

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

VIII Международные научный конгресс и выставка

ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2012

Международная научная конференция

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ, ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА,
НАНОТЕХНОЛОГИИ**

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск
СГГА
2012

УДК 681.2:006:62:53:001
С26

Ответственные за выпуск:

Кандидат технических наук, профессор,
директор Института оптики и оптических технологий СГГА, Новосибирск
О.К. Ушаков

Доктор технических наук, профессор,
директор Конструкторско-технологического института
научного приборостроения СО РАН, Новосибирск
Ю.В. Чугуй

Доктор технических наук, профессор,
зав. лабораторией лазерных информационных систем СО РАН, Новосибирск
Б.В. Поллер

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии, стандартизации и
сертификации СГГА, Новосибирск
В.Я. Черепанов

Доктор технических наук, профессор, СГГА, Новосибирск
В.В. Чесноков

Кандидат технических наук, зав. кафедрой наносистем и оптоэлектроники, СГГА, Новосибирск
Д.В. Чесноков

Кандидат технических наук, зам. директора Института оптики и оптических технологий
СГГА, Новосибирск
П.В. Петров

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20
апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» :
сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 282 с.

ISBN 978-5-87693-523-6 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-521-2

ISBN 978-5-87693-506-9

В сборнике опубликованы материалы VIII Международного научного
конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», представленные на
Международной научной конференции «Специализированное
приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА
Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:62:53:001

ISBN 978-5-87693-523-6 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-521-2

ISBN 978-5-87693-506-9

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Д.В. Кочкарев. Акустооптический датчик импульсных давлений в атмосфере.....	9
Ю.Ц. Батомункуев. Аберрации высших порядков объемного голограммного оптического элемента	16
А.В. Бритвин, А.Б. Поллер, Б.В. Поллер, А.Е. Кусакина. Характеристики преобразования оптических сигналов в полимерных пленках с люминофорами, с наночастицами железа	27
Г.А. Сырецкий. MEMS-сенсоры ориентации и параметров движения	32
В.П. Корольков, А.С. Конченко, Н.А. Николаев, А.А. Мамрашев. Разработка методов юстировки микрооптической системы для генерации импульсов субмиллиметрового электромагнитного излучения	38
А.Г. Полещук, Р.К. Насыров. Контроль формы нетипичных оптических поверхностей с помощью ДОЭ.....	43
И.А. Козулин, В.В. Кузнецов. Экспериментальное исследование двухфазного течения в прямоугольном микроканале.....	48
В.В. Комиссаров, Н.В. Комиссарова. Решение прямой задачи теплопроводности для сред со сложной геометрией.....	54
А.А. Торопов, Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул. Методика Методика, алгоритм и результаты моделирования температур поверхности объектов в условиях естественного освещения	59
В.С. Корнеев, В.А. Райхерт. Анализ факторов, ограничивающих быстродействие МЭМС с электромагнитным управлением	65
Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, Ю.Д. Коломников, Ю.Г. Голочаев, С.И. Коняев, А.Е. Кусакина, Н.А. Шегурнова. Некоторые характеристики распространения лазерных сигналов в условиях обсерватории СО РАН «Кайтанак» на Горном Алтае	69
А.Н. Лузин, В.Н. Матуско. Визуально опознаваемые максимумы в формулах для синусоидальных электрических колебаний в контуре .	74
Ю.А. Можаяев. Исследование поведения динамики механической системы при помощи блочного построения структуры уравнений, описывающих её движение в среде Matlab – Simulink.....	79
Ю.А. Можаяев. Исследование параметрической неустойчивости программного движения.....	87
Е.В. Лаптев, С.Л. Шергин. Обзор методов формирования локализованных слоёв графена.....	94
В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, С.Л. Шергин. Исследование процессов формирования монокристаллических слоев углерода методом LCVD	99
В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев. Исследование влияния сил поверхностного натяжения на процессы формирования микроструктур методом LCVD.....	106
В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков. Микромеханические устройства субпиксельного микросканирования для ИК-диапазона спектра	116

В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков. Разработка МОЭМС в СГГА	122
М.В. Кузнецов, Д.В. Кочкарев. Экспериментальное исследование осаждения тонких плёнок металлов методом наносекундного LCVD	138
А.А. Колер, А.И. Каленицкий, В.Я. Черепанов. Методы определения зависимости показаний силоизмерительных устройств от вектора приложения нагрузки	144
А.А. Горбылев. Исследование влияния вертикального градиента температуры на воспроизводимость реперных точек температуры затвердевания металлов	149
В.М. Тиссен. Корреляции в движении земных полюсов и скорости вращения земли с различными природными факторами	155
Б.С. Могильницкий. Принцип регистрации сверхкоротких лазерных импульсов	161
А.Д. Зонова, В.Я. Черепанов. Методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом	166
Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов, В.А. Ямшанов. Определение неоднородности теплового поля в установках для калибровки датчиков теплового потока	172
Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов. Экспериментальные исследования установки для поверки датчиков теплового потока радиационно- конвективным методом	177
А.Ф. Бродников, В.Я. Черепанов. Определение действительной температуры кипения воды с помощью реперной точки натрия	182
Г.В. Шувалов, А.А. Мамонов, О.А. Ясырова, Е.А. Абрамова. Образцовая установка для измерения коэффициента объемного расширения нефтепродуктов	186
Г.В. Шувалов, А.П. Ильин, И.В. Клековкин. Метрологическое обеспечение измерений термохимических параметров нанопорошков металлов .	191
Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова. Обеспечение качества поверхностей оптических деталей путем регулирования теплового состояния зоны обработки при шлифовании алмазно-абразивным инструментом	194
Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова, Е.А. Абрамова. Применение физико- химических методов определения некоторых параметров судовых нефтепродуктов по ГОСТ Р 54299-2010 «Судовые топлива. Технические условия»	199
П.М. Плетнев, Г.В. Симонова, Д.П. Симонов, С.А. Степанова. Разработка бесконтактных методов количественного определения структурных характеристик керамических материалов	204
Д.П. Симонов. Анализ возможности создания цифровых эталонов признаков для структурированных поверхностей	209
Т.М. Соловьева. Разработка методик выборочного измерительного контроля партий продукции	213

