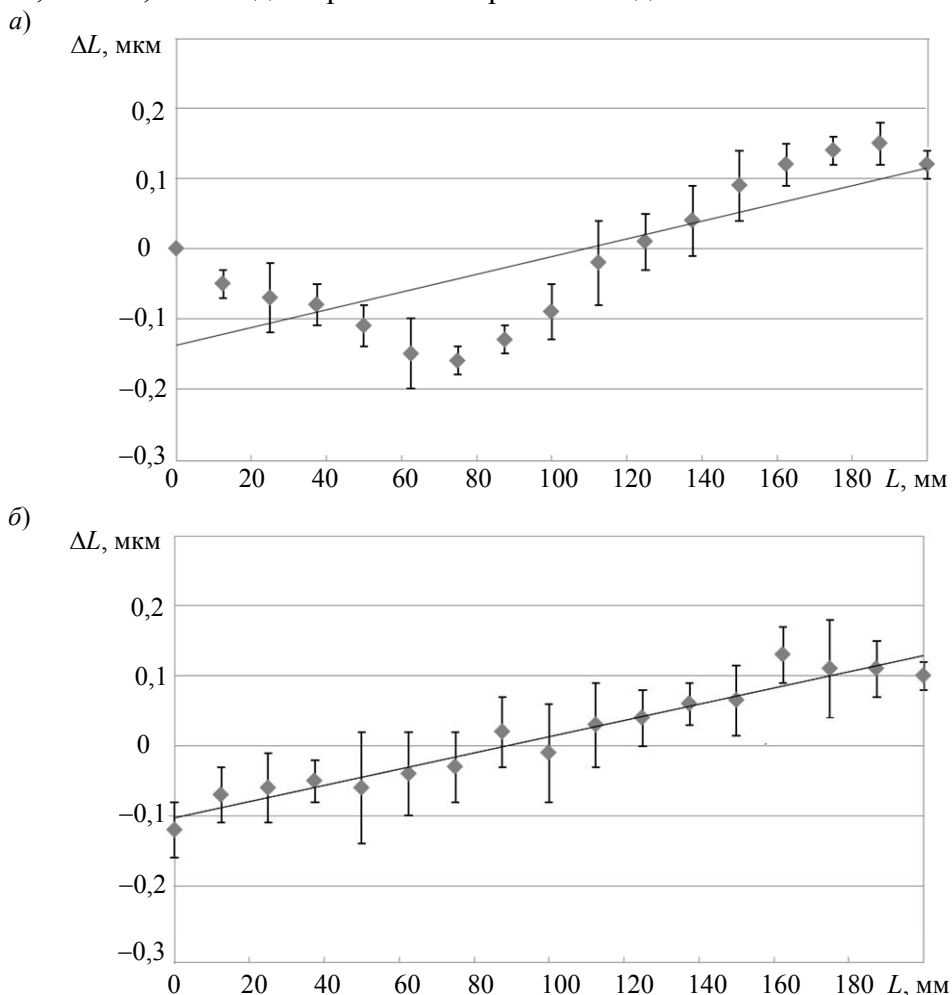


Рис. 3

В ходе измерений температура воздуха составляла  $20,7$  °С, температура материала установки  $20,1$  °С, температурный коэффициент материала установки  $11,7$  мкм/(м·°С), давление  $747,7$  мм рт. ст., влажность  $39,4$  %.

**Заключение.** На основе полученных результатов измерения погрешности разработанного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений субмикронной точности „Л-200“ можно сделать вывод о правильности выбора принципа функционирования преобразователя и схемы его построения. Измеренное предельное значение погрешности преобразователя составляет  $\pm 0,17$  мкм, что отвечает современным требованиям к высокоточным операциям на механообрабатывающем оборудовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кортаев В. В., Прокофьев А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Ч. I. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
2. Турухано Б. Г., Турухано Н. Фотоэлектрические преобразователи линейных перемещений на базе голографических решеток // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 8. С. 69—73.
3. Gordeev S. V., Turukhano B. G. Investigation of the interference field of two spherical waves for holographic recording of precision radial diffraction gratings // Optical & Laser Technology. 1996. Vol. 28, N 4. P. 255—261.

4. Пат. 2197713 РФ. Датчик линейных перемещений / Б. Г. Турухано, В. П. Горелик, С. В. Гордеев // БИ. 2003. № 3. С. 151.
5. Турухано Б. Г., Турухано Н., Вилков Е. А Синтез апертуры цифрового поля // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 145—150.

**Сведения об авторах**

- Николай Викторович Смирнов** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: pirate.kolyan@gmail.com
- Александр Валерьевич Прокофьев** — канд. техн. наук; ОАО „Специальное конструкторское бюро станочных информационно-измерительных систем с опытным производством“ (ОАО „СКБ ИС“), Санкт-Петербург; начальник Бюро метрологии; E-mail: avp79@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
29.01.13 г.

УДК 621.384

И. В. ЕРОФЕЕВ

## АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ ФОКУСИРОВКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРА

Рассматривается способ автоматической компенсации расфокусировки оптико-электронных систем ИК-спектра. Приводится вариант использования эффекта „нарцисса“ для автоматической фокусировки таких систем.

**Ключевые слова:** компенсация расфокусировки, инфракрасный спектр, оптико-электронные системы, автоматическая фокусировка, эффект „нарцисса“.

Использование эффекта автоколлимации для оценки текущих значений параметров инфракрасных приборов и формирования сигналов при их автоматической диагностике и регулировке известно достаточно давно [1]. Особенность использования автоколлимационного эффекта в ИК-диапазоне заключается в том, что контраст собственного ИК-излучения фотоприемника (ФП) может быть зарегистрирован им же или другим фотоприемником, если соответствующим образом организовать ход лучей в оптической системе. В частности, хорошо известный прием при настройке и юстировке тепловизионных приборов (ТВП) состоит в наблюдении внутренней полости фотоприемного устройства через оптическую систему тепловизора с помощью другого ТВП. Как развитие этого метода в работе [2] предлагается перед входным зрачком оптической системы ИК-прибора перпендикулярно ее оси поместить зеркало, обеспечивающее автоколлимационное отражение собственного ИК-излучения внутренних элементов конструкции фотоприемника на его же чувствительные элементы. Особенность формирования излучения в такой схеме заключается в том, что максимальную резкость изображения имеют только те элементы, которые находятся в фокальной плоскости и в плоскости промежуточного изображения, т.е. собственно чувствительные элементы ФП. В современных ИК-приборах рабочая температура этих элементов фотоприемных устройств отличается от температуры других оптических и конструктивных элементов приборов и от температуры излучения наблюдаемого объекта. Для ИК-приборов с криогенным охлаждением фотоприемников контраст их ИК-излучения при автоколлимации столь велик, что площадь

отражающего автоколлимационного зеркала должна составлять не более 2 % от апертуры для формирования сигнала, обеспечивающего выполнение операций калибровки и автофокусировки [1—3].

В тепловизионных приборах с неохлаждаемыми ФП (микроболометрическими или пироэлектрическими матрицами) также можно наблюдать изображение фотоприемника, если поместить зеркало перед объективом ТВП, хотя контраст собственного ИК-излучения ФП значительно меньше по сравнению с криогенными ФП. Как показывает практика, при работе современных ТВП с неохлаждаемыми ФП на тепловизионном автоколлимационном изображении можно увидеть лишь матрицу полностью без различения отдельных чувствительных элементов, как это наблюдается в ТВП с криогенными ФП. Возможно, повышение чувствительности неохлаждаемых ФП позволит обеспечить автоколлимационное наблюдение тонкой структуры матрицы и в этом случае.

Практическая возможность наблюдения фрагментов изображения ФП в автоколлимационном режиме существует в любом случае, что является предпосылкой создания схем автоматической фокусировки оптико-электронных систем (ОЭС). В настоящей статье рассматриваются варианты применения автоколлимационного метода для автофокусировки ОЭС ИК-спектра, работающих преимущественно в режиме „бесконечность“ и оперативная юстировка которых невозможна. Поскольку расфокусировка присуща всем реальным оптическим системам, то разработанные методы целесообразно применять в следующих случаях:

— если информация о величине расфокусировки ИК-канала многоспектральной ОЭС может быть использована для компенсации расфокусировки других каналов;

— если в ОЭС отсутствует оперативная обратная связь с оператором для корректировки фокусировки или такая связь отсутствует вообще (например, в тепловых головках самонаведения, в ОЭС космических аппаратов, имеющих большую скважность сеансов связи).

Общая идея метода состоит в том, чтобы, используя эффект автоколлимации, обеспечить динамическую компенсацию расфокусировки ИК-канала и его автоматическую фокусировку на „бесконечность“.

Технически возможны два варианта формирования оптического хода лучей для обеспечения автоколлимационного эффекта: введение в оптическую схему в определенные моменты времени зеркального элемента, перекрывающего полностью входной зрачок оптической системы или его часть, или же введение постоянного отражающего элемента.

Первый вариант конструктивно очевиден, но оправдан лишь в ОЭС, имеющих нерабочие периоды в циклограмме функционирования, и не позволяет вести непрерывный контроль за качеством фокусировки.

Второй вариант схемных решений предусматривает выведение отражающего элемента за пределы полезного входного зрачка и введение дополнительного чувствительного элемента в плоскости ФП, на котором фокусируется автоколлимационное изображение (рис. 1). Такие схемы автоматизированного контроля достаточно широко распространены в оптических системах, разница заключается лишь в том, что при использовании предлагаемых методов не нужен дополнительный источник оптического излучения в контрольном канале, так как в качестве такового используется собственно фотоприемник ИК-излучения, „наблюдающий сам себя“ в автоколлимационном режиме. В этом состоит принципиальная особенность применения автоколлимационных методов в ИК-диапазоне.

В рамках конкретной реализации описанных вариантов была разработана схема для проведения экспериментов по оценке получаемых автоколлимационных сигналов. Эти сигналы формировались, в первую очередь, за счет собственного излучения теплых и холодных (криогенных) тестовых объектов, отраженного от зеркальной поверхности перед объективом макета. В результате приемник излучения регистрировал тепловые изображения исследуемых объектов.



Физический принцип формирования тепловых изображений криогенных и теплых объектов одинаков, необходимо лишь учитывать, что измеряемые величины потоков излучения должны находиться в рабочем диапазоне чувствительности выбранного приемника излучения, а при измерении величин контраста следует учитывать форму кривой чувствительности приемника.

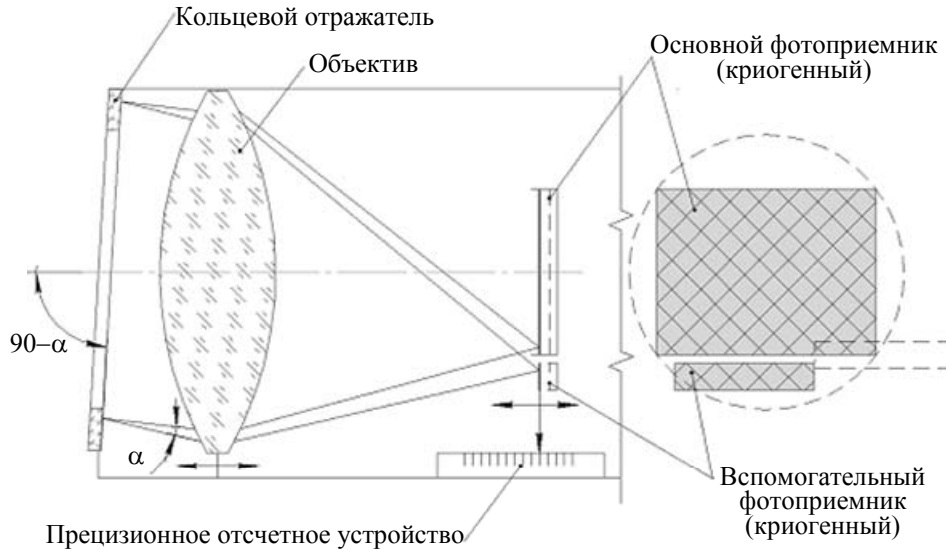
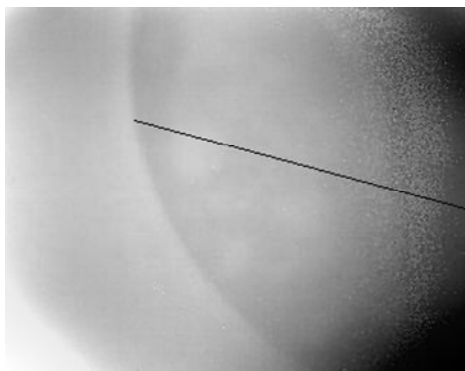


Рис. 1

В ходе экспериментов были получены видеозаписи процесса фокусировки. На некоторых из них даже без обработки изображения различимы границы матрицы болометрического приемника и тепловые контрасты тестовых объектов. Изображение теплового контраста холодного тестового объекта приведено на рис. 2.

После того как макет был сфокусирован на контрастное изображение матрицы болометрического приемника, в фокальную плоскость объектива рядом с болометром устанавливались поочередно горячий и холодный тестовые объекты и производились соответствующие видеозаписи. Затем из оптической схемы удалялось плоское зеркало, и приемник фиксировал изображение удаленных объектов (рис. 3). Более качественного изображения последующей фокусировкой достичь не удалось. Следовательно, макет в момент наблюдения тестовых объектов был сфокусирован на бесконечность. В качестве горячего тестового объекта использовалась нихромовая проволока толщиной 0,1 мм сопротивлением 35 Ом с проходящим по ней током в 0,34 А при напряжении 12 В. В качестве холодного тестового объекта был использован одноэлементный криогенный приемник типа „Сирень“. Болометрическим приемником служил прибор Photon OEM Core (фирмы FLIR, США) на основе оксида ванадия формата 320×240 с размером элемента 38 мкм и диапазоном спектральной чувствительности от 7,5 до 13,5 мкм ([www.indigosystems.com](http://www.indigosystems.com)).



Граница между  
индиевой  
подложкой и  
стеклянной  
колбой  
криогенного  
приемника

Рис. 2

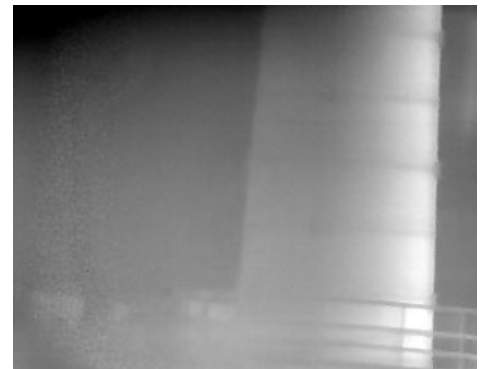


Рис. 3

В процессе работы ОЭС может происходить их расфокусировка, которая проявляется не только в смещении фокальной плоскости, но и в искривлении волнового фронта, что крайне сложно предсказать заранее и что в результате приводит к ухудшению качества изображения. Это особенно заметно в космических объективах большого диаметра и проявляется в том, что изображается лишь часть поля зрения, а остальная картина размыта. Эта ситуация осложняется, когда приоритетная область кадра оказывается расфокусированной. Для ИК-приемников, в отличие от матриц для видимого диапазона, пока не существуют технологии, позволяющие реализовывать автофокусировку на основе фазового принципа. Поэтому нужен другой механизм.

При использовании автоколлимационного метода фокусировки, если чувствительности выбранного вспомогательного приемника будет достаточно для разрешения матричной структуры основного фотоприемника, можно осуществлять компенсацию и автофокусировку по выбранному участку поля зрения (рис. 4). В таком случае приоритетная область кадра будет постоянно сфокусирована независимо от изменения волнового фронта в других областях.

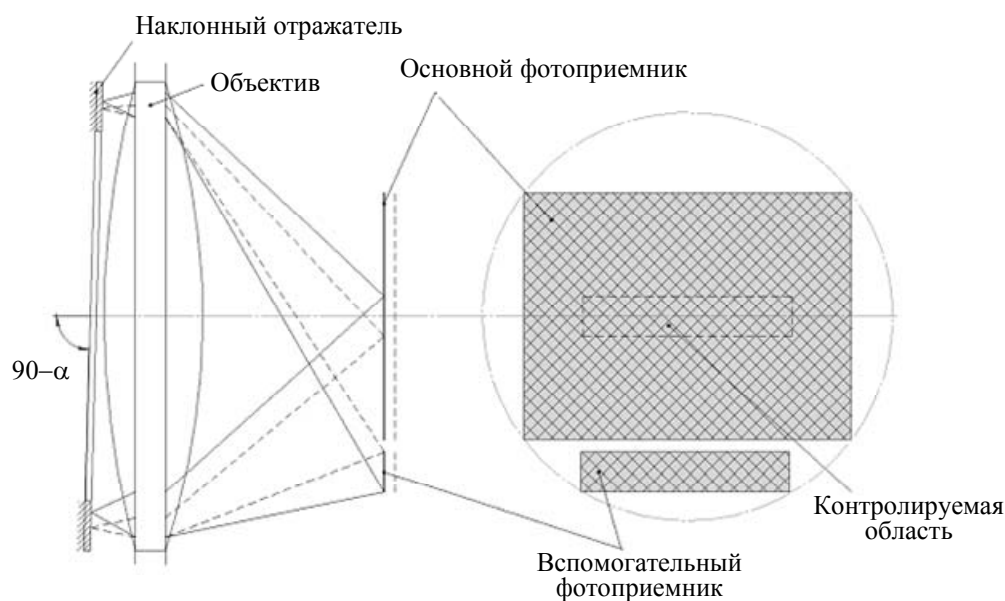


Рис. 4

Развивая этот вариант применения автоколлимационного метода, можно использовать в качестве вспомогательного фотоприемника такой же, как и основной, постоянно контролируя положение плоскости наилучшего изображения и изменения волнового фронта. Эти данные позволят не только отслеживать смещение плоскости изображения вдоль оптической оси, но и управлять, например, адаптивным зеркалом.

Проведенные эксперименты проиллюстрировали возможность использования эффекта „нарцисса“ для автоматической фокусировки оптико-электронных систем на „бесконечность“, а также для компенсации расфокусировки этих систем вследствие различных факторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Утенков А. Б., Белоусов Ю. И., Иванов Д. В. Использование автоколлимационных схем в тепловизионных приборах // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 8. С. 69—73.
2. Способ фокусировки оптических систем тепловизора и устройство для его осуществления / Ю. И. Белоусов и др. Заявка на изобретение № 96103439/28. Полож. реш. от 16.02.1996 г.
3. Способ определения чувствительности тепловизора и устройство для его осуществления / Ю. И. Белоусов и др. Заявка на изобретение № 96104238/28. Полож. реш. от 04.03.1996 г.

**Илья Владимирович Ерофеев**

**Сведения об авторе**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптоинформационных технологий и материалов;  
E-mail: defremeri@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
оптоинформационных технологий и  
материалов

Поступила в редакцию  
12.12.11 г.

УДК 671.327.1

С. В. СОКОЛОВ, В. В. КАМЕНСКИЙ

## ОПТИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Предложен оптический пространственно-частотный аналого-цифровой преобразователь, принцип действия которого основан на последовательном преобразовании частоты входного оптического сигнала. Преобразователь предназначен для перевода в позиционный двоичный код как электрических, так и оптических аналоговых сигналов.

**Ключевые слова:** устройства обработки информации, оптический аналого-цифровой преобразователь, оптический объединитель, оптический Y-разветвитель.

В настоящее время разработано большое количество различных по быстродействию и точности электронных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [1—3]. Общими их недостатками являются низкое быстродействие, уменьшающееся с ростом разрядности АЦП, и большая сложность.

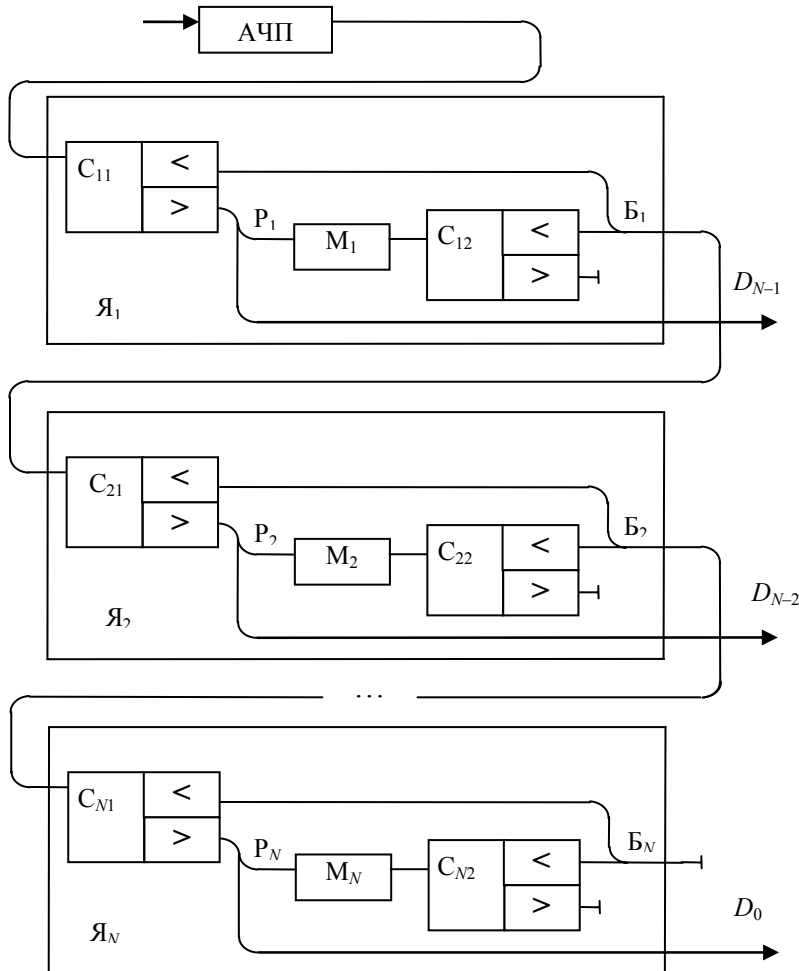
Использование оптических технологий при разработке различного вида АЦП позволяет существенно повысить их быстродействие. Тем не менее известные электрооптические АЦП [2, 3] по-прежнему характеризуются недостаточным быстродействием для использования в оконечном каскаде электронных элементов (фотодетектора, усилителя, компаратора) с суммарным временем срабатывания более  $10^{-6}$  с.

В настоящей статье представлен АЦП, имеющий достаточно простую и технологичную структуру и позволяющий осуществлять преобразование в позиционный двоичный код как электрических, так и оптических аналоговых сигналов с быстродействием, потенциально возможным для оптических устройств обработки информации.

Работа устройства основана на преобразовании интенсивности (или амплитуды) аналогового оптического или электрического входного сигнала в оптический сигнал с пространственной частотой, пропорциональной интенсивности входного сигнала, с последующим ее нелинейным преобразованием и многократной пространственно-частотной фильтрацией, что обеспечивает формирование на выходе АЦП оптического двоичного кода, соответствующего аналоговому входному сигналу.

Оптический пространственно-частотный АЦП, функциональная схема которого показана на рисунке, состоит из оптического амплитудно-частотного преобразователя АЧП, оптических пространственно-частотных селекторов  $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{M1}, C_{N2}$ ; оптических Y-разветвителей  $P_1, \dots, P_N$ ; оптических пространственных амплитудных модуляторов  $M_1, \dots, M_N$ ; оптических объединителей  $B_1, \dots, B_N$ .

Входом АЦП является вход оптического амплитудно-частотного преобразователя. Селекторы  $C_{k1}$ ,  $C_{k2}$ , Y-разветвитель  $P_k$ , модулятор  $M_k$  и объединитель  $B_k$  образуют  $k$ -ю разрядную ячейку ( $Я_k$ ) АЦП,  $k = 1, \dots, N$ . Разрядная ячейка  $Я_N$  соответствует младшему разряду АЦП  $D_0$ , а ячейка  $Я_1$  — старшему разряду  $D_{N-1}$ . Информационные выходы всех разрядных ячеек образуют соответствующие выходы  $D_{N-1}, \dots, D_0$  устройства.



На выходе оптического АЧП формируется фронт стоячей оптической монохроматической волны, пространственная частота которой пропорциональна интенсивности  $I$  сигнала на его входе. АЦП может быть выполнен в виде или параметрического генератора частоты, или оптического резонатора с оптически прозрачным периметром и управляемой оптической длиной, или оптического мультиплексора, на вход которого подается набор фронтов стоячих монохроматических волн с заданными частотами [4].

Селекторы  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ , ...,  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  могут быть выполнены в виде или дихроичного элемента (призмы, фильтра, зеркала и т.д.), или дифракционной решетки, или призматического элемента и т.п. Функцией селекторов является пространственное разделение оптических сигналов по частоте: если пространственная частота сигнала меньше заданной (для селектора данной разрядной ячейки), то входной сигнал селектора пройдет на его первый выход „<“, если больше или равна — то на второй выход „>“.

Модуляторы  $M_1, \dots, M_N$  могут быть выполнены в виде транспаранта с постоянной функцией пропускания (гармонической с соответствующей заданной частотой).

Оптические Y-разветвители  $P_1, \dots, P_N$  и второе оптическое ответвление каждого объединителя  $B_1, \dots, B_N$  являются активными оптическими волноводами с коэффициентом усиления 2 (во избежание затухания информационных сигналов в тракте АЦП).

Рассмотрим принцип работы аналогово-цифрового преобразователя на примере трех-разрядного АЦП (поясняя отдельные значения параметров для общего случая  $N$  разрядов).

Пусть на вход АЦП подан сигнал интенсивностью  $I$ , формирующий на выходе оптического АЧП фронт стоячей оптической монохроматической волны с пространственной частотой  $\omega_0$ , относительное значение которой  $\omega_1$  — относительно нижней границы возможного оптического диапазона частот  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ :  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_{\min}$  — соответствует 5 (при этом диапазон изменения  $\omega_1 = KI$ , где  $K$  — коэффициент пропорциональности, равный  $7(2^N - 1)$ ).

Иными словами, на выходе оптического АЧП формируется плоский оптический монохроматический поток с распределением амплитуды в направлении оси  $Ox$ , перпендикулярной его распространению:

$$A(x) = A \cos(\omega_0 x),$$

где  $A$  — постоянная известная величина.

Данный поток поступает на вход первой разрядной ячейки  $Я_1$  (на вход селектора  $C_{11}$ ), частота пространственного разделения оптических сигналов которого равна

$$\Omega_{p1} = \Omega_1 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_1 = 2^{N-1} = 4$ .

Так как относительная частота входного сигнала  $\omega_1 = 5$  превышает частоту селектора  $C_{11}$ , то сигнал формируется на его втором выходе „ $\rangle$ “. Этот сигнал поступает как на информационный выход разрядной ячейки  $Я_1$ , т.е. на выход старшего  $D_{N-1}$ -го разряда АЦП, где формирует информационную „1“ (оптический сигнал амплитудой  $A$ ), так и на вход модулятора  $M_1$  с функцией пропускания по оси  $Ox$ :  $f_1(x) = \cos(\Omega_1 x)$ .

Таким образом, на выходе модулятора  $M_1$  будет сформирован оптический сигнал с распределением амплитуды по оси  $Ox$ , равным

$$A_1(x) = A \cos(\omega_0 x) \cos(\Omega_1 x) = A / 2 (\cos(\omega_0 x + \Omega_1 x) + \cos(\omega_0 x - \Omega_1 x)).$$

Данный двухчастотный оптический сигнал — с относительными частотами  $\omega_2 = \omega_1 - \Omega_1 = 1$  и  $\omega_3 = \omega_1 + \Omega_1 = 9$  — поступает на вход селектора  $C_{12}$ , где происходит его разделение: оптический сигнал с частотой  $\omega_3$  проходит на его второй „поглощающий“ выход „ $\rangle$ “, а сигнал с частотой  $\omega_2$  — на его первый выход „ $\langle$ “, и далее через объединитель  $B_1$  на выход разрядной ячейки  $Я_1$  и на вход селектора  $C_{21}$  разрядной ячейки  $Я_2$ .

Для селектора  $C_{21}$  частота пространственного разделения оптических сигналов

$$\Omega_{p2} = \Omega_2 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_2 = 2^{N-2} = 2$ .

Так как относительная частота входного сигнала  $\omega_2 = 1$  меньше частоты селектора  $C_{21}$ , то сигнал формируется на его первом выходе „ $\langle$ “. Этот оптический сигнал через объединитель  $B_2$  пройдет на выход разрядной ячейки  $Я_2$  и на вход селектора  $C_{31}$  разрядной ячейки  $Я_3$ . На его втором выходе „ $\rangle$ “ при этом сигнал отсутствует, и, следовательно, на выходе второго разряда  $D_{N-2}$  АЦП формируется информационный „0“.

Для селектора  $C_{31}$  разрядной ячейки  $Я_3$  частота пространственного разделения оптических сигналов равна

$$\Omega_{p3} = \Omega_3 + \omega_{\min},$$

где  $\Omega_3 = 2^{N-3} = 1$ .

Следовательно, оптический сигнал на его входе с относительной частотой  $\omega_2 = 1$  пройдет на его второй выход „ $\rangle$ “ и далее непосредственно на выход младшего разряда АЦП, где

будет сформирована информационная „1“ (оптический сигнал амплитудой  $A$ ). При этом можно дополнительно отметить, что аналогичным образом на выходе модулятора  $M_3$  разрядной ячейки  $Y_3$  (с функцией пропускания по оси  $Ox$   $f_3(x) = \cos(\Omega_3 x)$ ) будет сформирован двухчастотный оптический сигнал с распределением амплитуды по оси  $Ox$ , равным

$$A_3(x) = A \cos((\omega_2 + \omega_{\min})x) \cos(\Omega_3 x) = A / 2 (\cos((\omega_2 + \omega_{\min})x + \Omega_3 x) + \cos((\omega_2 + \omega_{\min})x - \Omega_3 x)),$$

и с относительными частотами  $\omega_3 = \omega_2 + \omega_{\min} - \Omega_3 = 0$  и  $\omega_4 = \omega_2 + \omega_{\min} + \Omega_3 = 2$ . Разделение этого сигнала происходит в селекторе  $C_{32}$ : сигнал с частотой  $\omega_4$  пройдет на его второй „поглощающий“ выход „ $\rangle$ “, а сигнал с частотой  $\omega_3$  (на границе используемого диапазона) — на его первый выход „ $\langle$ “, который в данной разрядной ячейке  $Y_3$  также является „поглощающим“. Очевидно, что данные сигналы не влияют на формирование кода АЦП: наличие модулятора  $M_3$  и селектора  $C_{32}$  в данной ( $N$ -й) разрядной ячейке  $Y_3$  ( $Y_N$ ) обусловлено как требованиями к унификации конструкции ячейки, так и потенциальной возможностью дальнейшего расширения разрядности АЦП.

Таким образом, на выходе АЦП формируется, практически в реальном масштабе времени, двоичный код  $\{D_0, \dots, D_{N-1}\} = 101$ , соответствующий входному аналоговому сигналу интенсивностью  $I = 5$ .

По существу, быстродействие рассмотренного АЦП определяется лишь временем амплитудно-частотного преобразования в оптическом АЧП (не более  $10^{-10}$  с) и практически не зависит от разрядности АЦП, что позволяет применять предложенную схему в устройствах, требующих обработки информации в реальном масштабе времени. Возможность технической реализации всех функциональных элементов преобразователя в интегральном исполнении обуславливает актуальность его использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: Мир, 1982. 512 с.
2. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
3. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа, 1988. 181 с.
4. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. СПб: Питер, 2003. 270 с.

#### Сведения об авторах

- Сергей Викторович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru
- Владислав Валерьевич Каменский** — канд. техн. наук, доцент; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: kam-vladislav@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматики и телемеханики  
на железнодорожном транспорте

Поступила в редакцию  
14.09.11 г.

А. С. САУШИН, А. М. ЛЕЩЁВ, Г. М. МИХЕЕВ

## РАСЧЕТ НЕОСЛЕПЛЯЮЩЕГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

Предложена конструкция неослепляющего светодиодного светильника. Устранение ослепляющего эффекта достигается за счет установки пластин-отражателей, равномерно распределяющих излучение светодиодов по поверхности светильника. Произведен оптический расчет и определены геометрические параметры светильника из прозрачного стекла с показателем преломления 1,5.

**Ключевые слова:** светотехника, светодиоды, энергосберегающие технологии, осветительные устройства.

Одной из актуальных проблем, связанных с разработкой современных энергосберегающих технологий, является использование энергосберегающих ламп вместо ламп накаливания. Однако применение содержащих ртуть энергосберегающих ламп порождает другие проблемы, к которым относится, например, необходимость сбора и утилизации ламп, вышедших из строя, а также опасность отравления людей ртутью.

С другой стороны, появление в последние годы мощных светодиодов (например, Cree XLamp XM-L, Cree MX-3 и др.) позволило создавать компактные осветительные приборы с высокой яркостью и малым количеством потребляемой энергии. Срок службы светодиодных светильников составляет более 50—100 тыс. ч, что на порядок превышает срок службы энергосберегающих ламп. Существенным недостатком таких светодиодных осветительных приборов является их ослепляющее действие, вызванное мощностью светового потока, падающего на сетчатку глаза. Уменьшить световой поток и соответственно яркость источника света можно, увеличив площадь излучающей поверхности, что позволит избежать ослепляющего действия.

Конструкции светильников со сниженным ослепляющим эффектом известны [1—3], однако они имеют определенные недостатки. В частности, в конструкции светильника, предложенного в работе [2], предусмотрено использование защитного стекла с локальными и регулярными изменениями кривизны и толщины или оптических свойств. Такая конструкция светодиодного светильника ввиду сложности изготовления неоптимальна.

В настоящей статье рассматривается разработанная конструкция светодиодного светильника, не имеющего ослепляющего эффекта; в ее состав входят блок питания 1, корпус 2, крышка-рассеиватель 3, пластины-отражатели 4-1 — 4-7, плата 5, светодиоды 6, торцевая 7 и лицевая 8 отражающие пластины с высоким коэффициентом отражения света (рис. 1, а). Плата 5 установлена перпендикулярно плоскости корпуса; лицевая пластина 8 находится между пластинами-отражателями и корпусом, а торцевая пластина 7 устанавливается под углом  $45^\circ$  к корпусу. Функция уменьшения ослепляющего эффекта обеспечивается пластинами-отражателями, которые представляют собой частично отражающие пластины, разделенные друг от друга воздушным зазором. Пластины-отражатели установлены перпендикулярно к секущей плоскости (проходящей, в свою очередь, перпендикулярно через плату и плоскость корпуса) и наклонно к корпусу под различными углами  $\gamma$  в пространстве между корпусом и крышкой-рассеивателем.

Излучение светодиодов проходит через все пластины-отражатели, частично отражаясь на крышку-рассеиватель. Затем остаточное излучение отражается к крышке-рассеивателю от торцевой пластины 7. Таким образом, мощность излучения светодиодов распределяется по крышке-рассеивателю, что способствует устранению ослепляющего эффекта.

Для максимально равномерного распределения мощности излучения по крышке-рассеивателю необходимо, чтобы каждая пластина 4-1 — 4-7 отражала часть излучения определенной мощности и располагалась на определенном расстоянии от светодиодов. По этой же причине каждая пластина-отражатель должна иметь определенный коэффициент отражения, рассчитываемый по формуле

$$R_i = p_i / P_i,$$

где  $i=1, 2, 3 \dots$  — номер пластины в порядке удаления от светодиодов;  $p_i$  — мощность излучения, которое отражается от  $i$ -й пластины;  $P_i = P_{i-1} - p_i$  — мощность излучения, падающего на  $i$ -ю пластину.

В дальнейшем примем, что относительная изначальная мощность  $P_1=1$ .

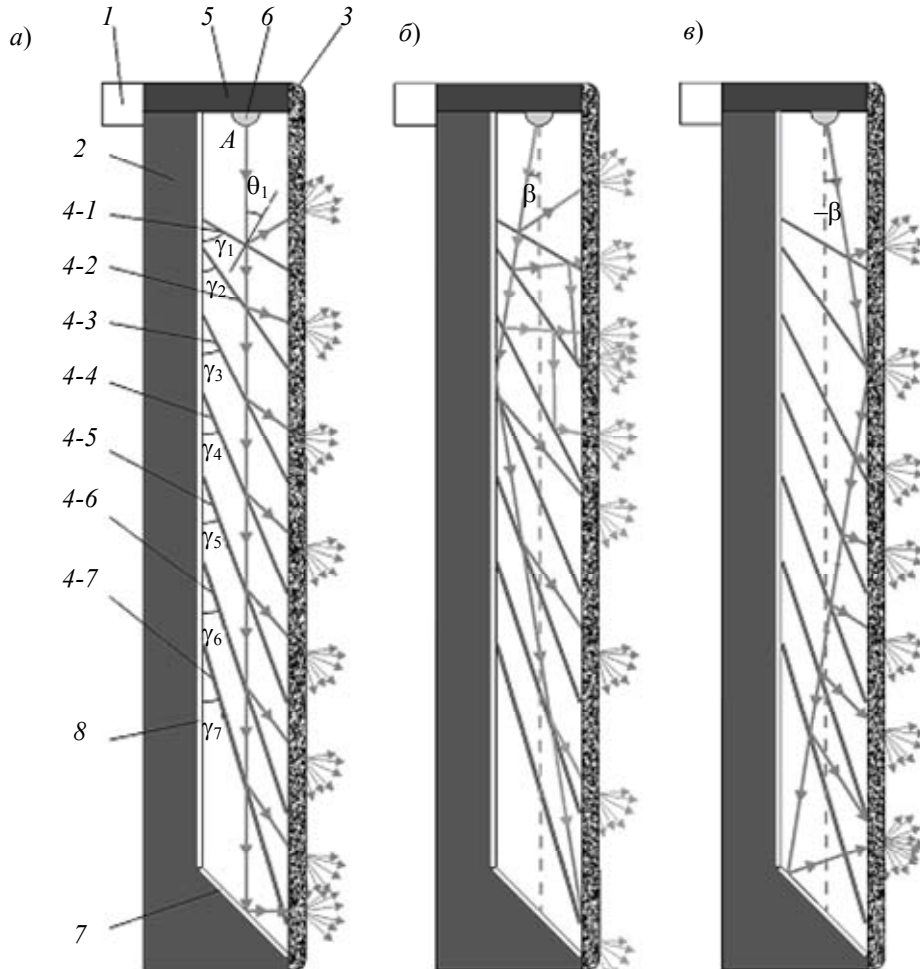


Рис. 1

Изготовить пластины с рассчитанными коэффициентами отражения можно нанесением просветляющих и отражающих покрытий, но этот способ является сложным и дорогостоящим. Поэтому предлагается задавать коэффициенты отражения пластин изменением угла падения на них излучения светодиодов.

Распределение мощности излучения каждого светодиода в пространстве определяется его диаграммой направленности. Обычно наибольшая интенсивность излучения светодиода приходится на центр его диаграммы направленности, следовательно, целесообразно рассчитывать коэффициенты отражения именно для центрального луча.

Как правило, излучение светодиодов неполяризовано, его можно рассматривать как совокупность излучения с  $s$ - и  $p$ -поляризацией. Коэффициент отражения для каждого типа поляризации определяется формулами Френеля и зависит от угла падения излучения на пластину-отражатель, а также от показателя преломления материала пластин.



Согласно работе [4] коэффициенты отражения для  $s$ -поляризации и для  $p$ -поляризации определяются как

$$r_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \vartheta_i)}{\sin^2(\theta_i + \vartheta_i)}; \quad r_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_i - \vartheta_i)}{\operatorname{tg}^2(\theta_i + \vartheta_i)},$$

где  $\theta_i$  — угол падения излучения на  $i$ -ю пластину-отражатель,  $\vartheta_i$  — угол преломления падающего излучения, определяемый по закону Снеллиуса:

$$\vartheta_i = \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right),$$

здесь  $n$  — показатель преломления воздуха,  $n_i$  — показатель преломления материала пластин-отражателей.