В.Ю. Кондаков, В.С. Крылов. Испытания АИИС КУЭ в целях утверждения типа	218
В.Ю. Кондаков, В.С. Крылов. Методы расчета погрешности АИИС КУЭ при измерении электрической энергии	223
А.С. Толстиков, И.Е. Макаров. Эксперименты по синхронизации пространственно разнесённых часов на трассе СНИИМ-СГГА	228
А.А. Карауш, А.С. Толстиков. К выбору численных методов интегрирования уравнений движения навигационных спутников	232
А.С. Толстиков, Е.А. Ханыкова, Н.В. Закорючкина. Оценивание ухода бортовых часов по данным траекторных измерений	237
А.В. Куликов, С.А. Загарских, В.Т. Новоевский, А.Н. Носов. Эталонная установка для определения погрешности измерений горизонтальных и вертикальных углов геодезических угломерных приборов	241
А.В. Куликов, В.Т. Новоевский, А.А. Ильин, А.Н. Носов, К.В. Тукмачёв. Установки для определения погрешности измерительной системы «Цифровой нивелир – кодовая рейка»	246
А.В. Куликов, А.А. Ильин, В.Т. Новоевский. Определение средней длины метровых интервалов у штрих-кодовых реек на интерференционном компараторе СГГА.....	250
В.В. Фармагей. Сравнительная характеристика боевых ножей (ножей выживания) разведывательных подразделений ВС РФ.....	254
К.В. Конорев. Планшет снайпера	258
С.А. Арзамасцев, В.А. Лазарев. Проверочная мишень для проверки боя и приведение к нормальному бою 9,00-мм специальной снайперской винтовки «ВСС»	262
И.В. Минин, О.В. Минин. Конформная дифракционная квазиоптика: от миллиметровых волн до фокусировки ударных волн	265
В.А. Лазарев, А.В. Лесной. Линейка габаритная (ЛЛ-1) для проверки боя винтовки ВСС	270
Н.Н. Антоненчик. Оружие на новых физических принципах	273
В.С. Айрапетян, Т.А. Широкова. Кольцевая схема резонатора параметрического генератора света	278

CONTENTS

D.V. Kochkarev Acousto-optic sensor pulse pressures in the atmosphere	9
Yu.Ts. Batomunkuev. Higher-order aberrations of volume holographic optical element	16
A.V. Britvin, A.B. Poller, B.V. Poller, A.E. Kusakina. Characteristics of the transformation of optical signals in polymer films with phosphors with nano particles of iron.....	27
G.A. Syreckiy. MEMS-sensors of orientation and of movement parameters.....	32
V.P. Korolkov, A.S. Konchenko, N.A. Nikolaev, A.A. Mamrashev. Development of methods of adjustment of microoptical system for generation of submillimeter electromagnetic pulses.....	38
A.G. Poleshchuk, R.K. Nasirov. Test of a free form surfaces by means of DOE	43
I.A. Kozulin, V.V. Kuznetsov. Experimental investigation of two-phase flow in rectangular microchannel	48
V.V. Komissarov, N.V. Komissarova. The solution of the direct heat conduction problem for environments with complex geometry.....	54
A.A. Toropov, L.V. Tymkul, V.M. Tymkul. Techniques, algorithms and simulation results Temperature-vrhnosti objects in the natural lighting.....	59
V.S. Korneyev, V.A. Reichert. Analisis of factors is restricted by the mems with electromagnetic control.....	65
B.V. Poller, A.V. Britvin, Yu.D. Kolomnikov, Yu.G. Golochayev, S.I. Konyaev, A.E. Kusakina, N.A. Shegurnova. Some characteristics of laser signals in Observatory RAS «Kajtanak» Mountain Altai	69
A.N. Luzin, V.N. Matusko. Visually identifiable peaks in formulasfor sinusoidal electrical oscillations in the circuit.....	74
Yu.A. Mozhaev. Research of the behavior of dynamics of mechanical systems with block building structure equations describing its movement in the environment Matlab – Simulink	79
Yu.A. Mozhaev. Research of parametric instability of motion program	87
E.V. Laptev, S.L. Shergin. The review of local graphen layers formation methods	94
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, S.L. Shergin. The investigation of monoatomic carbon layers formation processes by LCVD method.....	99
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov, D.V. Kochkarev. The investigation of surface tension force influence on process of microstructure formation by LCVD method.....	106
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov. Micromechanical subpixel microscanning devices for IR spectrum range	116
V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov. MOEMS development in SSGA	122
M.V. Kuznetsov, D.V. Kochkarev. Experimental study of thin film deposition metals by nanosecond LCVD	138