Следует, однако, учитывать, что пластины-отражатели имеют две границы раздела сред, а следовательно, две отражающие поверхности. С учетом этого суммарные коэффициенты отражения пластин-отражателей определяются выражениями

$$R_s = r_s + \sum_{i=0}^{\infty} r_s^{2i+1} (1-r_s)^2, \quad R_p = r_p + \sum_{i=0}^{\infty} r_p^{2i+1} (1-r_p)^2.$$

Так как свет с взаимно-перпендикулярной поляризацией не интерферирует между собой, то интенсивность излучения — есть сумма интенсивностей  $s$ - и  $p$ -поляризаций. Таким образом, коэффициент отражения естественного света

$$R = \frac{R_s + R_p}{2}, \tag{1}$$

где

$$R_s(\theta_i) = \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]^{2i+1}}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\operatorname{tg}^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \right\}^2, \tag{2}$$

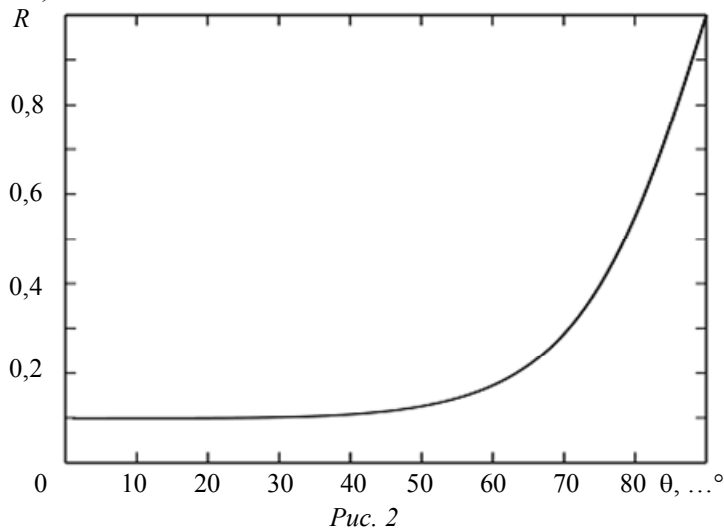
$$R_p(\theta_i) = \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]^{2i+1}}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{\sin^2\left[\theta_i - \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]}{\sin^2\left[\theta_i + \arcsin\left(\frac{n \sin \theta_i}{n_i}\right)\right]} \right\}^2. \tag{3}$$

Таким образом, суммарный коэффициент отражения пластин-отражателей определяется только показателем преломления их материала и углом падения излучения светодиодов.

Следовательно, для получения коэффициента отражения пластины требуется лишь выбрать угол  $\theta$ . С другой стороны, по формулам (2) и (3) при известном коэффициенте отражения  $R$  можно определить угол  $\theta$ . Однако найти простое аналитическое выражение зависимости  $\theta$  от  $R$  не представляется возможным, поэтому целесообразно воспользоваться численными методами.

Зависимость суммарного коэффициента отражения естественного света от угла падения излучения представляет собой монотонную возрастающую функцию (рис. 2 — зависимость  $R(\theta)$  при показателе преломления стекла 1,59). Следовательно, для расчета угла падения излучения можно применить метод дихотомии [5] (последовательное деление на две части, не связанные между собой).



В данном случае предварительно необходимо выбрать марку стекла и задать требуемый суммарный коэффициент отражения  $R$ , который не может быть меньше чем  $R(\theta=0)$ . Затем методом дихотомии подбирается угол, соответствующий заданному коэффициенту отражения первой пластины. Далее следует рассчитать мощность излучения, прошедшего через первую пластину. Здесь следует учитывать, что коэффициенты отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций различны, поэтому мощность излучения для обеих поляризаций также будет различна:

$$P_{si} = P_{si-1} - R_{si-1}; \quad P_{pi} = P_{pi-1} - R_{pi-1},$$

где  $P_{si}$  и  $P_{pi}$  — мощность излучения, прошедшего через пластину  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно;  $P_{si-1}$  и  $P_{pi-1}$  — мощность излучения, падающего на пластину  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно,  $R_{si-1}$  и  $R_{pi-1}$  — коэффициенты отражения пластины  $i-1$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций соответственно, для удобства расчетов  $P_{s1}=1$  и  $P_{p1}=1$ .

Коэффициенты отражения следующей пластины необходимо рассчитывать с учетом мощности падающего на нее излучения, т.е. задавать такое значение коэффициента  $R$ , чтобы  $P_i R_i = P_{i-1} R_{i-1}$ . Таким образом, суммарные коэффициенты отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций будут определяться как

$$R_{si} = \left( r_{si} + \sum_{i=0}^{\infty} r_{si}^{2i+1} (1-r_{si})^2 \right) P_{si-1}, \quad R_{pi} = \left( r_{pi} + \sum_{i=0}^{\infty} r_{pi}^{2i+1} (1-r_{pi})^2 \right) P_{pi-1}.$$

При этом искомый угол  $\theta_i$  определяется из того же условия (1) методом дихотомии. Расчет следует производить до тех пор, пока мощность отраженного пластиной излучения не превысит мощность излучения, прошедшего через пластину. Таким образом, можно определить углы падения излучения для всех пластин-отражателей.

Для равномерного распределения мощности излучения по крышке-рассеивателю необходимо расположить пластины-отражатели так, чтобы расстояния  $d$  между местами падения

центрального луча  $A$  светодиодов, отраженного от каждой пластины, на крышку-рассеиватель были одинаковыми. Расстояние  $d$  будет определяться как

$$d = L_0 / N,$$

где  $L_0$  — длина крышки-рассеивателя,  $N$  — количество пластин-отражателей включая торцевую отражающую пластину.

Расстояние от светодиодов до каждой пластины-отражателя рассчитывается по формуле

$$D_i = di - \frac{L_2}{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right)} - \frac{L_1 - L_2}{\cos\left(2\theta_i - \frac{\pi}{2}\right)} \sin\left(2\theta_i - \frac{\pi}{2}\right),$$

где  $L_1$  — расстояние от корпуса до крышки-рассеивателя,  $L_2$  — расстояние от корпуса до центра светодиодов (рис. 3).

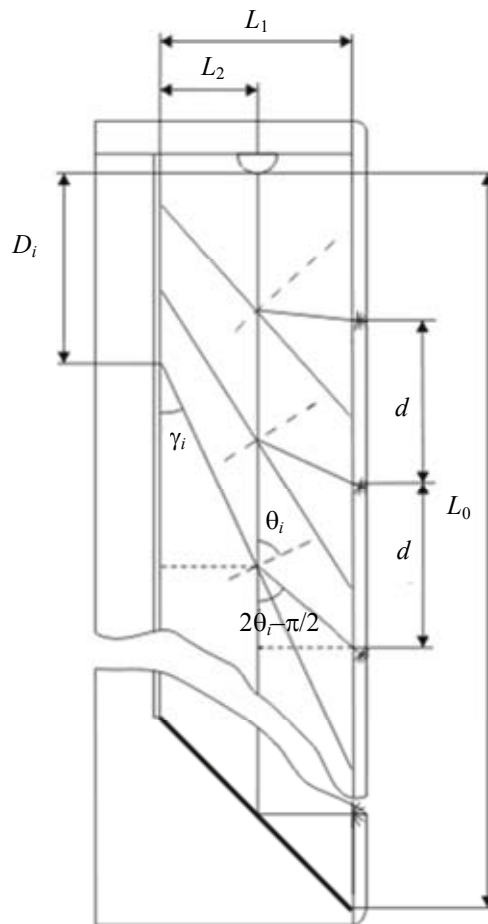


Рис. 3

Следует отметить, что нецентральные лучи, расходящиеся из светодиодов, например лежащие под углом  $\beta$  к центральному, тоже будут проходить через пластины-отражатели, частично отражаясь к крышке-рассеивателю. Лучи, лежащие под большими углами к центральному лучу, будут отражаться от лицевой пластины  $\delta$  (см. рис. 1, б) и могут частично отражаться от крышки-рассеивателя (см. рис. 1, в), что также будет способствовать уменьшению ослепляющего эффекта.

В соответствии с изложенным способом были рассчитаны параметры светодиодного светильника размером  $30 \times 75 \times 150$  мм, состоящего из одного ряда восьми светодиодов МХЗАУТ-А1-0000-000СЕЗ (производства компании “Cree”, США). Излучающая поверхность каждого светодиода — круг диаметром 4,2 мм при угловой ширине пучка, равной  $120^\circ$ . Частично отражающие пластины (7 шт.), выполненные из прозрачного оптического стекла

толщиной 0,5 мм с показателем преломления 1,5, расположены по отношению к корпусу под углами  $\gamma_1 = 36^\circ$ ,  $\gamma_2 = 29^\circ$ ,  $\gamma_3 = 24^\circ$ ,  $\gamma_4 = 19^\circ$ ,  $\gamma_5 = 16^\circ$ ,  $\gamma_6 = 13^\circ$ ,  $\gamma_7 = 10^\circ$ . При условии, что расстояния  $L_1=20$  мм, расстояние  $L_2=10$  мм. Расстояния от светодиодов до каждой пластины-отражателя соответственно равны:  $D_1=0$ ,  $D_2=10,6$  мм,  $D_3=20$  мм,  $D_4=28,1$  мм,  $D_5=34,8$  мм,  $D_6=38,7$  мм,  $D_7=31,6$  мм. Торцевая и лицевая отражательные пластины выполнены из алюминиевой фольги, а крышка-рассеиватель изготовлена из поликарбоната с матовой поверхностью. При номинальном токе питания светодиодов 350 мА данный светодиодный светильник обеспечивает равномерное освещение, при этом ослепляющий эффект отсутствует.

Таким образом, применяя предложенную относительно простую конструкцию, можно создавать светильники без ослепляющего эффекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 102749U1 РФ. Светильник / А. Г. Младенец, А. Г. Балабанов, Р. Р. Шаймухаметов. 20.04.2010.
2. Пат. 110816U1 РФ. Светильник светодиодный / А. Г. Младенец, А. Г. Балабанов. 24.06.2011.
3. Пат. 2401395C1 РФ. Светильник с отражателями / Е. В. Смолин. 06.03.2009.
4. Ландсберг Г. С. Оптика: Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.
5. Калиткин Н. Н. Численные методы: Учеб. пособие. М.: Наука, 1978. 512 с.

#### Сведения об авторах

- Александр Сергеевич Саушин** — аспирант; Институт механики УрО РАН, лаборатория лазерных методов исследований, Ижевск; E-mail: 56-i@mail.ru
- Алексей Михайлович Лещёв** — ООО „Айрин Лайт“, Воткинск; директор; E-mail: alexei555@gmail.com
- Геннадий Михайлович Михеев** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт механики УрО РАН, лаборатория лазерных методов исследований, Ижевск; E-mail: mikheev@udman.ru

Рекомендована  
Институтом механики УрО РАН

Поступила в редакцию  
04.12.12 г.

УДК 614.842

А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, В. В. КОРТАЕВ,  
О. Ю. ЛАШМАНОВ, Д. Ю. ЛЫСЕНКО, А. С. ШИРОКОВ

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОГО ПОЖАРА КАК ИСТОЧНИКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрены вопросы моделирования лесного пожара как источника инфракрасного излучения. Проанализированы основные компоненты лесного пожара, определяющие его характеристики. Приведен общий алгоритм синтеза тепловизионного изображения лесного пожара.

**Ключевые слова:** лесной пожар, тепловизионное изображение, моделирование лесного пожара, синтез изображения пожара.

**Введение.** Лесные пожары наносят огромный и часто невосполнимый ущерб природно-экологическим и материальным ресурсам. Только за 2012 г. по данным Федеральной службы государственной статистики России на территории РФ возникло 20,2 тыс. природных пожаров общей площадью 2,1 млн га, выгорело 64 млн кубометров леса [1].

Таким образом, вывод напрашивается сам собой: мониторинг очагов пожаров на территории лесных массивов, их раннее обнаружение и оперативное информирование соответствующих служб — актуальная природоохранная задача, которая должна решаться в комплексе с использованием различных методов и средств.

Наиболее перспективным методом решения данной проблемы является комплексное использование тепловизионных и телевизионных камер, установленных на борту беспилотного летательного аппарата (ЛА) [2]. При этом тепловизионное изображение позволяет зафиксировать активную зону пожара даже в условиях сильного задымления. Телевизионное изображение оптического диапазона позволяет привязать зону пожара к конкретной местности, а также определить направление ветра. Основным источником информации для поиска контуров лесного пожара является его изображение в тепловизионном канале.

**Математическая модель лесного пожара.** Для исследования и разработки алгоритма поиска контуров лесного пожара как источника инфракрасного излучения была создана математическая модель пожара. Модель синтезирует изображение контуров лесного пожара в тепловизионном канале оптической системы с учетом различных параметров (вида пожара, его формы, характеристик окружающей среды, условий наблюдения). Общая структура математической модели лесного пожара представлена на рис. 1.



Рис. 1

**Параметры лесного пожара.** Форма пожара постоянно меняется в ходе развития возгорания и зависит от многих факторов — силы и направления ветра, рельефно-ландшафтного состава лесного массива, времени, прошедшего с момента возгорания, и т.п. Наиболее часто встречаются следующие формы:

- округлая форма — наблюдается при равномерном распространении огня в безветренную погоду при однородных горючих материалах и относительно ровной местности;
- неравномерная (разносторонняя) форма — характерна при переменном ветре, разнородных горючих материалах, пересеченной местности;
- эллиптическая (вытянутая) форма — возникает при сильном ветре, относительно ровной местности, однородности горючих материалов.

Границы пожара формируются кромкой, которая имеет ширину 1—3 м на флангах и до 8 м на участке фронта пожара [3].

Для синтеза формы пожара целесообразно использовать каноническое уравнение эллипса на плоскости:

$$\frac{((x - x_0) \cos \varphi)^2}{a^2} + \frac{((y - y_0) \sin \varphi)^2}{b^2} = 1,$$

где  $x_0, y_0$  — положение эллипса на плоскости;  $\varphi$  — угол наклона эллипса к оси  $Ox$ ;  $a, b$  — большая и малая полуось соответственно.

Задавая размеры полуосей эллипса  $a$  и  $b$ , можно получить изображение пожара как округлой, так и эллиптической формы. Соотношение размеров полуосей позволяет имитировать силу ветра, а угол наклона эллипса — направление.

Температура лесного пожара является одной из основных характеристик. Она может отличаться как для различных видов пожара, так и на различных его участках. По температуре можно выделить следующие виды лесного пожара [3]:

- верховой: 900—1200 °С;
- низовой: 400—900 °С;
- подземный: 400—600 °С.

Для реализации модели, формирующей преобразование температуры объекта в видимое изображение, можно использовать прямую зависимость между тепловым контрастом объекта и яркостью его тепловизионного изображения:

$$U(x, y) = \alpha_T \Delta T(x', y'); \quad \Delta T = T(x', y') - T_0,$$

где  $U(x, y)$  — яркость изображения в точке  $(x, y)$ ;  $\alpha_T$  — коэффициент преобразования температуры с учетом спектральной характеристики;  $T(x', y')$  — температура объекта в точке  $(x', y')$ ;  $T_0$  — заданная температура фона.

Площадь возгорания является важнейшим фактором при определении тактики борьбы с лесным пожаром. На основе этого параметра проводится расчет требуемых средств и сил, направляемых на тушение пожара. Выделяют следующие виды пожара по площади:

- загорание: огнем охвачено 0,1—2 га;
- малый: 2—20 га;
- средний: 20—200 га;
- крупный: 200—2000 га.

Для синтеза этого компонента модели необходимо найти зависимость между геометрическими параметрами объекта и его оптическим изображением. В первом приближении такую связь можно определить исходя из законов геометрической оптики. Линейный масштаб изображения рассчитывается на основе значений фокусного расстояния  $f'$  оптической системы и расстояния  $Z$  до объекта [4]:

$$M = f' / Z,$$

тогда площадь объекта в пространстве изображения будет равна

$$S_{\text{из}} = S_{\text{об}} M^2,$$

где  $S_{\text{об}}$  — площадь объекта в пространстве предметов.

**Параметры окружающей среды и условия наблюдения.** Одним из немаловажных параметров, влияющих на правильность принятия решения о наличии пожара, являются шумы. Основными видами шумов в оптико-электронной системе обнаружения пожаров являются шумы фона и шумы приемника.

К фоновому шуму можно отнести фоновое излучение объектов поверхности земли (нагретые в дневное время деревья, камни и т.д.) и фоновое ослабление излучения (атмосферой,

облаком пара и т.д.). Флуктуации инфракрасного излучения наземных фонов обусловлены временными и пространственными градиентами как собственного, так и отраженного излучения, которые, в свою очередь, зависят от температуры, коэффициентов излучения и отражения, положения и структуры объектов, входящих в фоновое образование, условий наблюдения и т.п. При этом большинство фонов в первом приближении можно рассматривать как случайное яркостное поле, которое описывается статистическими методами [5].

Для синтеза фонового шума была применена модель на основе нормального случайного поля. Формирование поля осуществляется с использованием кубической сплайн-интерполяции матрицы со случайными элементами, распределенными по нормальному закону. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение матрицы для шума фонового излучения рассчитываются на основе значения фоновой температуры, а для шума фонового ослабления — исходя из экспоненциального закона Бугера для оптически однородной среды.

Синтезированные изображения фонового излучения и фонового ослабления представлены на рис. 2, а и б соответственно.

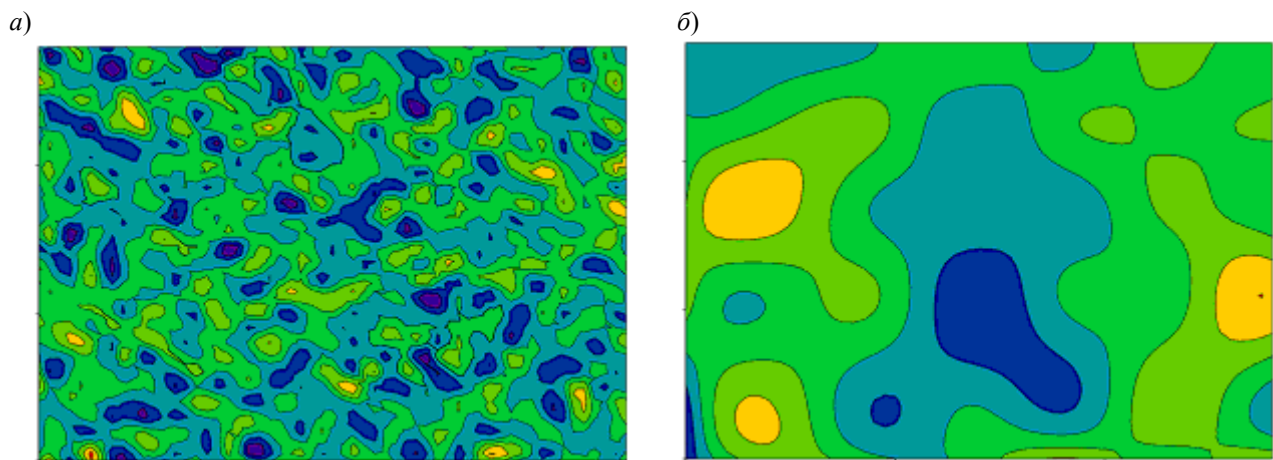


Рис. 2

Шумы приемника имеют различный характер возникновения и определяются как конструкцией приемника, так и процессами формирования сигнала. Результирующий шум приемника может быть синтезирован в виде модели аддитивного белого гауссова шума.

Влияние оптической системы описывается с использованием весовой функции объектива. Для устройства, линзовая оптическая система которого характеризуется малыми (до единиц градусов) углами падения лучей на плоскость входного зрачка, весовая функция объектива может быть аппроксимирована гауссоидой вращения:

$$h(x, y) = \exp\left\{-\frac{(x^2 + y^2)}{2R^2}\right\},$$

где  $R$  — радиус пятна рассеяния.

**Результаты моделирования.** С учетом всех рассмотренных параметров была получена функция синтеза тепловизионного изображения лесного пожара:

$$g(x, y) = \left\{ \left[ f(x(T_{об}), y(T_{об})) M(H, f') + \eta_{фон}(T_{фон}) \right] \eta_{осл}(a_\lambda, l) \right\} h(x, y) + \eta_{пр},$$

где  $f(x(T_{об}), y(T_{об}))$  — функция формирования формы лесного пожара с учетом температуры очага возгорания;  $M(H, f')$  — функция масштабирования изображения, зависящая от высоты и фокусного расстояния объектива;  $\eta_{фон}(T_{фон})$  — функция формирования фона с учетом температуры окружающей среды;  $\eta_{осл}(a_\lambda, l)$  — функция формирования поля ослабления

излучения при прохождении атмосферы с учетом влияния коэффициента пропускания атмосферы  $a_\lambda$  и дистанции прохождения излучения  $l$ ;  $h(x, y)$  — весовая функция оптической системы;  $\eta_{\text{пр}}$  — шумы приемника.

На основе полученной функции в среде математического моделирования MatLab была написана программа синтеза изображения лесного пожара в тепловизионном канале. Результаты моделирования представлены на рис. 3, где  $a$ ,  $b$ ,  $v$  — тепловизионное изображение лесного пожара, полученное с использованием математической модели;  $z$  — реальное изображение.

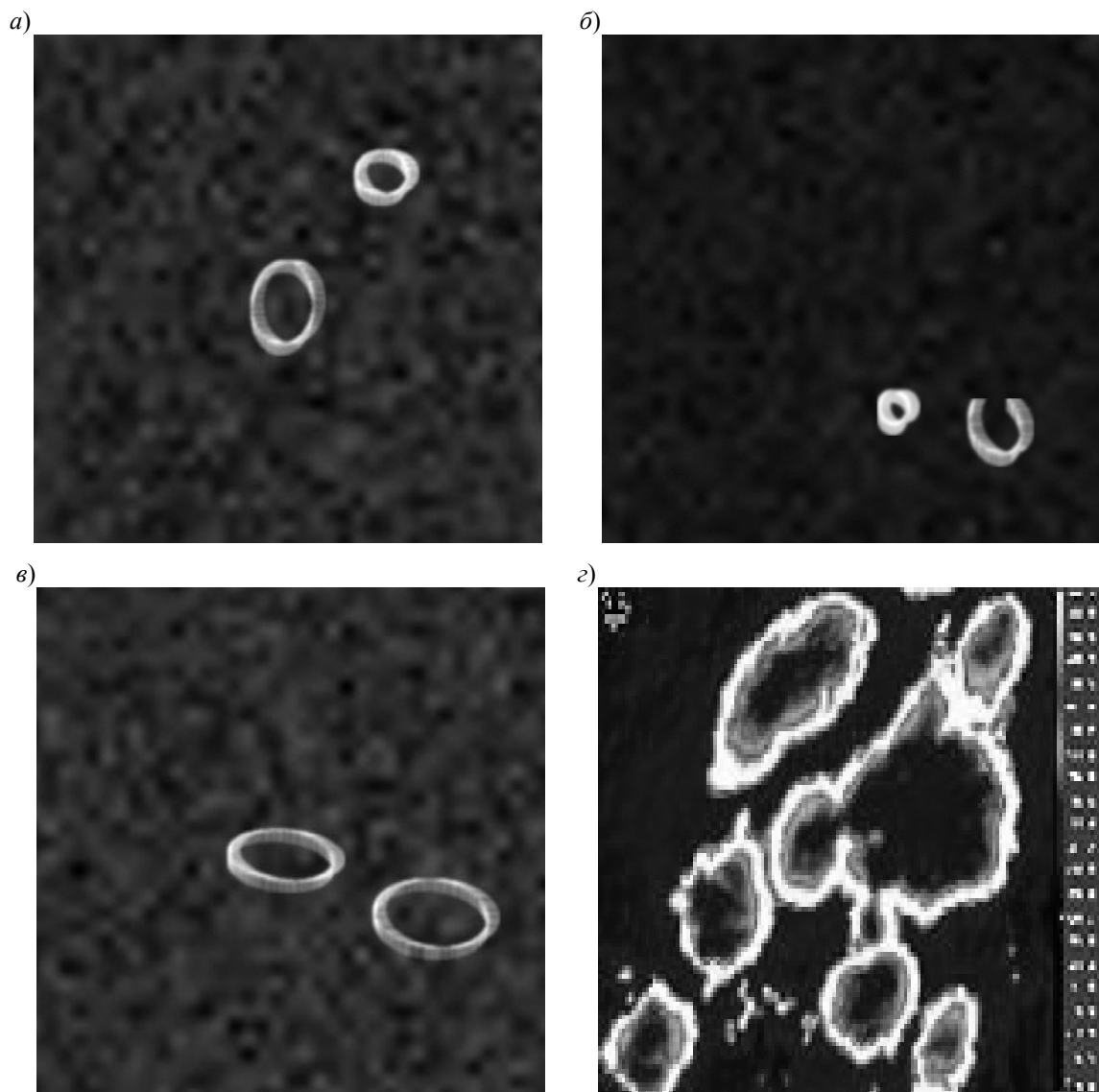


Рис. 3

**Заключение.** На основе разработанной математической модели лесного пожара как источника инфракрасного излучения реализован алгоритм поиска контуров возгораний.

Работа выполнена в рамках создания оптико-электронной системы обнаружения лесных пожаров на базе беспилотного космического аппарата — комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме „Разработка программно-технического комплекса обнаружения и прогнозирования крупномасштабных природных пожаров“, заключенного между Министерством образования и науки Российской Федерации и ЗАО „Транзас“ (Санкт-Петербург) при участии Научно-образовательного центра СПбНИУ ИТМО.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]: <[http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/sx/les2.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sx/les2.htm)>.
2. Васильев А. С., Краснящих А. В., Коротаяев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Ненарокомов О. Н., Широков А. С., Ярышев С. Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 50—55.
3. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. М.: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.
4. Коротаяев В. В., Краснящих А. В. Телевизионные измерительные системы: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.
5. Джабиев А. Н., Ишанин Г. Г., Панков Э. Д. Оптическое излучение естественных объектов и фонов и его имитация: Учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. 199 с.

**Сведения об авторах**

- Александр Сергеевич Васильев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Андрей Владимирович Краснящих** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: csus@mail.ru
- Валерий Викторович Коротаяев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotayev@grv.ifmo.ru
- Олег Юрьевич Лашманов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Дмитрий Юрьевич Лысенко** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; руководитель группы проектов; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Анатолий Сергеевич Широков** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; ведущий специалист; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и  
систем СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
20.09.12 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 519.8

С. А. АСТАФЬЕВ

## РЕШЕНИЕ ИНТЕГРОДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Изложен ход решения интегродифференциального уравнения теплопереноса, используемого как базовое для описания изменения параметров теплового потока в модели распространения лесного пожара.

*Ключевые слова:* моделирование процесса распространения пожара, тепловой поток, интегродифференциальное уравнение теплопереноса, напряжение трения теплового потока.

**Введение.** На активно охраняемой территории лесного фонда России ежегодно регистрируется от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади 0,5—2,5 млн га. Уничтожение бесценных запасов древесины в результате лесных пожаров сопровождается выгоранием большого объема кислорода и выбросом в атмосферу сажи, копоти, двуокиси углерода, а также радиоактивных частиц [1].

Физика распространения лесного пожара состоит в следующем: тепловой поток, создаваемый низовым пожаром, поднимаясь наклонно по направлению ветра, подогревает кроны деревьев на значительном расстоянии впереди фронта огня. При воспламенении хотя бы одной из крон почти мгновенно воспламеняются и другие, и огонь „скачет“ по подогретым кронам, но затем вне сферы действия подогрева затухает. Когда низовой огонь приближается к фронту пожара, процесс подогрева полог повторяется и опять происходит „скачок огня“. Верховые пожары, выделяя большое количество теплоты, вызывают восходящие потоки продуктов горения и нагретого воздуха и образуют конвективные колонки диаметром в несколько сотен метров. Их поступательное движение совпадает с направлением продвижения фронта пожара. Пламя в середине колонки может подниматься на высоту до 100—120 м. Конвективная колонка увеличивает приток воздуха в зону пожара и порождает ветер, который усиливает горение. Таким образом, низовой пожар стимулирует развитие верхового и наоборот [1].

Основными задачами охраны лесов от пожаров являются их предупреждение, обнаружение, ограничение распространения и тушение. Для эффективной борьбы с лесными пожарами необходим прогноз возможного положения кромки пожара и силы горения.

При математическом моделировании процесса распространения лесного пожара можно выделить четыре группы моделей:

- 1) модели прогноза скорости распространения пожара;
- 2) модели прогноза контура и площади пожара;

3) модели прогноза характеристик теплового течения и массопереноса во фронте и в зоне пожара;

4) общие математические модели, в рамках которых могут быть предсказаны все характеристики во фронте и в зоне пожара (в том числе, поля температур, концентрации и скорости распространения газовых и мелкодисперсных компонентов окружающей среды) [2].

Однако большинство разрабатываемых в настоящее время моделей базируются либо на статистических данных о скорости распространения огня в зависимости от погодных условий, либо на рассмотрении лесного пожара с позиций аэротермохимии. Исходя из этого более перспективным в решении задачи моделирования процесса распространения лесного пожара представляется использование одновременно двух подходов.

При первом — *вероятностном* — подходе [3, 4] модель прогноза контура и площади пожара к заданному моменту времени строится на основе определения вероятностей распространения огня через дискретные области (по результатам обработки аэрофотоснимков местности) и среднестатистических скоростей распространения пожара в разных направлениях в зависимости от скорости и направления ветра.

При втором подходе — с использованием *интегродифференциального уравнения теплопереноса* — для расчета параметров теплового потока в зависимости от местоположения относительно фронта пожара используются физические характеристики окружающей среды; кроме того, такой подход позволяет учитывать данные о рельефе местности.

В настоящей статье предложено решение интегродифференциального уравнения теплопереноса для применения его при моделировании процесса распространения лесного пожара.

**Интегродифференциальное уравнение.** Для моделирования за основу было взято интегродифференциальное уравнение, приведенное в работе [5]. Автор данного уравнения (профессор Томского государственного университета А. М. Гришин) предложил его в качестве математической модели стационарных двумерных квазиравновесных тепловых течений, описывающих процесс распространения лесного пожара:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \left( v_w - \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy \right) \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \rho \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\sin \alpha}{Fr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \int_0^y \frac{1}{\rho} \frac{\partial \ln P}{\partial x} dy,$$

где  $u$  — скорость теплового потока;  $v_w$  — безразмерная скорость внешнего потока (вдува);  $\mu=18,27 \cdot 10^{-6}$  Па·с — динамическая вязкость воздуха;  $\rho=1,2$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воздуха;  $Fr$  — критерий Фруда (безразмерная величина) — один из критериев подобия движения жидкостей и газов;  $\alpha$  — угол между касательной к поверхности и горизонтальной плоскостью;  $P$  — давление окружающей среды в зоне пожара.

Система координат  $хоу$ , используемая в уравнении, показана на рис. 1.

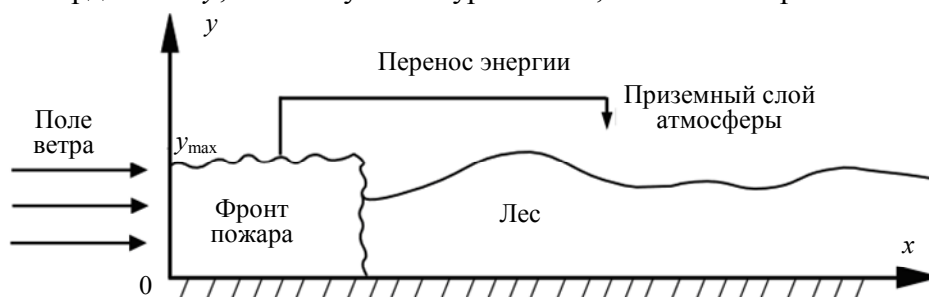


Рис. 1

**Метод решения.** В 80-е годы прошлого века, когда прикладные компьютерные программы для ведения сложных математических расчетов еще не обладали достаточной производительностью и гибкостью и не были широко распространены, автором уравнения было осуществлено его аналитическое решение с использованием различных методов, допущений

и замен переменных (например, вывод уравнений методом Прандтля, приближение Буссинеска, переход к переменным Дородницына — Хоурта, решение уравнений методом Швеца). Как следствие, аналитическое решение является достаточно громоздким, а большое количество преобразований повышает вероятность ошибки; кроме того, к недостаткам такого способа решения можно отнести большие затраты времени на пересчет результатов при изменении входных данных и отсутствие быстрой визуализации результатов вычислений.

На современном этапе степень развития вычислительных систем и приложений позволяет произвести *численное решение* сложного интегродифференциального уравнения с использованием среды математического моделирования MatLab. Данное программное средство содержит большой набор встроенных функций, предназначенных для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Так, функции ODE реализуют одношаговый явный метод Рунге — Кутты 2-го, 3-го порядка (ode23) и 4-го, 5-го порядков (ode45); неявный метод Рунге — Кутты, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка (ode23tb); адаптивный многошаговый метод Адамса — Башворта — Мулттона переменного порядка (ode113); одношаговый метод, использующий модифицированную формулу Розенброка 2-го порядка (ode23s), и метод трапеций с интерполяцией (ode23t). Функция pdepe служит для решения систем параболических и эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных по двум переменным при заданных начальных и граничных условиях. Данная функция преобразует уравнения в частных производных в набор обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием дискретизации 2-го порядка точности на основе фиксированного набора заданных пользователем узлов. Интегрирование осуществляется с помощью функции ode15s, которая реализует адаптивный многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования.

Таким образом, главной задачей при решении исходного уравнения в среде MatLab является его запись в форме, адекватной предусмотренной в программном пакете.

**Исходные данные, начальные и граничные условия.** В качестве параметра  $v_w$  и координат  $x, y$  в процессе решения уравнения использовались безразмерные величины (исходя из предположения, что  $v_{w\max}=30$  м/с — максимальная скорость внешнего потока;  $y_{\max}=30$  м — характерная высота пограничного теплового слоя;  $x_{\max}=120$  м — характерное расстояние теплового воздействия фронта пожара).

В качестве *исходных данных* условно было задано давление среды в зависимости от координат, выраженное формулой

$$P(x, y) = 0,2 + \exp\{-0,48(x-0,5)^2 - 0,16(y-0,8)^2\}.$$

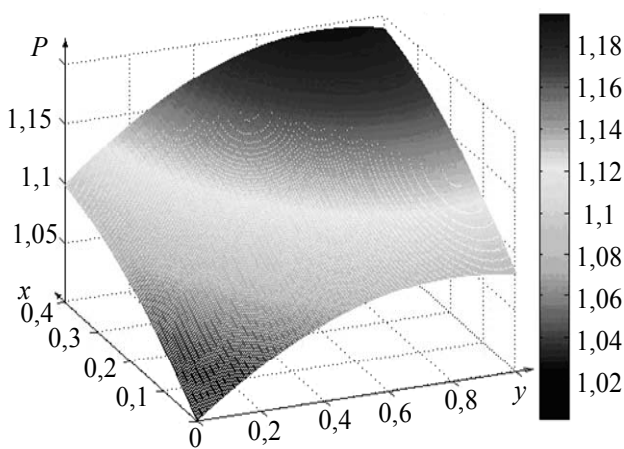


Рис. 2

Такой вид зависимости был выбран исходя из предположения, что в зоне прогрева давление среды экспоненциально растет с увеличением высоты ( $y$ ) над поверхностью и расстояния ( $x$ ) от задней границы фронта пожара, и после достижения максимального значения давление вновь снижается до нормального. Заданное изменение давления в зависимости от координат графически представлено на рис. 2.

В качестве *начального условия* (при  $x=0$ ) было принято экспоненциальное увеличение скорости теплового потока в зависимости от высоты:

$$u_0(y) = 1,0 - 1,0 \exp(-2,5y).$$

В качестве *нижнего граничного условия* (при  $y=0$ ), согласно данным из работы [5], было принято нулевое значение скорости теплового потока:  $u_n = 0$ , а в качестве *верхнего граничного условия* (при  $y=y_{\max}$ ) — экспоненциальное уменьшение скорости теплового потока с увеличением расстояния от фронта пожара:

$$u_b(x) = 1,0 \exp(-17x).$$

Файл-функция, задающая граничные условия, содержит два параметра, определяющие отсутствие „теплопроводности“ на нижней границе пограничного слоя и свободное распространение теплового потока на его верхней границе.

**Ход решения.** На первом этапе решения исходное интегродифференциальное уравнение теплопереноса было упрощено путем исключения из него интегрального слагаемого

$$\int_0^{y_{\max}} \frac{\partial u}{\partial x} dy.$$

Решение параболического дифференциального уравнения в частных производных производилось с использованием функции `pdepe`, имеющей следующий вид:

$$\text{sol} = \text{pdepe}(m, @\text{tepfun}, @\text{teploinit}, @\text{teplound}, y, x),$$

где

`u=sol(:, :, 1)` — искомая скорость теплового потока;

`m` — параметр, соответствующий типу дифференциального уравнения;

`tepfun` — функция, определяющая компоненты решаемого дифференциального уравнения;

`teploinit` — функция, определяющая начальные условия;

`teplound` — функция, определяющая граничные условия.

Для решения дифференциального уравнения в пакете MatLab оно должно иметь следующую форму записи:

$$c\left(y, x, u, \frac{\partial u}{\partial y}\right) \frac{\partial u}{\partial x} = y^{-m} \frac{\partial}{\partial y} \left( y^m f\left(y, x, u, \frac{\partial u}{\partial y}\right) \right) + s\left(y, x, u, \frac{\partial u}{\partial y}\right).$$

Для параболического дифференциального уравнения  $m=0$ .

Таким образом, исходное уравнение должно быть записано в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} c &= u; \\ f &= \left( -v_w + \int_0^y \frac{\partial u}{\partial x} dy \right) u + \mu \rho \frac{\partial u}{\partial y}, \\ s &= -\frac{\sin \alpha}{Fr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \int_0^y \frac{1}{\rho} \frac{\partial \ln P}{\partial x} dy. \end{aligned} \right\}$$

В первую очередь были рассчитаны частная производная давления по координате  $x$  —  $\frac{\partial P}{\partial x}$ , частная производная давления по координате  $y$  —  $\frac{\partial P}{\partial y}$  и частная производная логарифма да-

вления по координате  $x$  —  $\frac{\partial \ln P}{\partial x}$ . График значений интеграла  $A = \int_0^{y_{\max}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \ln P}{\partial x} dy$  представлен

на рис. 3.

В результате решения дифференциального уравнения теплопереноса были рассчитаны значения скорости теплового потока в зависимости от координат  $u(x, y)$ , частная производная

скорости теплового потока по координате  $x$  —  $\frac{\partial u}{\partial x}$  и частная производная скорости теплового потока по координате  $y$  —  $\frac{\partial u}{\partial y}$  (рис. 4, а—в).

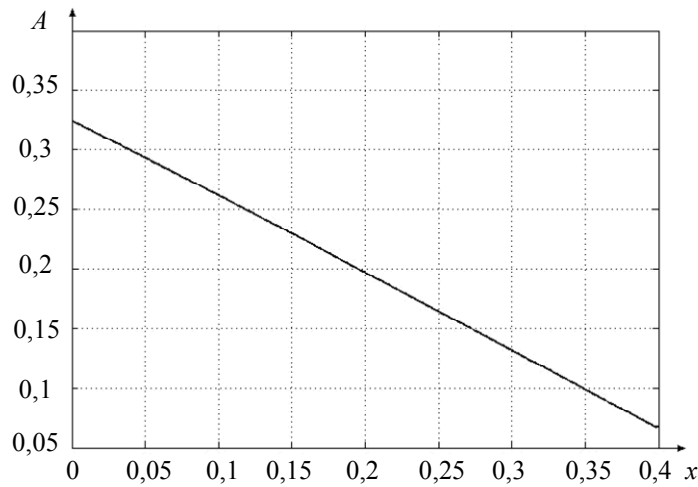


Рис. 3

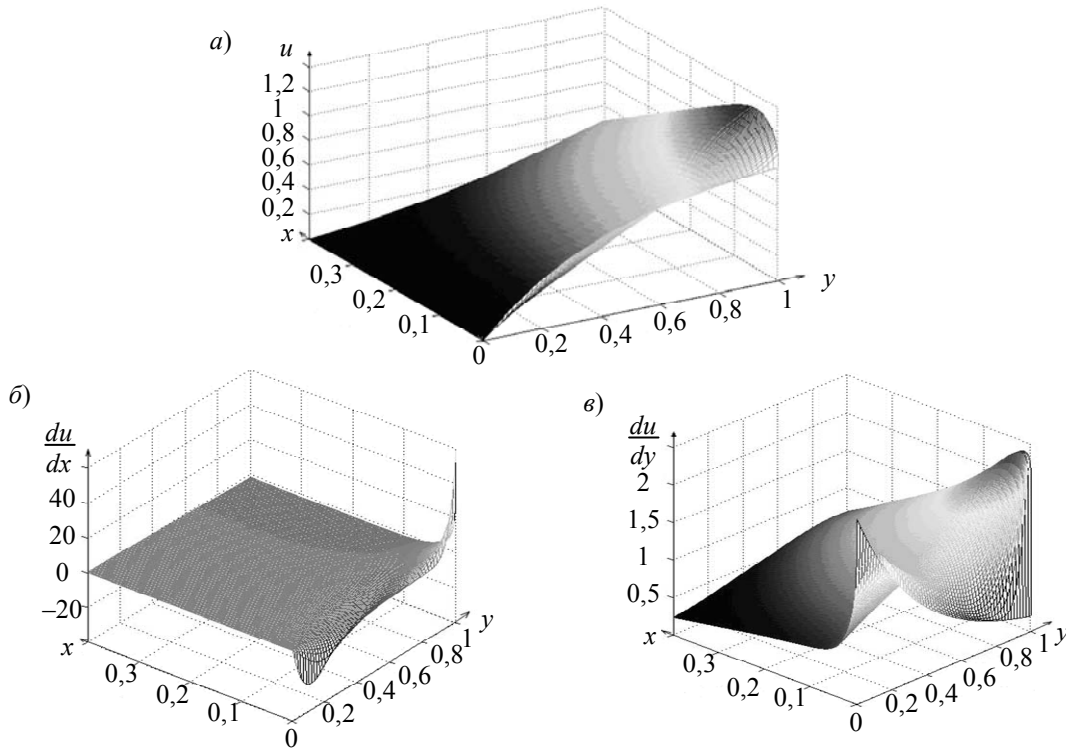


Рис. 4

Затем по формулам  $\tau_w = \mu \rho \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$  и  $\tau_e = \mu \rho \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=y_{\max}}$  были вычислены напряжение тре-

ния теплового потока на обтекаемой поверхности и напряжение трения теплового потока на внешней границе пограничного слоя (рис. 5).