A.A. Koller, A.I. Kalenickiy, V.Ya. Cherepanov. Methods of definition of dependence of indications force measuring devices from the vector of the loading appendix	144
A.A. Gorbylev. Research vertical temperature gradient influence at reproducibility of temperature of fixed points of metal freezing.....	149
V.M. Tissen. Correlation in the movement of the earth's poles and earth rotation speed with natural factors.....	155
B.S. Mogilnitsky. Principle of registration of supershort laser pulses.....	161
A.D. Zonova, V.Ya. Cherepanov. Express-measurements methods of heat power heating instrument of a non-destruction method	166
D.P. Trotsenko, V.Ya. Cherepanov, V.A. Yamshanov. Definition of heterogeneity of the thermal field in installations for calibration of sensors of the heat flux	172
N.A. Kurbatova, V.Ya. Cherepanov. Research experimental equipment for verification heat flux sensors by a radiation-convective method	177
A.F. Brodnikov, V.Ya. Cherepanov. Definition of the valid temperature of boiling of water by means of constant point of sodium.....	182
G.V. Shuvalov, A.A. Mamonov, O.A. Jasyrova, E.A. Abramova. Standard equipment for measuring the volume expansion coefficient of oil products	186
G.V. Shuvalov, A.P. Ilyin, I.V. Klekovkin. Metrological maintenance of measurements of thermochemical parameters nanopowder of metals	191
L.A. Kanushina, A.N. Sosnov, N.K. Sosnova. Assurance of quality for optical detail surfaces by regulating thermal conditions for the area under treatment in process of diamond-abrasive grinding.....	194
G.V. Shuvalov, O.A. Jasyrova, E.A. Abramova. Application of physicochemical methods definition of some ship oil product parameters in accordance with GOST P 54299-2010 «Ship fuel. Specifications»	199
P.M. Pletnev, G.V. Simonova, D.P. Simonov, S.A. Stepanova. Development contactless methods quantitative determination the structural characteristics of ceramic materials	204
D.P. Simonov. Analysis of the possibility of creating digital standards for signs of structured surfaces	209
T.M. Soloveva. Working out of techniques of selective measuring control of consignments of goods	213
V.Ju. Kondakov, V.S. Krulov. Automated information measuring system for electric power commercial accounting official testing for type approval	218
V.Ju. Kondakov, V.S. Krulov. Methods calculation error measure electrical energy for automated information measuring system for electric power commercial accounting	223
A.S. Tolstikov, I.E. Makarov. Experiments on synchronization of the spatially carried clocks on line SNIIM-SGGA.....	228
A.A. Karaush, A.S. Tolstikov. To the choice of numerical methods of integration of the equations of movement of navigating companions	232

A.S. Tolsticov, E.A. Hanikova, N.V. Zakoruchkina. Evaluation departure on-board clock for trajectory measurements	237
A.V. Kulikov, S.A. Zagarskikh, V.T. Novoevsky, A.N. Nosov. Standart instalation for determining the horizontal and vertical angles measurement errors with surveying goniometers.....	241
A.V. Kulikov, V.T. Novoevsky, A.A. Ilyin, A.N. Nosov, K.V. Tukmachev. Calibrators for systematic error determination of the measuring system «Digital level – code rod»	246
A.V. Kulikov. A.A. Ilyin, V.T. Novoyevsky. Determination of metre intervals average length on graduate code rods with a SSGA interference comparator	250
V.V. Farmagey. Comparative description of combat knives (survival knives) of the reconnaissance units of the RF armed forces.....	254
K.V. Conorev. Sniper plotting board for delivering accurate fire	258
S.A. Arzamastsev, V.A. Lazarev. Test target for verification of fight and fight reduction to normal 9.00-mm special sniper rifle «BCC».....	262
I.V. Minin, O.V. Minin. Conformal dimensional diffractive quasi-optics: from millimeter wave to shoch wave focusing.....	265
V.A. Lazarev, A.V. Lesnoy. Overall ruler for cheking cpecialized sniper rifle combat capabilities.....	270
N.N. Antonenchik. Arms on new physical principles	273
V.S. Ayrapetyan, T.A. Shirokova. Ring resonator scheme optical parametric oscillator	278

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, инженер кафедры физики, тел. +7(383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Рассматривается задача косвенного измерения температуры зоны подложки, облучаемой импульсным лазером, заключающаяся в измерении давления звуковой волны, возникающей при нагреве атмосферы над подложкой. Давление звуковой волны, деформируя мембрану микрофона, отклоняет ее; отклонение измеряется с применением оптической двухлучевой интерференции.

Ключевые слова: мембранный микрофон, лазерное воздействие.

ACOUSTO-OPTIC SENSOR PULSE PRESSURES IN THE ATMOSPHERE

Denis V. Kochkarev

Engineer, department of physics, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

We consider the problem of measuring the temperature zone of the substrate irradiated by a pulsed laser indirect way, is to measure the pressure of sound waves are produced when heating the atmosphere above the substrate.

Key words: membranous microphone, sensor, optical fiber, multibeam interferometer, temperature measurement, laser action.

В настоящей работе рассматривается задача косвенного измерения температуры зоны подложки, облучаемой импульсным лазером, заключающаяся в измерении давления звуковой волны, возникающей при нагреве атмосферы над подложкой. Давление звуковой волны, деформируя мембрану микрофона, отклоняет ее; отклонение измеряется с применением оптической двухлучевой интерференции.

Измерения температуры поверхности подложки в зоне облучения площадью не более $20 \times 20 \text{ мкм}^2$, при длительности импульса облучения $5 \div 10 \text{ нс}$ и температуре нагрева поверхности $800 - 1500 \text{ К}$ представляет собой сложную техническую задачу. Возможные методы измерения температуры:

- По тепловому излучению тела,
- По температурному изменению отражательной способности,
- По лазерной термоиндуцированной упругой деформации облучаемого участка поверхности,
- По терморезистивному эффекту,
- По процессам в атмосфере вблизи поверхности подложки, и др.

Как показано в работе [1], при лазерном импульсном нагревании подложки в атмосфере газов при длительности импульсов порядка наносекунд приповерхностный слой атмосферы толщиной 1–5 мкм нагревается за счет теплопередачи от поверхности подложки, давление в нем возрастает, в атмосфере над подложкой возникает ударная волна. В соответствии с молекулярно-кинетической теорией газов давление над поверхностью кратковременно на время действия импульса лазерного нагревания вырастает пропорционально увеличению температуры, т.е. при начальном давлении, равном нормальному атмосферному давлению, до 2–3 атмосфер в начальный момент в слое газа толщиной примерно 1 мкм.

Фронт возбуждаемой при этом звуковой волны окажется в начале его движения параллельным поверхности подложки, при удалении от поверхности фронт принимает сферическую форму, и интенсивность колебаний на фронте волны убывает пропорционально квадрату пройденного расстояния; давление в волне изменяется обратно пропорционально расстоянию:

$$p_r \sim p_0 \frac{R}{r}, \quad (1)$$

где p_0 – амплитуда избыточного давления в облучаемой области при лазерном облучении; p_r – амплитуда давления на удалении r от поверхности; R – толщина нагреваемого энергией лазерного излучения слоя атмосферы.