Физический смысл параметра  $\tau$  заключается в том, что при  $\tau_w = 0$  происходит „отрыв“ теплового потока от поверхности, что означает смену типа теплового течения: вместо течения, при котором линии потока вдали от фронта пожара почти параллельны обтекаемой поверхности, образуется конвективная колонка.

Вид зависимости  $\tau_w(x)$  вполне согласуется с графиком, представленным в работе [5]: с увеличением  $x$  значение  $\tau_w$  уменьшается, причем его резкое уменьшение в пределах фронта пожара далее переходит в плавное и стремится к нулю.

Вместе с тем следует заметить, что в операциях интегрирования и дифференцирования (с использованием функций `trapz` и `diff`) результат вычислений зависит от шага интегрирования (дифференцирования), и поэтому необходимо использовать масштабные коэффициенты.

Одна из особенностей решения состоит в том, что вычисления производились методом последовательных приближений. Так, в первом цикле вычислений рассчитывалось значение

интеграла  $B = \int_0^{y_{\max}} \frac{\partial u}{\partial x} dy$ , которое затем использовалось в последующей итерации. В результате

после нескольких расчетных циклов значение интеграла, вычисленное по окончании программы, сходится к значению, заданному на входе. График значений интеграла  $B$  представлен на рис. 6.

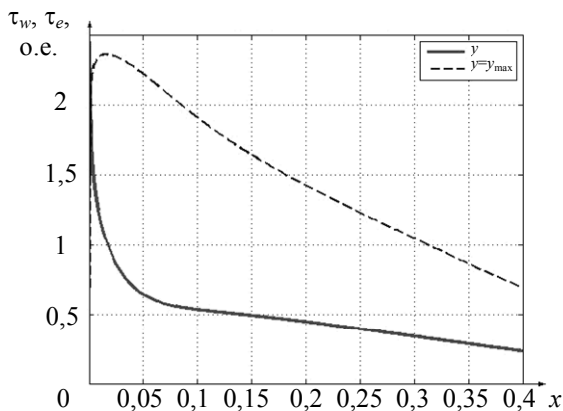


Рис. 5

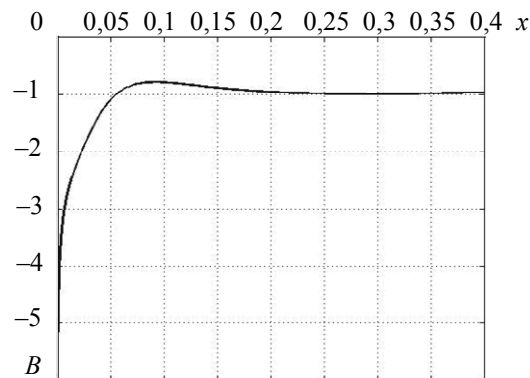


Рис. 6

**Заключение.** Представленное решение интегродифференциального уравнения теплопереноса осуществлено при условно принятых начальных и граничных условиях, подобранных таким образом, что обеспечивается устойчивое решение уравнения. Ход вычислений отдельных параметров имеет графическую визуализацию. Впоследствии необходимо произвести согласование параметров модели с реальными условиями распространения огня путем проведения натуральных экспериментов и исследований параметров реальных пожаров.

Таким образом, использование уравнения теплопереноса в основе модели распространения лесного пожара позволяет в перспективе обеспечить возможность прогнозирования эволюции пожара путем учета конкретных физических параметров окружающей среды. Среди параметров модели наиболее значимым, с точки зрения предсказания развития лесного пожара во времени, представляется напряжение трения теплового потока. Дальнейшие исследования целесообразно направить на выявление характерных изменений данного параметра в зависимости от внешних условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
2. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2008. № 2(3).
3. Астафьев С. А., Лысенко Д. Ю., Широков А. С. Моделирование процесса распространения лесного пожара с применением теории перколяции // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 6. С. 70—74.

4. Астафьев С. А. Применение вероятностного подхода в задаче моделирования распространения лесного пожара // IX Всерос. конф. молодых ученых; V сессия науч. школы „Проблемы механики и точности в приборостроении“: Сб. докл. СПб: НИУ ИТМО, 2012. Вып. 1. 152 с.
5. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. 277 с.

**Сведения об авторе**

**Сергей Алексеевич Астафьев**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: Rokkolo287@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
14.12.12 г.

УДК 520.224.2. 224.4

Ю. В. БАЁВА, Е. В. ЛАПОВОК, С. И. ХАНКОВ

**МЕТОД ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ДИАПАЗОНА  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА,  
ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО КРУГОВОЙ ОРБИТЕ С ЗАХОДОМ В ТЕНЬ ЗЕМЛИ**

Предложена методика выбора определяющих параметров для обеспечения заданной температуры космического аппарата. Методика основана на расчете стационарного теплового режима на солнечном и теневом участках траектории. Суть методики заключается в том, что на теневом участке траектории исключение мощности солнечной подсветки компенсируется включением внутренних источников тепловыделений.

**Ключевые слова:** космический аппарат, степень черноты, коэффициент поглощения солнечного излучения, коэффициент облученности, тепловой режим, теплообмен излучением.

При движении космического аппарата (КА, далее — объект) по круговой орбите вокруг Земли с периодическим заходом в тень и выходом на освещенный Солнцем участок траектории его средняя температура может колебаться в больших пределах. Во многих случаях при наружном размещении на борту космического аппарата оптических систем (ОС) требуется обеспечить минимальные колебания температур их элементов относительно некоторого среднего значения  $T_0$ .

В настоящей статье представлена аналитическая методика расчета параметров КА (с выявлением наиболее значимых), обеспечивающих минимальное колебание его температуры. Суть методики заключается в расчете температур КА на теневом и солнечном участках траектории в стационарном тепловом режиме при условии, что на теневом участке роль Солнца как источника тепловыделений выполняет собственный поверхностный источник тепловыделений объекта.

Поставленная задача является типовой для телескопов космического базирования, имеющих преимущественно цилиндрическую форму поверхности. Для получения простого решения целесообразно принять следующие обоснованные ограничения и допущения:

— расчет проводится для экваториальной круговой орбиты, которая характеризуется максимальным изменением температур при двух вариантах положения объекта на линии центр Солнца — центр Земли: между Солнцем и Землей и в тени Земли;

— рассматриваются объекты сферической и цилиндрической конфигурации, что соответствует типовым конфигурациям КА и ОС;



— Земля рассматривается как изотермический шар с однородными по всей поверхности излучательными и отражательными характеристиками;

— рассматривается среднеповерхностная температура объекта, т.е. он принимается изотермическим.

В рамках принятых допущений и ограничений средняя температура объекта в стационарном тепловом режиме описывается соотношением [1]

$$T_0 = 4 \sqrt{\frac{P_\Sigma}{\varepsilon(1-\varphi)S\sigma}}; \quad P_\Sigma = P_1 + P_2 + P_3 + P_4; \quad (1)$$

$$P_1 = \varepsilon S \varphi Q; \quad P_2 = \alpha_s A E S \varphi_k; \quad P_3 = \alpha_s E S_M,$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности объекта;  $\varphi$  — интегральный коэффициент облученности объекта Землей;  $S$  — площадь поверхности объекта;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана — Больцмана;  $P_\Sigma$  — суммарный тепловой поток, поглощаемый наружной поверхностью объекта;  $P_1, P_2, P_3$  — поглощенные наружной поверхностью объекта потоки соответственно: собственного теплового излучения Земли, солнечного излучения, отраженного Землей, прямого солнечного излучения;  $P_4$  — мощность внутренних тепловыделений в объекте, включаемая для компенсации потери солнечного излучения при заходе в тень Земли;  $Q = 235$  Вт/м<sup>2</sup> — поверхностная плотность мощности, излучаемая Землей;  $\alpha_s$  — коэффициент поглощения солнечного излучения покрытием внешней поверхности корпуса КА;  $A = 0,3$  — альbedo Бонда [2];  $E = 1366$  Вт/м<sup>2</sup> — солнечная постоянная;  $\varphi_k$  — эффективный комбинированный коэффициент облученности внешней поверхности объекта подсветкой отраженного Землей солнечного излучения, зависящий от угла на Солнце, в тени Земли автоматически выполняется условие  $\varphi_k = 0$ ;  $S_M$  — площадь миделя, т.е. проекции объекта на плоскость, перпендикулярную направлению на Солнце.

При подстановке всех компонентов тепловых потоков в формулу (1) после преобразований получим

$$T_0 = \left\{ \frac{Q}{\sigma} \frac{\varphi}{1-\varphi} \left[ 1 + \frac{n_s}{\varphi} G (A \varphi_k + \Phi) + \frac{N}{\varepsilon \varphi} \right] \right\}^{0,25}; \quad (2)$$

$$n_s = \frac{\alpha_s}{\varepsilon}; \quad G = \frac{E}{Q}; \quad \Phi = \frac{S_M}{S}; \quad N = \frac{Q_4}{Q}; \quad Q_4 = \frac{P_4}{S}.$$

Для сферического объекта коэффициенты облученности определяются по следующим формулам [1]:

$$\varphi = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - \varphi_0}); \quad \varphi_0 = \left( \frac{R}{R+h} \right)^2; \quad \varphi_k = (1 - \delta) \varphi \cos \gamma_s; \quad \delta = 0,25 \sqrt{\frac{H}{30}}; \quad H = h \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  — коэффициент облученности Землей горизонтально ориентированной площадки в плоскости местного горизонта;  $R = 6371$  км — радиус Земли;  $h$  — высота орбиты;  $\gamma_s$  — угол между направлением на Солнце и направлением на объект с вершиной в центре Земли, в рамках принятых допущений  $\gamma_s = 0$ .

Так как объект попеременно либо нагревается Солнцем (тогда  $G = 5,72$ , но  $N = 0$ ), либо в тени Земли подогревается внутренним источником (тогда  $G = 0$  и  $N \neq 0$ ), то условие постоянства температуры задается равенством второго слагаемого третьему в квадратных скобках в уравнении (2). Отсюда следует

$$N = \alpha_s G (A \varphi_k + \Phi). \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4)  $G = 5,72$  и  $A = 0,3$ , получим

$$N = 5,72 \alpha_s (0,3 \varphi_k + \Phi). \quad (5)$$

Для сферического и цилиндрического объектов величина  $\Phi$  равна соответственно

$$\Phi_{\text{сф}} = 0,25, \quad \Phi_{\text{ц}} = [\pi(1+m)]^{-1}; \quad m = r/L, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус цилиндра,  $L$  — его длина.

Тогда для сферического объекта формула (5) примет вид

$$N = \alpha_s (1,716\varphi_k + 1,43), \quad (7)$$

а для цилиндрического —

$$N = \alpha_s [1,716\varphi_k + 1,82(1+m)^{-1}]. \quad (8)$$

Последние слагаемые в скобках соотношений (7) и (8) равны друг другу при  $m = 0,27$ , т.е. при  $L/r = 3,7$ , или при отношении длины цилиндра к его диаметру  $d$ , равном  $L/d = 1,85$ . Таким образом, при  $m \approx 0,25$  второе слагаемое в уравнении (8), равное 1,456, близко ко второму слагаемому в формуле (7). Поэтому при  $L/d \approx 2$  цилиндр практически эквивалентен сфере и для него также можно использовать формулу (7). При  $h = 600$  км вычисленное по формуле (3) значение коэффициента  $\varphi_k$  для сферы равно 0,286. Подставив это значение в формулу (7), получим

$$N = 1,72\alpha_s. \quad (9)$$

Для случая нахождения объекта в тени Земли ( $G = 0$ ) согласно уравнению (2) получим выражение

$$T_0 = \left[ \frac{Q}{\sigma} \frac{\varphi}{1-\varphi} \left( 1 + \frac{N}{\varepsilon\varphi} \right) \right]^{0,25}, \quad (10)$$

подставив в которое формулу (9), имеем

$$T_0 = \left[ 42,15 \frac{\varphi}{1-\varphi} \left( 1 + 1,72 \frac{n_s}{\varphi} \right) \right]^{0,25} = 254,8 \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} + 1,72 \frac{n_s}{1-\varphi} \right)^{0,25} \quad (11)$$

Задавая средний уровень рабочей температуры  $T_0 = 290$  К, получим уравнение

$$\frac{\varphi}{1-\varphi} + 1,72 \frac{n_s}{1-\varphi} = \left( \frac{290}{254,8} \right)^4 = 1,678, \quad (12)$$

исходя из которого можно определить требуемую величину  $n_s$ , описывающую связь между коэффициентом поглощения солнечного излучения и степенью черноты, в зависимости от высоты орбиты, определяемой коэффициентом  $\varphi$ . На высоте  $h = 600$  км  $\varphi = 0,297$ , тогда

$$0,297 + 1,72 n_s = 1,1796; \quad n_s = 0,513; \quad \alpha_s = 0,513\varepsilon. \quad (13)$$

Подставив значения (13) в формулу (9), получим

$$N = 0,882\varepsilon \text{ или } Q_4 = 211\varepsilon. \quad (14)$$

Предположим, что на борту КА имеется запас тепловой мощности  $Q_4 = 100$  Вт/м<sup>2</sup>, тогда

$$N = 100/239 = 0,4184. \quad (15)$$

Согласно уравнениям (14) и (15) требуемая степень черноты поверхности объекта

$$\varepsilon = 0,4184/0,882 = 0,474, \quad (16)$$

а исходя из уравнений (13) и (16) можно определить требование к величине  $\alpha_s$ :

$$\alpha_s = 0,474 \cdot 0,513 = 0,243.$$

Предположим, что можно подобрать следующие параметры покрытия поверхности КА:

1)  $\varepsilon = 0,5$  и  $\alpha_s = 0,22$ , тогда согласно (11)  $T_0 = 281,9$  К;

2) в случае  $\varepsilon = 0,5$  и  $\alpha_s = 0,3$  получим  $T_0 = 298,8$  К; если необходимо поддерживать температуру объекта с точностью  $\pm 10$  К, то один из вариантов сочетания параметров, обеспечивающих заданный тепловой режим, описывается следующими условиями:  $Q_4 = 100$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,5$ ,  $0,22 \leq \alpha_s \leq 0,3$ ; если принять  $\varepsilon = 1$ , то из уравнений (13) и (14) следует:  $\alpha_s = 0,513$ ,  $Q_4 = 211$  Вт/м<sup>2</sup>, при таком сочетании параметров  $T_0 = 290$  К.

Рассмотренные варианты обеспечения теплового режима объекта неравноценны, поскольку при втором варианте требуется вдвое больше мощности внутренних источников тепловыделений, но обеспечивается практически точное поддержание температурного уровня.

Результаты расчетов при  $\varepsilon = 1$  для сферического объекта обобщены на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлена зависимость  $T_0(n_s)$  для освещенного участка траектории ( $N=0$ ) при разных значениях  $h$ , а на рис. 2 — аналогичная зависимость  $T_0(N)$ , но в тени Земли ( $G=0$ ).

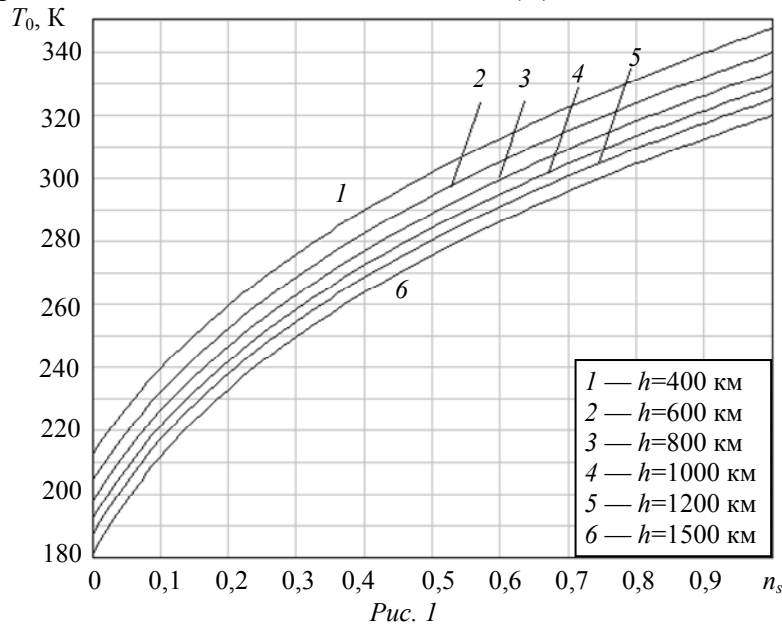


Рис. 1

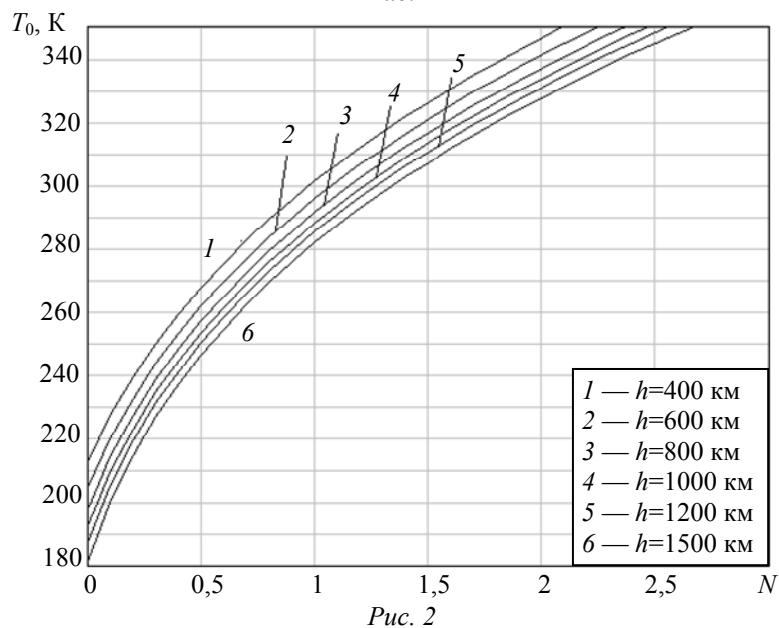


Рис. 2

Анализ представленных графиков позволяет, задаваясь рабочей температурой объекта, вычислить диапазон изменения его определяющих параметров для компенсации потери мощности солнечного излучения на теневом участке траектории. Основными определяющими параметрами являются: мощность  $Q_4$  внутренних источников тепловыделений, степень черноты  $\varepsilon$  и коэффициент  $\alpha_s$  поглощения солнечного излучения поверхностью объекта. Как видно из графиков, изменение высоты орбиты в диапазоне от 400 до 1500 км приводит к изменению требуемых при  $T_0 = 290$  К значений  $n_s$  (от 0,4 до 0,64) и  $N$  (от 0,7 до 1,2).

Уменьшение мощности внутренних тепловыделений может быть достигнуто за счет уменьшения степени черноты, но это потребует соответствующего уменьшения коэффициента поглощения солнечного излучения.

При расчете цилиндрического объекта необходимо использовать эффективный коэффициент облученности [1] с учетом облученности цилиндрической и двух торцевых поверхностей:

$$\varphi_{\text{ц}} = \frac{\varphi_b + 2n\varphi_{\text{инт}}}{1 + 2n}; \quad n = \frac{L}{d},$$

где  $\varphi_b$  — коэффициент облученности торцевых поверхностей цилиндра, ось которого лежит в плоскости местного горизонта;  $\varphi_{\text{инт}}$  — интегральный коэффициент облученности цилиндрической поверхности.

Коэффициент  $\varphi_b$  определяется по известной формуле [3], при этом  $\varphi_b$  может быть выражен через коэффициент  $\varphi_0$  [1]:

$$\varphi_b = \frac{1}{\pi} \left( \arcsin \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\varphi_0} \cdot \sqrt{1 - \varphi_0} \right).$$

Коэффициент  $\varphi_{\text{инт}}$  определяется интегрированием локального коэффициента облученности  $\varphi(\psi)$  по угловой координате  $\psi$ . Учитывая громоздкий вид выражения для коэффициента  $\varphi(\psi)$  [1, 3], целесообразно найти аппроксимационные зависимости  $\varphi_{\text{инт}}(h)$ . Такие зависимости были получены в виде полиномов.