Давление в звуковой волне может увеличиваться многократно при нагревании поверхности до температуры десорбции газа с поверхности и при прохождении на поверхности химических реакций с разложением реагентов и выделением газообразных продуктов реакции [1].

В качестве значений p_0 и R используем результаты расчёта ударной волны в атмосфере воздуха, возникающей при импульсном лазерном локальном нагревании подложки, выполненные в [1]. При лазерном импульсе длительностью 6 нс и мощностью $3 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ возникает ударная волна, спадающая по интенсивности с расстоянием; избыточное давление в волне $p_0 \approx 10^5 \text{ Па}$ на расстоянии $R = 2,5 \text{ мкм}$ от центра облучаемой зоны. Получим $p_0 R = 0,25 \text{ Па} \cdot \text{м}$.

Произведём оценку частоты звуковых волн, возбуждаемых в атмосфере ударной волной. Импульс лазерного излучения длительностью τ имеет колоколообразную форму; импульсы следуют с периодом T_l , длительность которого велика в сравнении с длительностью импульса τ T_l . Звуковая волна создаётся за счёт нагревания приповерхностной атмосферы от подложки, и длительность температурного импульса на поверхности равна $\tau_s \approx 10 - 15 \tau$. Если подвергнуть температурный импульс Фурье-разложению на гармонические составляющие и взять из ряда первый гармонический член $A \cos \omega_1 t$, считая A амплитудой избыточного давления в звуковой волне, то можно значение длительности температурного импульса, определённой на полувысоте, приблизительно считать равным половине периода колебаний гармонического члена ряда:

$$\tau_s \approx \frac{T_1}{2} = \frac{1}{2f_1} = \frac{\pi}{\omega_1} \quad (2)$$

Здесь ω_1 – круговая частота, T_1 – период колебаний. Таким образом, $\omega_1 = \pi / \tau_s$; $f_1 = 1 / (2\tau_s)$.

Окончательно получим, используя (1) и (2):

$$p \approx p_r \cos \omega_1 t = \frac{P_0 R}{r} \cos \left(\pi \frac{t}{\tau_s} \right) \quad (3)$$

Взаимодействие звуковой волны с измерительным преобразователем (микрофоном) зависит от отношения длины $\lambda_{зв}$ звуковой волны к поперечным размерам преобразователя. Длина звуковой волны равна:

$$\lambda_{зв} \approx c_{зв} \cdot T_1 \quad (4)$$

частота звука f_1 равна

$$f_1 \approx \frac{1}{2\tau_s}. \quad (5)$$

Здесь $c_{зв}$ – скорость звука. При длительности лазерного импульса $\tau = 6$ нс, $\tau_s = 100$ нс, $c_{зв} \approx 330$ м/с (в атмосфере воздуха при нормальных условиях), получим: $f_1 = 5 \cdot 10^6$ Гц, $\lambda_{зв} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ м. Полученное значение длины волны много меньше размера поперечника измерительного преобразователя, и эффекты дифракции звуковой волны на преобразователе можно не учитывать. Звуковую волну необходимо направить нормально к чувствительной поверхности преобразователя, то есть, фронтом волны параллельно поверхности. В противном случае фазы волны на разных участках чувствительной поверхности будут различными, что ухудшит эффективность преобразователя. Для измерения звукового давления в газах используют мембранные микрофоны. Схема устройства микрофона показана на рис. 1.

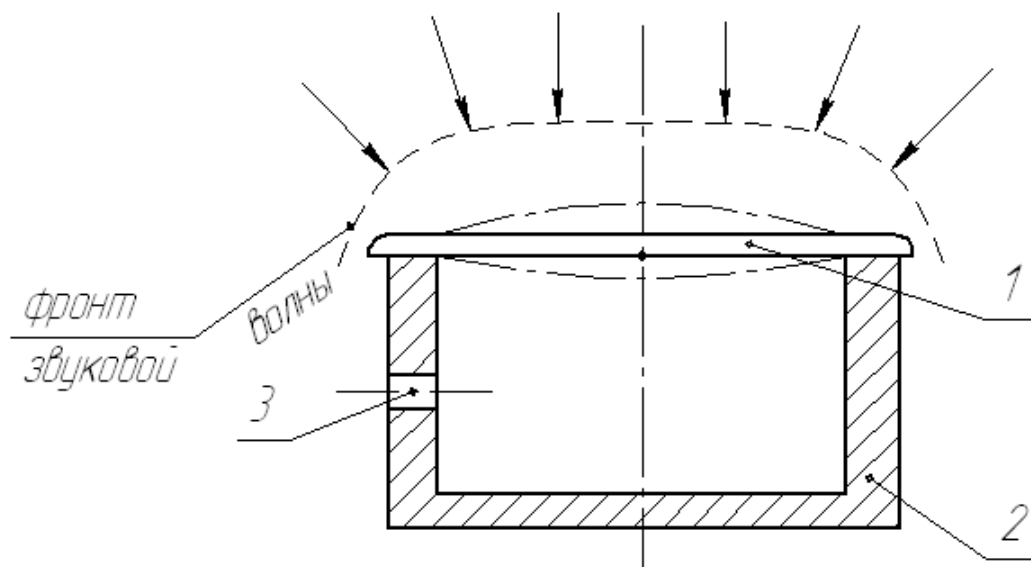


Рис. 1. Микрофон под воздействием звуковой волны:

1 – мембрана, 2 – корпус микрофона, 3 – отверстие для выравнивания давлений

При воздействии переменного давления звука мембрана испытывает колебательные движения; крайние положения мембраны обозначены на рисунке штриховыми линиями. Наибольшей чувствительностью к давлению звука, то есть, наибольшим коэффициентом преобразования звукового давления в перемещение мембраны, обладают абсолютно гибкие мембраны [2], [3]. В нашем случае важным является отсутствие в таких мембранах при малых отклонениях от положения равновесия упругих противодействий мембраны, которые обычно обеспечиваются или собственной упругостью мембраны, или упругостью, приданной ей за счёт растяжения на опорном кольце. Можно также не учитывать противодействие газовой среды за мембраной, так как перемещение мембраны, как показано ниже, много меньше длины волны звука и меньше длины свободного пробега молекул в газе.