Для  $100 \leq h \leq 40\,000$  км получены аппроксимации полиномами вида

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{инт}} &= a_0 + a_1 H, \quad H = h \cdot 10^{-3}; \\ \varphi_{\text{инт}} &= a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4, \quad z = h \cdot 10^{-4}; \\ \varphi_{\text{инт}} &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4, \quad x = h \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Коэффициенты аппроксимации для разных значений относительной высоты орбиты  $h_{\text{отн}}$  представлены в таблице.

$h_{\text{отн}}$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	Максимальная погрешность		
						$\delta, \%$	при $H$	
$H$	0,1—1	0,36	−0,1	—	—	—	0,8	1
$z$	1—5	0,3628	−1,244	2,715	−3,51	1,965	−0,25	5
	5—10	0,2352	−0,33826	0,105515	0,12424	−0,077466	0,2	10
	10—15	0,1395	−0,1244	0,03356	0	0	+0,45; −0,35	10; 13,5; 15
	15—20	0,09745	−0,06577	0,01321	0	0	−0,4	20
$x$	20—40	0,056955	−0,22692	−0,06797	1,6253	−2,0859	1,5	40
	35—40	0,035634	−0,12333	0,1233	0	0	−0,2	40

Использование полученных аппроксимационных зависимостей позволяет проводить расчеты для цилиндрического объекта аналогично проведению расчетов для сферического.

Полученные аналитические формулы и данные по коэффициентам облученности обеспечивают возможность быстрых оценок требований к определяющим параметрам, позволяющим поддерживать заданный рабочий диапазон температур объектов сферической и цилиндрической формы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. СПб: НТЦ им. Л. Т. Тучкова, 2006. 186 с.
2. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2009. Vol. 90, N 3. P. 311—323/
3. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.

*Сведения об авторах*

- Юлия Валерьевна Байва** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Евгений Владимирович Лаповок** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики  
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
29.12.12 г.

Ю. А. КАРАКУЛЕВ

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ МАШИН

Представлен статистический анализ результатов, получаемых при контроле соосности отверстий в корпусных деталях машин разными методами. Показано, что точность результатов измерений отклонений от соосности зависит от задания базы измерений — общей оси отверстий.

*Ключевые слова:* ось отверстия, измерительная база, статистический анализ.

**Введение.** Одним из важных параметров качества корпусных деталей машин является соосность выполненных в них отверстий, поскольку этот параметр влияет на точность сборки сопряжений и пространственное положение деталей и узлов в корпусе. Наличие недопустимых отклонений от соосности затрудняет сборку и повышает износ деталей.

В соответствии с ГОСТ 24642-81 отклонение от соосности отверстий — есть расстояние между осью проверяемого отверстия и общей осью. Эффективность контроля данного параметра зависит от положения общей (базовой) оси. В практических измерениях общую ось определяют двумя методами: 1) как прямую, которая проходит через центры крайних отверстий; 2) как ось воображаемого цилиндра, в который вписаны оси всех измеренных отверстий.

Для оценки указанных методов была выбрана характерная корпусная деталь машин — блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания. В настоящей статье рассмотрены результаты теоретических исследований и натуральных измерений отклонения от соосности отверстий под коренные подшипники блока цилиндров (далее — отверстия).

**Описание принципа измерений и анализ полученных результатов.** В ходе экспериментов измерялись отверстия блоков цилиндров двигателей Ярославского моторного завода — по пять отверстий диаметром 116 мм. Измерения проводились визирным методом с помощью оптических средств, достаточно подробно описанных в работе [1]. Количество подлежащих измерению блоков цилиндров определялось исходя из требуемой точности  $\varepsilon = 0,01$  мм и надежности (доверительной вероятности  $\alpha = 0,99$ ) статистических оценок характеристик распределения исследуемых величин. Согласно расчету необходимый размер выборки составил 62 блока цилиндров. Было измерено 70 блоков цилиндров. После получения 350 значений проекций осей отверстий на две взаимно-перпендикулярные плоскости определялось отклонение от соосности относительно разных баз измерений.

*Первый метод.* В качестве общей оси отверстий принимается прямая  $a$  (рис. 1), которая проводится через центры крайних 1-го и 5-го отверстий. Использование этой базы упрощает технологию измерений и обработку результатов. Отклонение от соосности для одной проекции (например,  $y$ ) определяется выражением

$$\Delta = y_1 + (y_5 - y_1)l_i/l_5 - y_i, \quad (1)$$

где  $y_1, y_5, y_i$  — отсчеты для 1-го, 5-го (последнего) и  $i$ -го (проверяемого) отверстия;  $l_5, l_i$  — расстояние соответственно между крайними 1-м и 5-м отверстиями, между 1-м и  $i$ -м отверстиями.

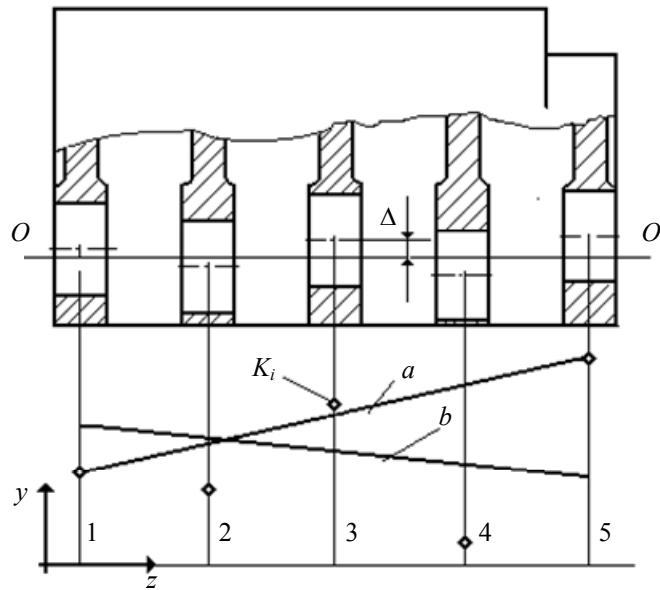


Рис. 1

В данном случае наблюдается смещение и наклон общей оси относительно линии визирования  $OO'$ , от которой производится отсчет положения осей отверстий. Смещение прямой  $a$  не влияет на измерение отклонения от соосности, поскольку эта погрешность компенсируется при определении величины отклонения через разность одноименных координат. Наклон прямой  $a$  вызывает методическую погрешность  $\delta$  определения отклонения от соосности, при этом погрешность увеличивается пропорционально углу наклона  $\beta$ , образованному общей осью и линией визирования  $OO'$ :

$$\delta = y_i (1 - \cos\beta). \tag{2}$$

Расчет по формуле (2) с учетом допустимого значения отклонения от соосности отверстий  $T = 0,025$  мм показал, что относительная величина погрешности составляет 0,023 %, т.е. практически равна нулю, однако в действительности она значительно больше. Согласно экспериментальным данным наибольшая разность отсчетов между первым и последним отверстием составляет 0,48 мм, а в среднем — 0,16 мм, при этом методическая погрешность соответственно равна 0,44 и 0,15 %.

Результаты экспериментального определения отклонений от соосности отверстий с выполнением расчетов по формуле (1) показаны на рис. 2. Как видно из графика, распределение плотности вероятности ( $P$ ) измеренных значений отклонения от соосности (кривая  $a$ ) подчиняется закону распределения Максвелла (экспоненте):

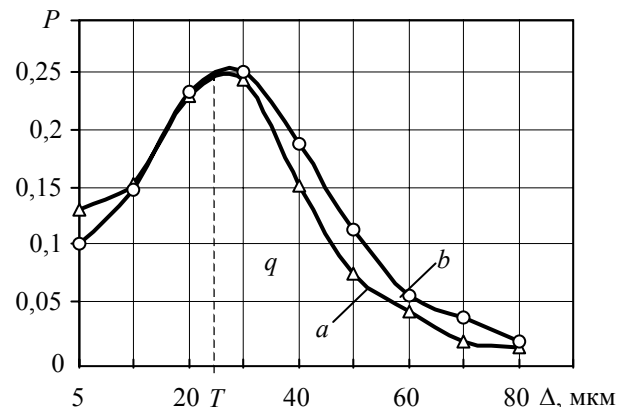


Рис. 2

$$\varphi(\Delta) = \frac{\Delta}{2\sigma_1^2} \exp\left\{-\Delta^2 / (2\sigma_1^2)\right\},$$

где  $\sigma_1 = 27,3$  — среднее квадратическое отклонение (СКО) измеренных значений  $\Delta$ .

Это также подтверждается аналитически двумя способами: 1) путем вычисления вероятности критерия согласия  $Q(\chi^2) = 0,14$ , что больше принятого уровня значимости, равного 0,05; 2) путем вычисления отношения среднего квадратического отклонения и математического ожидания:  $\sigma_1/M=27,3/51,9=0,53$ .

Для определения значимости найденных статистических характеристик закона распределения (среднего квадратического отклонения  $S$ , математического ожидания  $\bar{A}$ , коэффициента вариации  $V$ ) рассчитаны их погрешности:  $\sigma_S = 1,4$  мкм,  $\sigma_{\bar{A}} = 4,0$  мкм,  $\sigma_V = 4,5$  %, которые подтверждают достаточную точность параметров распределения.

Полученные данные позволяют прогнозировать точность результатов измерения рассматриваемого параметра для партии блоков цилиндров, поступающих на сборку. Точность партии блоков определялась по вероятной доле брака  $q$ , для чего были вычислены коэффициенты точности  $R$  и смещения  $L$  ( $R=T/6\sigma_1$ ;  $L=(\bar{A}-A_0)/T$ , где  $A_0$  — координата середины поля допуска). Интерполяцией полученных значений  $R$  и  $L$  по таблице значений интегрального закона нормального распределения [2] было установлено, что  $q = 0,61$ . Это означает, что почти две трети блоков цилиндров явно не отвечают техническим условиям.

*Второй метод* обработки результатов измерений отклонения от соосности отверстий основан на использовании выравнивающей прямой  $b$  (см. рис. 1) в качестве базы измерений. Чтобы найти отклонение от соосности  $i$ -го отверстия относительно общей оси, необходимо вычислить расстояние от точки  $K_i$ , принадлежащей оси  $i$ -го отверстия, до прямой  $b$ :

$$\Delta = \sqrt{(x_b - x_i + mt)^2 + (y_b - y_i + nt)^2 + (pt - z_i)^2}, \quad (3)$$

где  $x_b, y_b, x_i, y_i, z_i$  — координаты некоторой точки, принадлежащей прямой  $b$ ;  $m, n, p$  — координаты направляющего вектора  $E$  этой прямой;  $t$  — параметр, учитывающий относительный наклон оси.

Формула (3) позволяет получить абсолютное значение отклонения от соосности отверстий. В соответствии с этой формулой была проведена обработка данных измерения значения  $\Delta$ . Результаты обработки приведены на рис. 2, кривая  $b$ . Характер кривой и рассчитанные статистические параметры показывают, что распределение плотности вероятности значений  $\Delta$ , так же как и в первом случае, подчиняется закону Максвелла. При этом СКО  $\sigma_2 = 16,0$  мкм. Аналогично первому методу была определена вероятная доля брака  $q$ , равная в данном случае 0,53. Это означает, что для половины партии блоков цилиндров значения отклонения от соосности превышают допустимые.

Сравнительный анализ результатов измерений позволил установить, что доля дефектных по параметру „соосность отверстий“ блоков цилиндров, определенная с использованием первого метода, завышена на 8,0 % относительно вычисленной по второму методу. Это означает, что для типового ремонтного производства двигателей внутреннего сгорания (2,5 тыс. ремонтов в год) правильно организованный контроль позволяет сэкономить затраты на восстановление соосности у 200 блоков цилиндров.

**Заключение.** Использование общей оси как прямой, проходящей через центры крайних отверстий, в качестве базы для контроля соосности отверстий, несмотря на несложность изготовления измерительных средств (скалки, фальшвалы с оправками) и относительную простоту вычислительных операций, приводит к методической погрешности, которая искажает результаты измерений (более 0,4 % в проведенном эксперименте). При этом методе контроля количество дефектных по данному параметру корпусных деталей оказывается завышенным.

Определение отклонения от соосности относительно общей оси — прямой, аппроксимирующей данные измерений всех контролируемых отверстий, — не сопровождается методической погрешностью и дает объективную оценку состояния корпусных деталей по данному параметру. Возможность применения такого метода контроля основана на использовании бесконтактных средств с оптическим преобразованием измеряемой величины.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каракулев Ю. А. Измерение отклонения от соосности деталей в регулировочных клапанах турбин // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 2. С. 27—30.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1986. 544 с.

*Сведения об авторе***Юрий Александрович Каракулев**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: yura1946@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборовПоступила в редакцию  
26.04.11 г.

УДК.621.384

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, А. А. ШМИДБЕРСКАЯ

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МИКРОРЕЛЬЕФОВ  
НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Рассмотрен процесс формирования профиля канавки для обеспечения регулярного микрорельефа на поверхности твердых тел остросфокусированным пучком тяжелых ионов. Определены основные параметры технологического процесса, влияющие на геометрические характеристики профиля формируемой канавки.

*Ключевые слова:* формирование регулярных микрорельефов, остросфокусированный пучок тяжелых ионов, профиль канавки, коэффициент ионного распыления.

Повышение качества приборов и машин непосредственно связано с важнейшей научной проблемой — оптимизацией свойств поверхности и приповерхностного слоя деталей. Именно эти факторы в большинстве случаев определяют такие важнейшие эксплуатационные характеристики приборов, как износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление схватыванию, электро- и теплопроводность, контактная жесткость и др. Одна из задач этой проблемы — оптимизация геометрических параметров поверхностного слоя материала деталей.

Основными аспектами этой задачи являются:

- выявление взаимосвязи микрогеометрии поверхностей с их служебными свойствами;
- определение микрогеометрических параметров поверхностей, наиболее полно и точно отражающих их взаимосвязь со служебными свойствами деталей;
- создание методов обработки, позволяющих точно и в широких пределах воспроизводить микро- и нанорельеф поверхностей с учетом параметров, заданных конструктором (как согласно ГОСТ 2789-73, так и вне его рамок).

Регулярный микрорельеф, характеризующийся, в отличие от шероховатой поверхности, одинаковой формой, размерами и взаимным расположением микронеровностей, является, в связи с тенденцией к миниатюризации в приборостроении, неотъемлемой конструктивной особенностью деталей приборов. В качестве примера можно привести тонкие элементы расщепленных систем, магнитные и оптические диски, дифракционные решетки, конструкционные элементы деталей микроэлектроники, детали микромеханики.

Возможности известных способов регуляризации микрогеометрии (вибрационное накачивание, гравировка, литография, лазерная обработка и т.д.), однако, ограничены, поэтому в настоящее время актуальной является разработка новых технологических способов регуляризации, дополняющих и расширяющих область применения уже известных.

В основу одного из таких новых способов — технологии ионного форматирования — положен процесс распыления материала поверхности твердого тела при бомбардировке его ускоренными ионами. Количественно этот процесс характеризуется коэффициентом ионного распыления  $Y$ , который определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одним падающим ионом (атом/ион). Коэффициент ионного распыления зависит от энергии ускоренных ионов, заряда и массы ионов, угла падения ионов на поверхность и дозы облучения; энергии связи атомов мишени, их массы и заряда ядра; наличия примесей на поверхности и приповерхностном слое; температуры обрабатываемой поверхности и ряда других параметров облучения.

Формирование регулярных микро- и нанорельефов остросфокусированным пучком тяжелых ионов обладает, по сравнению с существующими методами, рядом достоинств:

- диапазон дискретных значений следа пучка от 10 нм и выше;
- отсутствие ограничений по виду обрабатываемых материалов и их твердости;
- хорошая воспроизводимость и контролируемость параметров обработки;
- возможность поддержания на низком уровне тепловых эффектов в зоне воздействия пучка.

При этом наибольший интерес представляет режим работы в области нелинейного распыления, который характеризуется значительными коэффициентами ионного распыления и высокой линейной скоростью движения пучка по поверхности обрабатываемого материала, а следовательно, малым временем экспозиции. Следует отметить, что нелинейное распыление материалов при воздействии пучков тяжелых ионов начинается при достижении определенного предела по энерговыделению [1]. Существенное влияние на процесс распыления оказывает также структура материала: при уменьшении размеров зерен нанокристаллических материалов до 10—15 нм в приповерхностном слое происходит резкое увеличение коэффициента распыления.

Обработка поверхности пучком ионов осуществляется в вакууме. Форма микрорельефа в поперечном сечении определяется распределением плотности тока пучка ионов в зоне обработки. Сформированный пучок ионов сканируется по поверхности заготовки в импульсном или постоянном режиме, при этом, в зависимости от типа создаваемого микрорельефа, осуществляется перемещение самой заготовки. Возможность использования пучков тяжелых ионов с разной массой, а также модуляции тока и распределения плотности тока пучка ионов в зоне обработки позволяет формировать регулярные микрорельефы нового типа, которые нельзя получить другими способами.

Практически допустимым, относительно сложности создания инжектора ионов, ионно-оптической системы и других узлов установки ионного форматирования, а также обеспечения приемлемых значений коэффициентов ионного распыления, является использование тяжелых ионов с энергией 50—80 кэВ [2]. Указанный диапазон значений энергии пучков тяжелых ионов выбран на основе проведенных различными авторами экспериментальных исследований [1].

Форма канавки в поперечном сечении, получаемая в результате ионного распыления, — одна из основных характеристик создаваемого микрорельефа. Поэтому исключительно важным является исследование процесса формирования канавки и определение основных параметров, влияющих на ее геометрию.

Для исследования процесса формирования канавки разработана математическая модель на основе рекомендаций, приведенных в работах [1—3]. Рассмотрим исходные аналитические зависимости, определяющие процессы ионного распыления и формирования рельефа канавки на поверхности мишени из титана. Распыление осуществляется остросфокусирован-

ным пучком ионов висмута с нормальным распределением плотности тока в плоскости обработки при диаметре пучка 0,5 и 0,1 мм.

Скорость распыления материала поверхности мишени определяется зависимостью [1]

$$W = 1,04 \cdot 10^{-5} j_i Y M_2 / \rho, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока пучка ионов;  $M_2$  — массовое число атомов мишени;  $\rho$  — плотность материала мишени.

Для оценочных расчетов коэффициентов распыления в линейной области использовалась формула Смита [1] на основе теории Зигмунда:

$$Y = \frac{20}{E_{\text{суб}}} Z_1^2 Z_2^2 \frac{M_1}{M_2} \frac{E}{(E - 50 Z_1 Z_2)^2}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{суб}}$  — энергия сублимации;  $M_1$  — массовое число иона;  $Z_1, Z_2$  — атомные номера иона и атома мишени соответственно;  $E$  — энергия иона; при расчетах области распыления в данную формулу вводятся поправочные коэффициенты, полученные на основе экспериментальных исследований.

В общем случае коэффициент ионного распыления  $Y$  зависит от угла  $\theta$  между направлением падения ионного пучка и нормалью к поверхности. Согласно работе [1] эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$Y = Y_0 \sec^n \theta, \quad (3)$$

где  $Y_0$  — коэффициент распыления при нормальном падении пучка, определяемый по формуле (2);  $n=1,5 \dots 2$ .

Плотность тока  $j$  в плоскости обработки имеет распределение, близкое к нормальному [2, 3] (рис. 1), и характеризуется зависимостью

$$j = \frac{j_0}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma, j_0$  — экспериментально определяемые параметры;  $r$  — радиус кольца мишени.

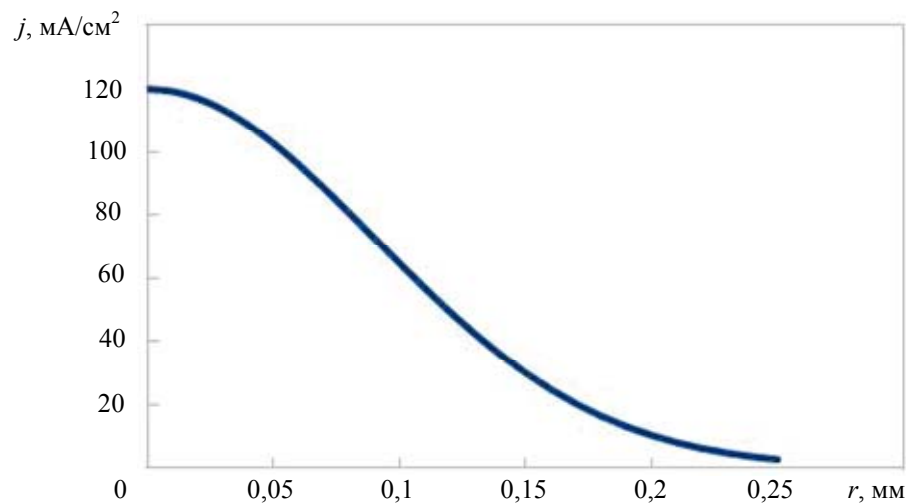


Рис. 1

Для расчета формы канавки поверхность мишени условно разделена на кольца толщиной  $\Delta r$  (рис. 2). Если плотность тока ионного пучка  $j(r)$  в плоскости обработки задается зависимостью (4), то можно считать, что на поверхность каждого кольца площадью  $\Delta s$  по нормали за время  $\Delta t$  падает  $\Delta N_{\text{ион}}$  ионов.