В абсолютно гибкой мембране её средняя часть под воздействием силы давления звука ведёт себя как инертная масса, и её перемещения определяются вторым законом Ньютона:

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (6)$$

где F – сила, действующая на мембрану, m – масса движущейся части мембраны, $\frac{d^2 x}{dt^2}$ – ускорение мембраны по направлению x . Здесь сила определяется давлением звука:

$$F = S p_r \cos \omega_1 t \quad (7)$$

масса

$$m = S d \rho, \quad (8)$$

S – площадь средней части мембраны, d и ρ – толщина и плотность мембраны, соответственно. Учитывая (8) и (7), получим:

$$p_r \cos \omega_1 t = d \rho \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{p_r}{d \rho} \cos \omega_1 t.$$

Решением этого уравнения является выражение:

$$x = x_0 \cos \omega_1 t, \quad (10)$$

где

$$x_0 = \frac{p_r}{d \rho \omega_1^2} \quad (11)$$

x_0 – амплитуда колебаний мембраны.

Расчёт значения амплитуды колебаний мембраны, имеющей плотность $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, толщину $d = 10^{-7} \text{ м}$ и расположенной на расстоянии $r = 10^{-3} \text{ м}$ от фокального пятна лазерного излучения, при $p_0 R = 0,25 \text{ Па} \cdot \text{м}$ [1] и $p_r = 0,25 \cdot 10^3 \text{ Па}$ даёт результат $x_0 \approx 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Измерение такого малого значения амплитуды колебаний с помощью электростатического микрофона затруднительно.

Рассмотрим возможность использования для измерения давления в звуковой волне мембранных микрофонов с оптическим измерением перемещения мембраны под действием давления, как на рис. 2.

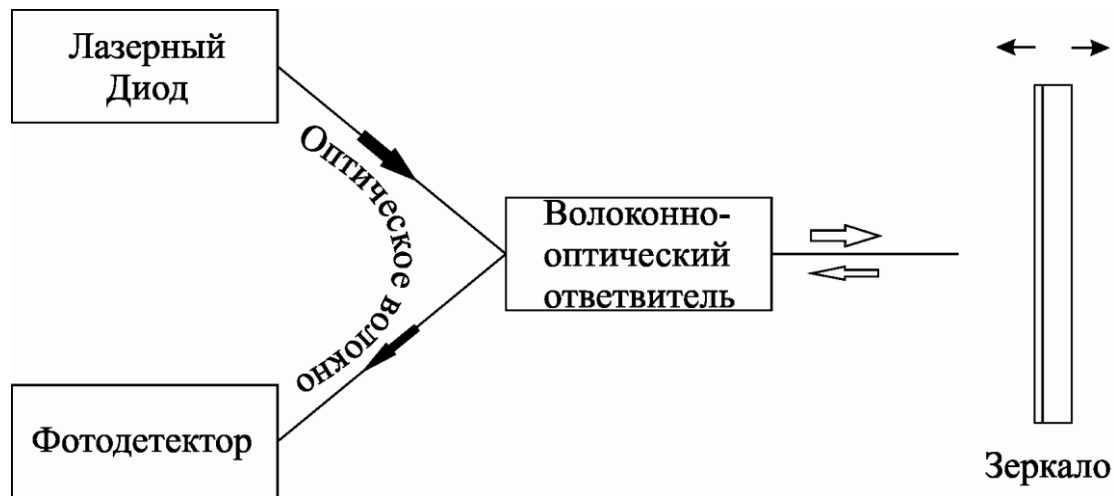


Рис. 2. Акустооптический датчик давления

Принцип действия оптического микрофона состоит в следующем. Излучение лазерного диода водится в оптическое волокно и, проходя через волоконный разветвитель, достигает сенсора, в качестве которого используется двухлучевой интерферометр. Зеркалами интерферометра являются торец оптического волокна и металлизированная мембрана. При этом часть излучения (опорный сигнал) отражается от торца волокна, а другая его часть (измеряемый), отражаясь от зеркала, возвращается обратно в оптоволокно. Оба излучения интерферируют между собой, что фиксируется фотодетектором в виде изменения интенсивности излучения при изменении расстояния d между торцом волокна и мембраной:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(4\pi \frac{d}{\lambda}\right), \quad (12)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности излучений, отраженного от торца волокна и возвращенного в волокно после отражения от зеркала, соответственно;

λ – длина волны излучения лазера.

$$I_1 = R_1 I_0, \quad (13)$$

$$I_2 = (1 - R_1)^2 R T(d) I_0, \quad (14)$$

где I_0 – интенсивность излучения, подводимого к торцу волокна;

R_1 и R – коэффициенты отражения торца волокна и зеркала, соответственно;

$T(d)$ – потери, возникающие из-за расходимости излучения в свободном пространстве и зависящие от расстояния d .

Видность интерференционной картины определяется соотношением

$$V = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}. \quad (15)$$

Из формулы видно, что полезный сигнал будет наибольшим в случае равенства интенсивностей I_1 и I_2 интерферирующих лучей, т.е. при некотором оптимальном расстоянии d или при оптимальных коэффициентах отражения. В случае равенства интенсивностей интерферирующих лучей уравнение (14) упрощается:

$$I = 2I_1 \left(1 + \cos\left(4\pi \frac{d}{\lambda}\right) \right). \quad (16)$$

При попадании звуковой волны на мембрану последняя приходит в колебательное движение, и расстояние между зеркалами интерферометра изменяется по закону:

$$d = d_0 + x_0 \cos \omega_1 t, \quad (17)$$

где d_0 - расстояние между зеркалами при их неподвижном состоянии.