Согласно определению коэффициента ионного распыления  $Y$  на каждый падающий ион приходится  $Y$  распыленных атомов. Следовательно, за время  $\Delta t$  с поверхности каждого кольца распыляется  $\Delta N$  атомов мишени.

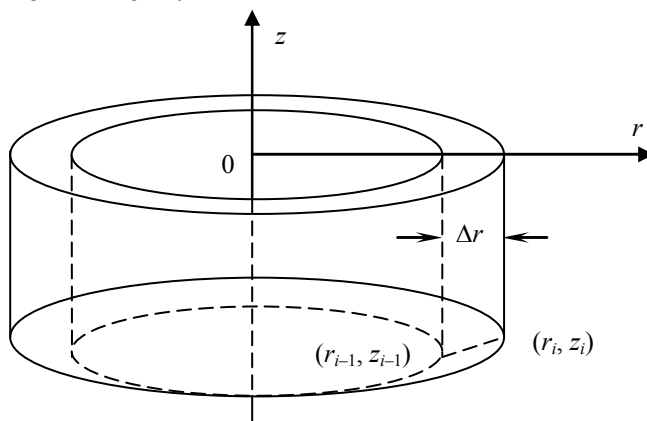


Рис. 2

На рис. 3, а, б представлены результаты расчета по разработанной математической модели для мишени из титана, облучаемой ионами висмута. Штриховой линией показана форма канавки, получаемая при независимости коэффициента  $Y$  от угла  $\theta$  при фиксированном времени экспозиции. Она практически полностью повторяет форму распределения плотности тока  $j$ . Если учитывать, что в процессе ионного распыления угол падения ионов на поверхность подложки изменяется, то формируемый рельеф канавки приобретает вид, показанный на рис. 3 сплошной линией.

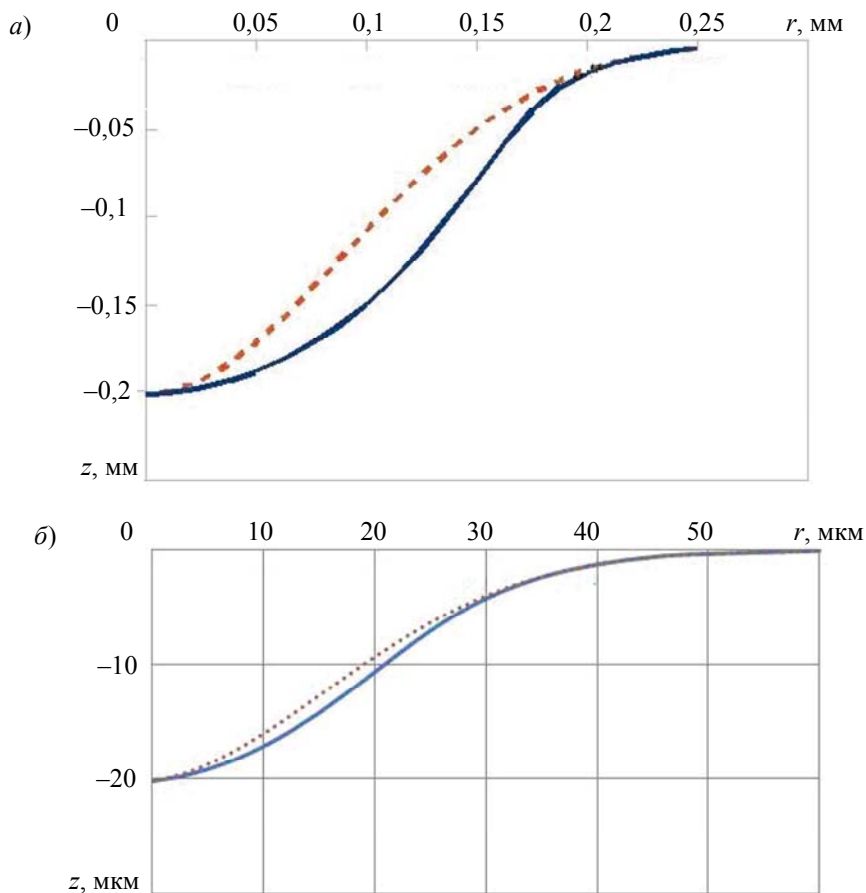


Рис. 3

Таким образом, как показывают результаты расчета, распределение плотности тока в пучке ионов является основным параметром, определяющим форму канавки на поверхности

металлической подложки при воздействии сфокусированного пучка тяжелых ионов. При увеличении времени экспозиции необходимо учитывать изменение угла падения ионов на поверхность канавки, что приводит к увеличению коэффициента ионного распыления и существенно влияет на форму канавки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плешивцев Н. В., Бажин А. И. Физика воздействия ионных пучков на материалы. М.: Вузовская книга, 1998. 392 с.
2. Шмидберский П. А. и др. НИР по разработке ионно-лучевой установки для травления поверхности металлической подложки (УИФ) / Сибирский физ.-техн. ин-т: Отчет. Томск, 1991.
3. Шмидберский П. А., Саметова А. А. Получение пучков тяжелых ионов нанометрического размера // Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника: Сб. статей. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2005. Вып. 4.

#### Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Анна Алексеевна Шмидберская** — магистр; Тюменский государственный университет, кафедра микро- и нанотехнологий; E-mail: polovinca777@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
22.01.13 г.

УДК 535.378

Р. И. МАМАЛИМОВ, И. П. ЩЕРБАКОВ, Р. К. МАМЕДОВ

## МЕХАНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАРЦА И ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Исследуется динамика вспышек механолюминесценции кварца и органического стекла при ударном воздействии. Описана установка, разработанная для регистрации и компьютерной обработки сигналов механолюминесценции твердых тел.

**Ключевые слова:** механолюминесценция, разрушение твердых тел.

**Введение.** Кварцевые и органические стекла широко используются в оптико-механической промышленности и, в частности, в деталях и узлах прецизионных механизмов, эксплуатируемых под воздействием механических напряжений и радиации. Такие условия эксплуатации вызывают образование дефектов в массиве и на поверхности изделий, что приводит к уменьшению их пропускания в видимой области спектра. Исследования природы дефектов и механизма их образования в кварце и органическом стекле (полиметилметакрилате — ПММА) проводятся с использованием различных физических методов, в том числе методов люминесценции. Так, в работах [1—5] установлено, что люминесценция возникает между локальными возбужденным и основным электронными уровнями в радикале SiO (в кварце) и ион-радикале  $\text{C}^+\text{H}$  (в ПММА) при разрывах Si—O—Si- и C—C-связей.

Однако до последнего времени оставалось неясным, располагаются ли „разорванные“ связи на границах трещин или образуются в объеме вещества. Кроме того, неясно, к какому виду люминесценции — флуоресценции или фосфоресценции — следует отнести свечение при разрушении кварца и органического стекла. Для ответа на эти вопросы авторами настоящей статьи были проведены исследования механолюминесценции (МЛ) монокристаллов

кварца и органического стекла при ударном воздействии. Такой способ возбуждения МЛ до сих пор не применялся; его особенность заключается в появлении при ударном воздействии некоторого числа (10—20) вспышек люминесценции, что позволяет детально исследовать их форму.

**Методика эксперимента.** Для исследования механолюминесценции была построена установка, схема которой представлена на рис. 1. Принцип действия установки заключается в следующем. После выключения электромагнита 2 груз 3 падает с высоты  $H \approx 10$  см на стальной боек 4, установленный на поверхности пластинки 1 размером  $20 \times 15 \times 25$  мм, вырезанной из кварца или ПММА. Груз и боек находятся внутри направляющей 12, установленной перпендикулярно к поверхности пластинки. Под воздействием удара стального бойка о пластину возбуждается механолюминесценция. Возникающее излучение при помощи кварцевого фоконка 6 фокусируется на поверхности катода фотоэлектронного умножителя 7 (ФЭУ-136). Акустическая эмиссия (АЭ) регистрируется пьезоэлементом 9, расположенным на расстоянии 10 см от центра пластинки. Сигналы с ФЭУ и пьезоэлектрического датчика поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 5, который включается в момент удара по бойку. Сигнал, формирующийся на выходе АЦП, с интервалом 1 мкс поступает на персональный компьютер 8. Температура образца варьируется с помощью термостата 10 и измеряется хромель-алюмелевой термопарой, установленной в отверстие 11 в образце.

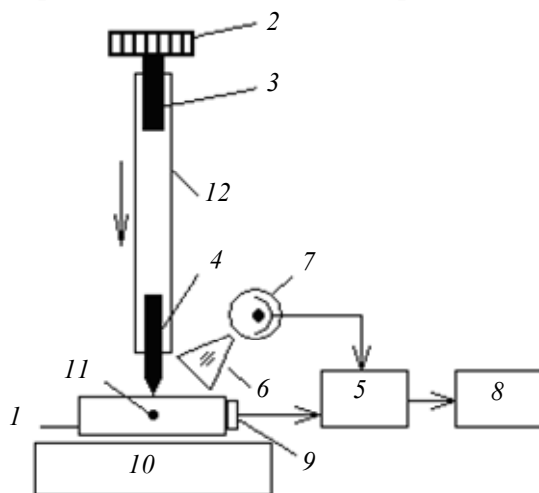


Рис. 1

**Результаты измерений и их интерпретация.** Волна сжатия, возникающая под влиянием удара по бойку, достигает поверхности монокристалла кварца примерно через 10 мкс. Приемник АЭ регистрирует формирование акустической волны на 20 мкс позже, при этом знак АЭ последовательно меняется, что отражает биение системы боек—образец под влиянием упругих волн, возникших при ударе.

Исследования временных зависимостей сигналов МЛ показали, что они представляют собой перекрывающиеся вспышки (10—20). При детальном анализе были обнаружены вспышки, наименее искаженные за счет взаимного наложения во времени. При исследовании вспышек оказалось, что в диапазоне температур 170—670 К их форма одинакова: в течение 10—50 мкс интенсивность МЛ медленно нарастает, затем резко (за 1—3 мкс) увеличивается, достигая максимального значения, и затухает экспоненциально во времени.

Анализ поверхности исследуемых образцов с помощью оптического микроскопа показал, что после удара на поверхности формируется около 10 трещин размером в несколько миллиметров. Возбужденные радикалы SiO и ион-радикалы  $-\text{C}^+\text{H}$ , по-видимому, расположены на границах этих трещин. Действительно, известно, что максимальная скорость роста трещин  $V_m \approx 1/3 \cdot v$ , где  $v$  — скорость звука [6, 7], т.е. для монокристалла кварца  $V_m \approx 1 \dots 2$  км/с [8],

а для ПММА  $V_m \approx 1 \dots 1,5$  км/с [9]. В течение 1—3 мкс трещины могут увеличиться на 1—6 мм. Именно таких размеров трещины и наблюдаются на поверхности образцов.

Форму вспышек МЛ можно объяснить следующим образом. Известно [6, 7, 10], что появлению крупных трещин в нагруженном теле предшествует процесс накопления мелких трещин. По-видимому, медленное нарастание интенсивности МЛ после удара отражает процесс накопления мелких трещин, а быстро увеличивающаяся интенсивность — появление и рост крупной трещины. Когда трещина перестает увеличиваться, интенсивность МЛ начинает уменьшаться вследствие уменьшения населенности возбужденного электронного уровня из-за перехода на основной невозбужденный уровень.

Из теории люминесценции [11, 12] известно, что населенность возбужденных электронных уровней с течением времени уменьшается экспоненциально. Оказалось, что интенсивность МЛ также уменьшается экспоненциально со временем  $t$ :

$$I = I_m \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right), \quad (1)$$

где  $I_m$  — интенсивность МЛ в максимуме вспышки (т.е. в момент прекращения роста трещины);  $\tau_r$  — среднее время затухания интенсивности.

Возможны два варианта: 1) электрон переходит с возбужденного локального уровня  $S_1$  на основной — невозбужденный — уровень  $S_0$ , направление его спина не изменяется, и величина  $\tau_r$  не зависит от температуры исследуемого образца (переход синглет—синглет); 2) электрон по колебательным уровням переходит на второй возбужденный электронный уровень  $S_2$ , направление его спина изменяется на противоположное, а затем осуществляется переход триплет—синглет. В этом случае величина  $\tau_r$  зависит от температуры. Как показывают результаты измерений, в интервале 170—670 К для кварца и 100—350 К для ПММА величина  $\tau_r$  не зависит от температуры и составляет  $12 \pm 1$  мкс для кварца и  $24 \pm 2$  мкс для ПММА. Значение  $\tau_r$ , полученное для кварца, согласуется с приведенным в литературе:  $\tau_r \approx 17$  мкс [4]. Так как МЛ в данном случае не зависит от температуры, ее можно отнести к флуоресценции, т.е. к переходу между синглетными уровнями в радикале SiO и ион-радикале  $-C^+H$ .

Согласно современным представлениям трещины образуются в результате термофлуктуационных разрывов химических связей. Их зарождению предшествует время ожидания  $\tau_{fl}$ , которое связано с температурой образца ( $T$ ) уравнением [6, 7]

$$\tau_{fl} = \tau_0 \exp \frac{U}{kT}, \quad (2)$$

где  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  с;  $k = 8,4$  кДж/моль — константа Больцмана;  $U$  — энергия активации образования трещин, зависящая от механического напряжения.

Анализ временных зависимостей интенсивности МЛ (для кварца) показывает, что появлению вспышек предшествует некоторое время запаздывания  $\tau$  относительно времени удара бойка по поверхности образца. Предположим, что  $\tau \approx \tau_{fl}$ . Тогда согласно уравнению (2) значение  $\ln \tau$  должно увеличиваться линейно в зависимости от температуры  $1/T$ . Как видно из графика, приведенного на рис. 2, оно действительно увеличивается, но нелинейно (точками здесь и далее обозначены экспериментальные данные).

Уравнение (2) содержит произведение  $kT$  в знаменателе показателя экспоненты. Такая запись основана на предположении, что энергия, затрачиваемая на разрывы межатомных связей, распределена равномерно по всем степеням свободы (для твердых тел — по модам колебаний атомов), и на каждую из них приходится доля энергии, равная  $kT$ . Другими словами,

статистика колебаний является больцмановской. Это верно, если температура образца  $T > T_{ch}$ , где  $T_{ch}$  — характеристическая температура, связанная с максимальной частотой колебаний атомов ( $\nu_m$ ) следующим образом [6, 7, 13, 14]:

$$T_{ch} \approx \frac{h\nu_m}{3k}, \quad (3)$$

где  $h$  — постоянная Планка.

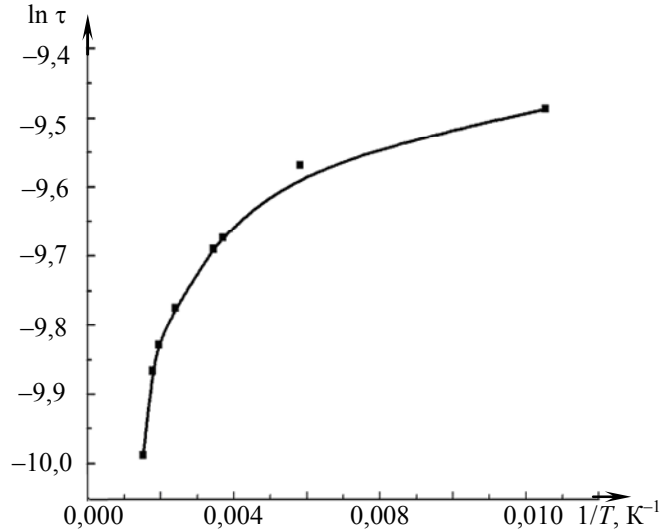


Рис. 2

Для кварца  $\nu_m = 1300 \text{ см}^{-1}$  [8], следовательно  $T_{ch} \approx 800 \text{ К}$ . В этом случае колебания атомов описываются квантовой статистикой Бозе, и энергия неравномерно распределяется по модам колебаний атомов.

Для учета квантовой статистики в уравнение (2) вместо температуры целесообразно ввести квантовую функцию  $F_q$  [13, 14]. Тогда это уравнение приобретает следующий вид:

$$\tau_{fl} \cong \tau_0 \exp(U/kF_q). \quad (4)$$

Функция  $F_q$  вычисляется следующим образом:

$$F_q = \int_0^T C(T) / C_{кв} = \int_0^T C(T) / 0,3, \quad (5)$$

где  $C$  — теплоемкость образца,  $C_{кв}$  — теплоемкость кварца при  $T=800 \text{ К}$ .

Согласно уравнению (4)

$$\ln \frac{\tau}{\tau'} = \frac{U}{kF_q}, \quad (6)$$

где  $\ln \tau' = -10,4$  (согласно рис. 3).

Следовательно, данная функция (см. уравнение (6)), перестроенная в координатах  $\ln \tau(1/F_q)$ , должна быть линейной, что и подтверждает график на рис. 3. Эта зависимость может быть представлена формулой

$$\ln \tau = \ln \tau' + U / kF_q. \quad (7)$$

В соответствии с приведенным графиком (см. рис. 3) была рассчитана зависимость  $U/k=270$ : таким образом,  $U=2,26 \text{ кДж/моль} \approx 0,022 \text{ эВ}$ .

Логарифм времени запаздывания  $\tau$  уменьшается линейно в зависимости от высоты  $H$  (рис. 4):

$$\ln \tau = (\ln \tau)_{H \rightarrow 0} - qH, \quad (8)$$

где  $q = -5 \cdot 10^3$  — тангенс угла наклона прямой.



Единственная величина, зависящая от  $H$  в уравнении (7), —  $U$ . Согласно формуле (6) зависимость энергии активации  $U$  от высоты  $H$  определяется как

$$U = U_0 - wH, \tag{9}$$

где  $U_0$  — энергия активации образования трещин при  $H \rightarrow 0$ ;  $w = qkF_q$  — опытная постоянная, рассчитанная при  $T=300$  К; подставив в это уравнение  $q = -5 \cdot 10^3$ , получим  $w = 1,6 \cdot 10^{-2}$  кДж·К/(моль·см) =  $1,6 \cdot 10^4$  эВ·К/см.

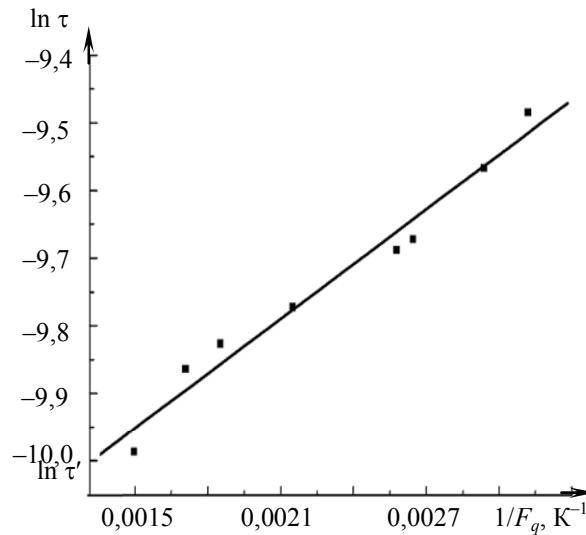


Рис. 3

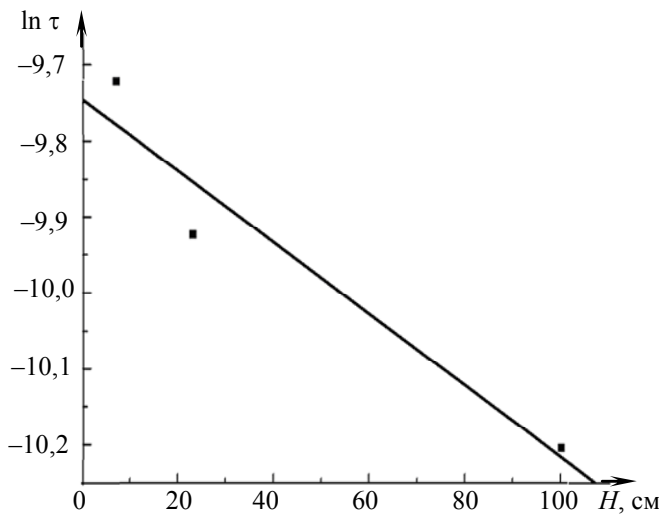


Рис. 4

Решим уравнение (9) относительно  $U_0$ : при  $H \approx 10$  см имеем

$$U_0 = 2,26 + 0,11 = 2,36 \text{ кДж/моль} = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}. \tag{10}$$

Величину  $U_0$  можно оценить и другим способом — не используя в явном виде зависимость  $U_0(H)$ . Подставив  $(\ln \tau)_{H \rightarrow 0} = -9,7$  в уравнение (7) и решив его относительно  $U_0$ , получим

$$U_0 \approx 2,3 \text{ кДж/моль} = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}. \tag{11}$$

Совпадение значений, полученных в формулах (10) и (11), косвенно подтверждает предположение о том, что энергия активации может быть описана выражением (9).