Примем, что $d_0 = m \frac{\lambda}{2}$, где m - целое число. Подставив последнее выражение в (17) и (16), получим:

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(4\pi \frac{x_0 \cos \omega_1 t}{\lambda}\right) \right). \quad (18)$$

Принимая значение аргумента косинуса малой в сравнении с $\pi/2$ величиной, представим косинус первыми двумя членами разложения его в ряд. Для амплитуды переменной составляющей интенсивности можно найти выражение:

$$I_{\square} = 2I_0 \left(2\pi \frac{x_0}{\lambda} \right)^2 = 16\pi^2 I_0 \left(\frac{x_0}{\lambda} \right)^2. \quad (19)$$

Подставим в уравнение (19) найденное выше значение x_0 и примем, что $\lambda = 1$ мкм; получим $I_{\square} / I_0 = 2 \cdot 10^{-3}$. Учитывая (19) и (18), найдём чувствительность микрофона к воздействию звуковых волн:

$$S = \frac{I_{\square} / I_0}{p_r} = \frac{16\pi^2 x_0^2}{p_r \lambda^2} = \frac{16\pi^2 p_r}{\lambda^2 d^2 \rho^2 \omega_1^4}. \quad (20)$$

Для вычисленных выше значений параметров микрофона его чувствительность равна $S = 4 \cdot 10^{-6}$ (отн. единиц)/Па на частоте сигнала $f_1 = 5 \cdot 10^6$ Гц.

Таким образом, представлен анализ работы оптоволоконного оптического микрофона, предназначенного для измерения возникающих при импульсном лазерном нагревании подложек в процессе осаждения тонких плёнок звуковых волн в атмосфере на частоте порядка нескольких МГц и позволяющего решать задачу косвенного измерения индуцированной излучением температуры подложки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д.В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003.

2. Феодосьев В.И. Упругие элементы точного приборостроения, теоретическая часть. –М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1949.
3. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е. С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 2. – М.: Мир, 1992.

© Д.В. Кочкарев, 2012

АБЕРРАЦИИ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ОБЪЕМНОГО ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Юрий Цыдыпович Батомункуев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, e-mail: opttechnic@mail.ru

Представлены выражения коэффициентов аберраций седьмого и девятого порядков объемного голограммного оптического элемента. Показана необходимость учета аберраций девятого порядка для голограммных оптических элементов с относительным отверстием больше 1:1. Отмечается, что изменением температуры могут быть скорректированы отдельные типы аберраций.

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, аберрации высших порядков, деформационные аберрации.

HIGHER-ORDER ABERRATIONS OF VOLUME HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

Yuri Ts. Batomunkuev

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation, associate professor, e-mail: opttechnic@mail.ru

The formulas for coefficients of the seventh and ninth order aberrations for volume holographic optical element are presented. It is shown that aberrations of the ninth order for holographic optical element with relative aperture greater than 1:1 are necessary taken into account. It is noted that same types of aberrations can be corrected by change of temperature.

Key words: holographic optical element, higher-order aberrations, deformation aberrations.

Известно, что фокусное расстояние голограммного оптического элемента (ГОЭ) очень быстро уменьшается при увеличении рабочей длины волны. При этом возрастает величина относительного отверстия ГОЭ, что приводит к росту аберраций высших порядков. Также известно, что для светосильного тонкого ГОЭ возможно исправление сферических аберраций третьего, пятого и седьмого порядков [1-3]. Выражения коэффициентов аберраций высших порядков тонкого ГОЭ представлены в [4,5]. Однако при расчете аберраций объемного ГОЭ требуется учитывать его толщину и селективные свойства [6,7]. Целью работы является расчет аберраций высших порядков объемного ГОЭ с относительным отверстием 1:1 и более.

На рис. 1а представлена рабочая схема пропускающего объемного ГОЭ, где $P_c(x_c, y_c, z_c)$ – точка предмета, $P_i(x_i, y_i, z_i)$ – соответствующая ей точка изображения, $M(x, y, z)$ – произвольная точка объемного ГОЭ. Ось Oz декартовой системы координат на рисунке 1 является оптической осью и направлена перпендикулярно поверхностям ГОЭ. Плоскость координат xOy проходит через центр ГОЭ. На рис. 1б представлена схема записи объемного пропускающего ГОЭ опорной и объектной сферическими волнами, где $P_r(0, 0, z_r)$ – точечный

источник опорной (референтной) волны, $P_o(0,0,z_o)$ – точечный источник объектной волны, $M'(x',y',z')$ – точка объема ГОЭ при записи, соответствующая точке $M(x,y,z)$ при использовании. Обозначим расстояния в рабочей схеме как: $P_c M = l_c$, $M P_i = l_i$, а расстояния, указанные в схеме записи, как: $P_r M' = l_r$, $M' P_o = l_o$, где $x' = x/m_x$, $y' = y/m_y$, $z' = z/m_z$ (m_x , m_y , m_z – коэффициенты усадки или набухания объемного ГОЭ вдоль соответствующих осей декартовой системы координат).

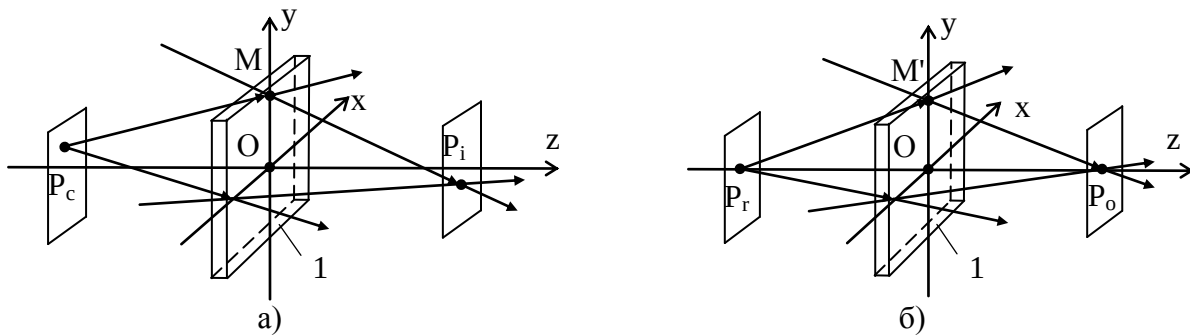


Рис. 1. Рабочая схема (а) и схема записи (б) пропускающего объемного ГОЭ

Для объемного осевого ГОЭ характеристическая функция $V(x,y,z)$ записывается в виде [4]

$$V(x,y,z) = l_c - z_c \pm (l_i - z_i) - km(x,y,z)\lambda_c/n_c, \quad (1)$$

где $m(x,y,z) = n_o(l_r - z_r \pm (l_o - z_o))/\lambda_o$ – количество периодов пространственного распределения модуляции показателя преломления, коэффициента поглощения или толщины объемного ГОЭ; n_o и n_c – начальное и среднее конечное значения показателя преломления; λ_o – длина волны лазера, используемого при записи; λ_c – рабочая длина волны; k – порядок дифракции.

В силу пространственной и угловой селективности объемных ГОЭ практический интерес представляет случай, когда поперечные размеры (диаметр) объемного ГОЭ намного меньше расстояний z_c , z_i до плоскостей предмета и изображения, но больше размеров предмета и изображения. Кроме этого считаем, что при записи отклонение от оптической оси источников опорной и объектной волн меньше поперечных размеров объемного ГОЭ, а размеры ГОЭ много меньше расстояний z_r , z_o от нее до источников опорной и объектной волн. Также считаем, что толщина ГОЭ много меньше расстояний z_r , z_o . Выражения для расстояний l_c могут быть разложены в ряд по величинам малости x_c/z_c , y_c/z_c , x/z_c , y/z_c , z/z_c , а выражения для расстояния l_r – по величинам малости x_r/z_r , y_r/z_r , x/z_r , y/z_r , z/z_r . Аналогичным образом, разлагая выражения для расстояний l_i , l_o и подставляя в характеристическую функцию (1), получаем

$$V(x,y,z) = V_{1t}(x,y) + V_{1v}(x,y,z) + V_{3t}(x,y) + V_{3v}(x,y,z) + \\ + V_{5t}(x,y) + V_{5v}(x,y,z) + V_{7t}(x,y) + V_{7v}(x,y,z) + V_{9t}(x,y) + V_{9v}(x,y,z) + \dots, \quad (2)$$

где $V_{1t}(x,y) = x^2 F_{200}/2 + y^2 F_{020}/2 - xB_{100} - yB_{010}$ – члены разложения, характеризующие аберрации первого порядка тонкого осевого ГОЭ;

$V_{1v}(x,y,z) = (x^2/2)(zF_{201} + z^2F_{202}) + (y^2/2)(zF_{021} + z^2F_{022}) - xzB_{101} - xz^2B_{102} - yzB_{011} - yz^2B_{012}$ – члены разложения, характеризующие объемные aberrации первого порядка;

$$V_{3t}(x,y) = - (x^4/8)S_{400} - (x^2y^2/4)S_{220} - (y^4/8)S_{040} + (x^3/2)C_{300} + (x^2y/2)C_{210} + (y^2x/2)C_{120} + (y^3/2)C_{030} - (x^2/2)A_{200} - xyA_{110} - (y^2/2)A_{020} - (x^2/4)(E_{200} - (y^2/4)E_{020} - (x/2)D_{100} - (y/2)D_{010}) \quad (3)$$

– члены разложения, характеризующие aberrации третьего порядка тонкого осевого ГОЭ;

$$V_{3v}(x,y,z) = - (x^4/8)(3zS_{401} + 6z^2S_{402}) - (x^2y^2/4)(3zS_{221} + 6z^2S_{222}) - (y^4/8)(3zS_{041} + 6z^2S_{042}) + (x^3/2)(3zC_{301} + 6z^2C_{302}) + (x^2y/2)(3zC_{211} + 6z^2C_{212}) + (xy^2/2)(3zC_{121} + 6z^2C_{122}) + (y^3/2)(3zC_{031} + 6z^2C_{032}) - (x^2/2)(3zA_{201} + 6z^2A_{202}) - xy(3zA_{111} + 6z^2A_{112}) - (y^2/2)(3zA_{021} + 6z^2A_{022}) - (x^2/4)(3zE_{201} + 6z^2E_{202}) - (y^2/4)(3zE_{021} + 6z^2E_{022}) + (x/2)(3zD_{101} + 6z^2D_{102}) + (y/2)(3zD_{011} + 6z^2D_{012}) \quad (4)$$

$V_{5t}(x,y)$, $V_{7t}(x,y)$, $V_{9t}(x,y)$ – члены разложения, характеризующие aberrации пятого, седьмого и девятого порядков тонкого осевого ГОЭ;

$V_{5v}(x,y,z)$, $V_{7v}(x,y,z)$, $V_{9v}(x,y,z)$ – члены разложения, характеризующие объемные aberrации пятого, седьмого и девятого порядков.