**Заключение.** По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

При ударе стальным бойком по поверхности кварца и ПММА возникает механолюминесценция. Импульсы МЛ представляют собой вспышки, каждая из которых возникает при образовании трещины миллиметрового размера. Скорость появления вспышек соответствует скорости увеличения трещин. Прекращение роста трещин приводит к релаксации возбужденных электронных состояний со средним временем 12 мкс (для кварца) и 24 мкс (для ПММА). Время релаксации не зависит от температуры твердого тела, что позволяет приписать явление механолюминесценции к флуоресценции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силинь А. Р., Трухин А. Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO<sub>2</sub>. Рига: Зинатне, 1985. 244 с.
2. Kawaguchi Y. Time-resolved fractoluminescence spectra of silica glass in vacuum and nitrogen atmosphere // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52. P. 9224—9226.
3. Kawaguchi Y. OH-content dependence of fractoluminescence spectra in silica glass // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54, N 14. P. 9721—9722.
4. Kawaguchi Y. Fractoluminescence spectra in crystalline quartz // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. Vol. 37. P. 1892—1896.
5. Тохметов А. Т., Веттегрень В. И. Колебательная структура спектров механолюминесценции кварцевого стекла и полиметилметакрилата // Физика твердого тела. 1989. Т. 31, В.12. С. 175—178.
6. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука 1974. 560 с.
7. Петров В. А., Башкарев А. Я., Веттегрень В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб: Политехника, 1993. 475 с.
8. Блистанов А. А., Бондаренко В. С., Чкалова В. В. Акустические кристаллы. Справочник. М.: Наука, 1982. 632 с.
9. Кожушко А. А., Синани А. Б. Скорость нагружения и хрупкость твердых тел // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, В. 5. С. 812—815.
10. Веттегрень В. И., Куксенко В. С., Томилин Н. Г., Крючков М. А. Статистика микротрещин в гетерогенных материалах (граниты) // Там же. 2004. Т. 46, № 10. С. 1793—1796.
11. Галанин М. Д. Люминесценция молекул и кристаллов. М.: Изд-во Физического ин-та им. П. Н. Лебедева, 1999. 200 с.
12. Парфианович И. А., Саломатов В. Н. Люминесценция кристаллических веществ: Учеб. пособие. Иркутск, 1975. Ч. 1. 166 с.
13. Bronnikov S. V., Vettegren V. I., Frenkel S. Y. Description of thermal and mechanical properties of drawn polymers over a wide temperature range // Polymer Engineering and Science. 1992. Vol. 32, N 17. P. 1204—1208.
14. Bronnikov S. V., Vettegren V. I., Frenkel S. Y. Kinetics of deformation and relaxation in highly oriented polymers // Adv. Polymer Sci. 1996. Vol. 125. P. 103—146.

**Сведения об авторах**

- Рустам Исмагилович Мамалимов** — канд. техн. наук; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; E-mail: mamalun@mail.ru
- Игорь Петрович Щербаков** — канд. физ.-мат. наук; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
- Роман Камильевич Мамедов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 535.65, 622.7, 681.785

Е. В. ГОРБУНОВА, Н. А. ПАВЛЕНКО, А. Н. ЧЕРТОВ

### МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА РУД ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Предложена модель оптического сепаратора, предназначенного для сортировки кусков/частиц руд твердых полезных ископаемых мелких классов крупности.

*Ключевые слова:* оптический сепаратор, цвет, твердые полезные ископаемые.

Истощение запасов руд твердых полезных ископаемых и вовлечение в производство бедных и труднообогащаемых руд ведет к постоянному удорожанию минерального сырья. В подобных условиях одним из приоритетов развития предприятий горнодобывающей отрасли является повышение эффективности производства, связанное, в том числе, с поиском и внедрением альтернативных методов обогащения.

Одним из таких методов является активно внедряемый в отечественную практику обогащения оптический (или „фотометрический“) метод сепарации, основанный на разделении кусков/частиц минералов по цвету.

В настоящее время эффективному использованию данного метода, а также расширению границ его применимости препятствуют следующие обстоятельства:

- использование в сепараторах моделей описания цвета и алгоритмов анализа, не являющихся оптимальными с точки зрения анализа минеральных объектов по цвету [см. лит.];
- отсутствие методики определения оптимальных условий разделения минералов по цвету (геометрических параметров схем освещения-регистрации сепараторов, селективных признаков и точных порогов разделения).

Следствием этого является сложность или невозможность разделения слабоконтрастного материала, особенно мелких классов крупности.

Авторами настоящей статьи разработана модель сепаратора, включающая узел транспортировки материала на базе транспортера, и узел регистрации на базе линейной высокоскоростной камеры. Сепаратор предназначен, в первую очередь, для отработки алгоритмов анализа и разделения частиц минеральных руд крупностью 0,5—2 мм. В качестве параметров разделения возможно использование признаков „цвет“, а также „прозрачность“, „блеск“, „форма проекции объекта“.

Модульный принцип построения сепаратора позволит обеспечить изменение условий сепарации на стадии определения оптимальных условий разделения конкретных видов руд. Возможная скорость транспортировки материала соответствует аналогичному параметру в существующих оптических обогатительных комплексах и составляет 0,5—2 м/с.

Статья подготовлена по результатам работы, проводимой при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

Горбунова Е. В. Оптико-электронные системы цветового анализа минерального сырья. Теоретические основы и практические приложения. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 164 с.

*Сведения об авторах*

- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Никита Андреевич Павленко** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: nikfiz@mail.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: a.n.chertov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
08.02.13 г.

УДК 519.8

Р. А. АЛЕШКО, А. Т. ГУРЬЕВ

## МЕТОДИКА ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Представлена методика тематического дешифрирования спутниковых снимков лесных территорий, разработанная с применением структурного моделирования и аппарата теории множеств.

*Ключевые слова:* тематическое дешифрирование, структурные модели, спутниковый мониторинг, информационная система.

Возрастающий объем разнообразных данных дистанционного зондирования Земли обуславливает актуальность исследований по выбору и оценке снимков для решения различных задач. Оценка изображений непосредственно зависит от параметров объекта исследования и дешифровочных признаков, отражающих его свойства на снимке.

Объектом исследования, рассматриваемым в настоящей статье, является сложная природная система лесных ресурсов, при изучении которой необходим комплексный подход к определению параметров объекта [1].

Предлагаемая методика автоматизированного определения основных таксационных показателей лесных насаждений (таких как класс возраста, преобладающая порода, тип леса и т.п.) базируется на дешифровочных признаках объекта спутниковой съемки. Основой методики является построение структурных моделей объектов, их свойств и отношений, а также структурирование спутниковых снимков [2].

На первом этапе создания методики для выявления основных таксационных параметров лесных насаждений были определены наиболее информативные дешифровочные признаки: для обзорных снимков их определение осуществлялось путем построения спектральных кривых и выделения наиболее обособленных графиков; для детальных снимков были определены признаки текстуры изображения.

Далее было сформировано формализованное описание объектов и их свойств в рамках тематического дешифрирования. С использованием математического аппарата теории множеств были выделены объекты лесных территорий и объекты съемки, а также представлены множества их свойств.

На следующем этапе осуществлено построение булевых матриц взаимосвязей основных таксационных показателей и дешифровочных признаков. На основе матричной информации построены схемы структурных связей и введен оценочный индекс, характеризующий точность определения параметров.

На заключительном этапе были разработаны продукционные правила определения основных таксационных показателей с применением данных спутниковой съемки. С использованием условных операторов „если“ и операций логического умножения составлены формулы для определения таксационных показателей лесных насаждений.

Таким образом, анализ взаимосвязей объектов двух систем позволил осуществить формализованный переход от признаковой модели спутникового снимка к образно-знаковой модели тематической карты исследуемого объекта. Эти данные могут быть применимы для совершенствования существующих, а также создания новых систем и алгоритмов обработки данных космического мониторинга. В частности, на основе проведенного анализа структурных взаимосвязей таксационных параметров и дешифровочных признаков разработаны алгоритмы тематического дешифрирования для решения задач лесопатологического мониторинга, выявления выгоревших лесных территорий, определения породно-возрастного состава насаждений.

В качестве практической реализации разработана информационная система управления лесными ресурсами, позволяющая выполнять манипуляции с пространственными и атрибутивными данными [3]. В этой системе основным компонентом обновления данных о лесных насаждениях является предложенная в статье методика на основе структурных моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьев А. Т., Аleshko P. A., Торхов С. В., Трубин Д. В. Тематическая обработка спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. 164 с.
2. Павлов В. В. Структурное моделирование в CALS-технологиях. М.: Наука, 2006. 307 с.
3. Аleshko P. A., Гурьев А. Т. Разработка методики автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования лесных насаждений // Информационные технологии в исследовании Северных и Арктических территорий: Материалы науч.-техн. конф. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. С. 3—9.

#### Сведения об авторах

- Роман Александрович Аleshko** — Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра информационных технологий, Архангельск; ассистент; E-mail: roman@aleshko.com
- Александр Тимофеевич Гурьев** — д-р техн. наук, профессор; Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра информационных технологий, Архангельск; E-mail: atg6@rambler.ru

Рекомендована  
Санкт-Петербургским институтом  
информатики и автоматизации РАН

Поступила в редакцию  
14.06.13 г.

## SUMMARY

**P. 5—9.**

### **GENERALIZED STRUCTURE OF ADAPTIVE INFORMATION AND MEASURING COMPLEX OF MOBILE OBJECT**

A theoretical approach to development of adaptive information and measuring complex of mobile object is considered. The basis of the approach consists in application of the theory of adaptive management at different levels of hierarchy of measuring system. The proposed method is focused on improvement of accuracy of information on orientation and navigation parameters of the mobile object functioning in random perturbation conditions.

**Keywords:** adaptive information and measuring complex, mobile object, navigation and orientation, aprioristic uncertainty.

#### *Data on author*

*Ivan V. Fominov* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems, St. Petersburg; E-mail: i.v.fominov@gmail.com

**P. 10—12.**

### **SEARCH METHOD FOR OPTIMAL PROGRAM OF LAUNCHER MOVEMENT TO MINIMIZE JETTISONABLE ELEMENTS SCATTERING AREA**

The problem of synthesis of the optimal launcher movement control program for active trajectory part is considered. The area of scattering ellipse of jettisonable elements is taken as the functional to be optimized. A method of deliberate replacement of optimizable functional is used for development of the control program.

**Keywords:** launcher, jettisonable element, impact area, scattering ellipse, functional.

#### *Data on authors*

*Nikolay F. Averkiev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support in Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory, St. Petersburg; E-mail: averkievnf@yandex.ru

*Dastanbek A. Bulekbaev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Higher Mathematics, St. Petersburg; E-mail: atiman@mail.ru

P. 13—20.

### CALCULATION OF SPACECRAFT ORIENTATION IN GEOCENTRIC EQUATORIAL COORDINATE SYSTEM ON THE BASE OF ASTRONOMICAL MEASUREMENTS IN THE ABSENCE OF ORBIT PARAMETERS DATA

A method is proposed for spacecraft orientation in geocentric equatorial system of coordinates in the absence of data on orbit parameters. The method is based on astronomical measurements and the subsequent recognition of stars.

**Keywords:** star identification, autonomous spacecraft orientation, optical-electronic instrument, astronomical measurements.

#### *Data on authors*

- Tamara V. Danilova* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Military Institute Department; St. Petersburg; E-mail: danitoma58@yandex.ru
- Marina A. Arkhipova* — Mozhaysky Military Space Academy, Military Institute Department; St. Petersburg; Scientist; E-mail: marina\_arhipova@mail.ru

P. 21—26.

### DESIGN OPTIONS OF DIAMETRIC SCHEMATIC OF GYRO-INCLINOMETER FOR HIGH-LATITUDE UNDERGROUND NAVIGATION SYSTEMS

Basic schemes and design solutions in development of orientation module of gyroscopic underground navigation system are presented. The system is designed for operation on Arctic seas shelf.

**Keywords:** underground navigation system, gimballess gyro-inclinometer, Arctic offshore.

#### *Data on authors*

- Tatiana V. Paderina* — Cand. Techn. Sci.; State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: paderinata@rambler.ru
- Dmitry A. Sokolov* — Special Design Office for Underground Navigation Instruments, Closed JSC, St. Petersburg; Design Engineer; E-mail: d.a.sokolov@mail.ru

P. 27—31.

### OPTICAL-ELECTRONIC CONVERTER OF LINEAR DISPLACEMENT OF SUBMICRON ACCURACY

An incremental optical-electronic converter of linear displacement of submicron accuracy is described. The converter is designed to be used in multi-axis machining equipment. Results of the converter accuracy measurement are presented.

**Keywords:** linear displacements, opto-electronic encoder, incremental encoder, grating.

#### *Data on authors*

- Nikolay V. Smirnov* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: pirate.kolyan@gmail.com
- Alexander V. Prokofiev* — Cand. Techn. Sci.; Special Design Bureau of Machine Information and Measuring Systems with Pilot Production, Open JSC, St. Petersburg; Head of Office of Metrology; E-mail: avp79@yandex.ru

**P. 31—35.****AUTOCOLLIMATION FOCUSING IN OPTO-ELECTRONIC IR SYSTEM**

A method for automated compensation for de-focusing in opto-electronic systems for IR spectrum range is considered. A variant of the Narcissus effect application for automated alignment of the systems in question is presented.

**Keywords:** defocusing compensation, infrared spectrum, opto-electronic system, automated focusing, Narcissus effect.

**Data on author**

*Ilya V. Erofeev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Information Technologies and Materials; E-mail: defremeri@yandex.ru

**P. 35—38.****OPTICAL SPATIAL-FREQUENCY ANALOG-DIGITAL CONVERTER**

An optical spatial-frequency analog-digital converter is presented. The ADC operation is based on consecutive conversion of input optical signal frequency. The converter is designed for transformation of both electrical and optical analog signals into positional binary code.

**Keywords:** information processing device, optical analog-to-digital converter, the optical combiner, optical Y-splitter.

**Data on authors**

*Sergey V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Rostov State Transport University, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transportation, Rostov-on-Don; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru

*Vladislav V. Kamensky* — Cand. Techn. Sci.; Rostov State Transport University, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transportation, Rostov-on-Don; E-mail: kam-vladislav@yandex.ru

**P. 39—44.****CALCULATION OF A NO-GLARE LIGHT-EMITTING DIODE LAMP**

A design of a no-glare light-emitting diode lamp is suggested. Removal of blinding effect is achieved with installation of plate reflectors to distribute the light-emitting diodes radiation uniformly over the lamp surface. Results of optical calculations and geometric parameters of the light-emitting diode lamp are presented for the case of a transparent glass with the refractive index of 1.5.

**Keywords:** light engineering, light-emitting diode, energy-saving technologies, lighting devices.

**Data on authors**

*Alexander S. Saushin* — Post-Graduate Student; Institute of Mechanics, Ural Branch of RAS, Laser Laboratory, Izhevsk; E-mail: 56-i@mail.ru

*Alexey M. Leshchev* — Eireen Light Ltd, Votkinsk; Director; E-mail: alexei555@gmail.com

*Gennady M. Mikheev* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Institute of Mechanics, Ural Branch of RAS, Laser Laboratory, Izhevsk; E-mail: mikheev@udman.ru



P. 44—49.

### MATHEMATICAL MODEL OF WILDFIRE AS A SOURCE OF INFRARED RADIATION

The problems of mathematical modeling of wildfire as a source of infrared radiation are considered. Main components of the forest fire that define type and character of the fire are analyzed. A general algorithm for synthesis of a thermal image of wildfire is presented.

**Keywords:** wildfire, thermal image, mathematical modeling of wildfire, synthesis, optical-electronic system.

#### *Data on authors*

- Alexander S. Vasiliev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Andrey V. Krasnyashchikh* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: crus@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Oleg Yu. Lashmanov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Dmitry Yu. Lysenko* — Transas Group, St. Petersburg; Project Manager; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Anatoly S. Shirokov* — Transas Group, St. Petersburg; Leading Specialist; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com

P. 50—56.

### SOLUTION OF THE INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATION OF HEAT TRANSFER IN THE PROBLEM OF FOREST FIRE SPREAD MODELING

Process of solving of the integro-differential equation of heat transfer is described. The equation is used as a basic one for description of heat transmission variation in mathematical model of forest fire spread.

**Keywords:** fire spread modeling, heat flow, integro-differential equation of heat transfer, friction stress of the heat flow.

#### *Data on author*

- Sergey A. Astafiev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: Rokkolo287@yandex.ru

**P. 56—61.****METHOD FOR MAINTENANCE OF TEMPERATURE IN A SPACE VEHICLE MOVING ALONG A CIRCULAR ORBIT WITH SHADOW PATH SECTION**

A method for selection of governing characteristics for maintenance of a desired temperature in the spacecraft is proposed. The method is based on calculation of the steady-state thermal condition along the shadow and solar path sections; the absence of the solar power on the shadow path section is compensated by inner source of heat.

**Keywords:** spacecraft, emissivity, view factor, thermal condition, radiative heat transfer.

**Data on authors**

- Yulia V. Bayova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Evgeny V. Lapovok* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Sergey I. Khankov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring

**P. 62—65.****STATISTICAL ANALYSIS OF METHODS OF CONTROL OVER HOLES COAXIALITY IN MACHINE BODY**

Results of statistical analysis of data obtained at coaxiality control of holes in machine body with various methods are presented. The accuracy of the holes deflection from coaxiality measurement is shown to depend on assignment of the measuring base – common axis of the holes.

**Keywords:** hole axis, measuring base, statistical analysis.

**Data on author**

- Yury A. Karakulev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: yura1946@yandex.ru

**P. 65—69.****FORMATION OF REGULAR MICRORELIEF ON SOLID SURFACE WITH SHARPLY FOCUSED BEAM OF HEAVY IONS**

The process of groove profile formation on solid surface under the action of sharply focused beam of heavy ions is studied. Main parameters of the process affecting the formatted groove geometry characteristics are determined.

**Keywords:** regular microrelief formation, sharply focused beam of heavy ions, groove profile, ion spray coefficient.

**Data on authors**

- Viktor M. Medunetsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Anna A. Shmidberskaya* — Master Sci.; Tyumen State University, Department of Micro and Nanotechnology; E-mail: polovinca@rambler.ru

P. 69—74.

### MECHANOLUMINESCENCE OF QUARTZ AND ORGANIC GLASS UPON A SHOCK

Dynamics of mechanoluminescence flushes from silica and organic glass under the impact of steel striker is studied. A setup is designed for computer record and signal processing of mechanoluminescence flushes from solids in the temperature range 170—670 K is designed.

**Keywords:** mechanoluminescence, fracture of solids.

#### *Data on authors*

- Rustam I. Mamalimov* — Cand. Techn. Sci.; Ioffe Physical Technical Institute of RAS, St. Petersburg; E-mail: mamalun@mail.ru
- Igor P. Shcherbakov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Ioffe Physical Technical Institute of RAS, St. Petersburg
- Roman K. Mamedov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 75—76.

### MODEL OF OPTICAL SEPARATOR FOR SOLID MINERALS

A model of optical separator for small-sized samples of solid minerals based on analysis of the sample color is proposed.

**Keywords:** optical separator, color, solid minerals.

#### *Data on authors*

- Elena V. Gorbunova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Nikita A. Pavlenko* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: nikhfiz@mail.ru
- Aleksander N. Chertov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

P. 76—77.

### METHOD FOR THEMATIC INTERPRETATION OF SATELLITE IMAGES OF FOREST AREAS ON THE BASE OF STRUCTURAL MODELS

A method for thematic interpretation of satellite images of forest areas is presented. The method is developed with the use of structural modeling and application of set theory means.

**Keywords:** thematic interpretation, structural models, satellite monitoring, information system.

#### *Data on authors*

- Roman A. Aleshko* — Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Department of Information Technologies, Arkhangelsk; Assistant; E-mail: roman@aleshko.com
- Aleksander T. Guriev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Department of Information Technologies, Arkhangelsk; E-mail: atg6@rambler.ru