В отличие от [3] в выражении (2) характеристическая функция $V(x,y,z)$ представлена в виде суммы членов разложения, соответствующих разным порядкам aberrаций, причем в явном виде выделены типы объемных aberrаций. По сравнению с характеристической функцией тонкого ГОЭ, в (2) учтены толщина, изменения толщины (усадка), изменение размеров и изменение показателя преломления объемного ГОЭ. По аналогии с известными aberrационными коэффициентами тонкого ГОЭ aberrационные коэффициенты в $V_{3t}(x,y)$, $V_{3v}(x,y,z)$ соответствуют следующим типам aberrаций третьего порядка [3]: S_{ijk} – сферической aberrации, C_{ijk} – коме, A_{ijk} – астигматизму, E_{ijk} – кривизне поверхности изображения, D_{ijk} – дисторсии, где индексы i,j,k совпадают с соответствующими индексами aberrационных коэффициентов. Индексы i,j,k также совпадают соответственно с показателями степени переменных x, y, z в $V_{3t}(x,y)$, $V_{3v}(x,y,z)$. Аналитические выражения членов разложения $V_{5t}(x,y)$, $V_{5v}(x,y,z)$, $V_{7t}(x,y)$, $V_{7v}(x,y,z)$, $V_{9t}(x,y)$, $V_{9v}(x,y,z)$ и их коэффициентов aberrаций приведены в приложении. Выражения для коэффициентов при индексе $k = 0$ совпадают с известными выражениями коэффициентов aberrаций высших порядков тонкого ГОЭ [3-5].

На рис. 2 представлены расчетные значения первых сферических aberrаций седьмого (пунктирная линия) и девятого (сплошная линия) порядков объемного ГОЭ с относительным отверстием примерно 1:1 на рабочей длине волны 532 нм. Радиус сферической aberrации девятого порядка превышает aberrацию седьмого порядка. Таким образом, при расчете объемных ГОЭ с относительным отверстием 1:1 и более требуется учитывать aberrации девятого порядка.

В выражениях коэффициентов aberrаций в явном виде можно выделить составляющие монохроматической и хроматической aberrаций и aberrаций, возникающих из-за изменения среднего показателя преломления и размеров объемного ГОЭ, в том числе фотоиндуцированных и термоиндуцированных aberrаций. Так, средний показатель преломления n_c объемного ГОЭ может быть представлен в виде [8]

$$n_c = n_o + \Delta n_f + \Delta n_t + \Delta n_d,$$

где n_o – начальное значение показателя преломления, Δn_f и Δn_t – фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения показателя преломления, Δn_d – изменение показателя преломления из-за деформации объемного ГОЭ.

Изменение размеров голограммного элемента вдоль каждой из осей системы координат может быть представлено в виде коэффициента [8]

$$m = 1 + \Delta m_f + \Delta m_t + \Delta m_d,$$

где Δm_f , Δm_t – относительные фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения размеров, Δm_d – относительное изменение размеров из-за деформации объемного ГОЭ.

Известно, что в отличие от тонкого ГОЭ при расчете aberrаций объемного ГОЭ необходимо учитывать его селективность [3]. В первом приближении координаты (x, y) крайних от оптической оси точек падения лучей, для которых выполняется условие локальной селективности, в зависимости от величины коэффициентов объемных монохроматических aberrаций и толщины голографической среды определяются в непараксиальной области для объемного осевого ГОЭ из формул

$$\begin{aligned} x &= (\xi_x \lambda_c / (3\pi z S_{401}/8 + 3\pi z^2 S_{402}/4))^{1/4}, \\ y &= (\xi_y \lambda_c / (3\pi z S_{041}/8 + 3\pi z^2 S_{042}/4))^{1/4}. \end{aligned} \quad (5)$$

При оценочных расчетах локальные величины ξ_x и ξ_y можно принять равными приблизительно π .

Из характеристической функции $V(x, y, z)$ объемного ГОЭ могут быть определены геометрические aberrации Δx , Δy точек изображения по известным формулам

$$\Delta x \approx z_i (\partial V(x, y, z) / \partial x),$$

$$\Delta y \approx z_i (\partial V(x, y, z) / \partial y).$$

Величины aberrаций Δx , Δy рассчитываются с учетом (5). При этом получаем, что дисторсия не зависит от поперечных размеров и селективности объемного ГОЭ. Отметим что, селективность объемного ГОЭ приводит к уменьшению всех aberrаций по сравнению с соответствующими aberrациями тонкого ГОЭ из-за уменьшения объема ГОЭ, в котором еще выполняется

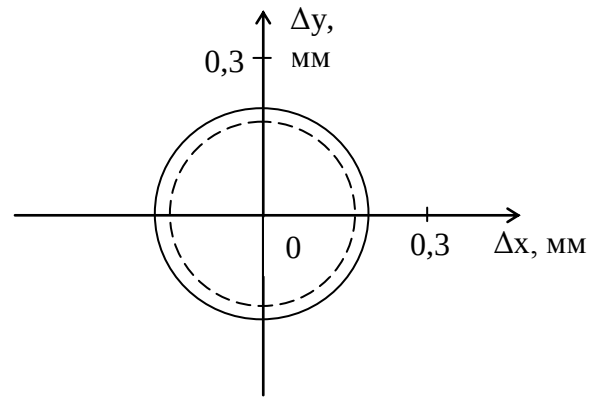


Рис. 2. Сферическая aberrация седьмого и девятого порядков

условие дифракции Брэгга. Аналогичным образом могут быть получены выражения для геометрических aberrаций пятого порядка и более высших порядков.

Выражения, описывающие геометрические хроматические aberrации, то есть отклонение координат лучей в плоскости изображения на величины Δx_λ , Δz_λ от параксиальной точки изображения могут быть получены вычислением частных производных по длине волны λ_c из выражений для Δx и Δz

$$\begin{aligned}\Delta x_\lambda &= (\partial(\Delta x)/\partial\lambda_c)\Delta\lambda_c, \\ \Delta z_\lambda &= (\partial(\Delta z)/\partial\lambda_c)\Delta\lambda_c,\end{aligned}\quad (6)$$

где $\Delta\lambda_c$ – изменение рабочей длины волны объемного осевого ГОЭ от заданного значения. Отметим, что при рассмотрении aberrаций первого и третьего порядков объемного осевого ГОЭ от рабочей длины волны λ_c в явном виде зависят только коэффициенты F_{ijk} и S_{ijk} . Из (6), следует, что хроматические aberrации объемного ГОЭ складываются из хроматических aberrаций тонкого ГОЭ и объемной хроматической aberrации, зависящей от толщины ГОЭ. Объемная хроматическая aberrация зависит от толщины ГОЭ в первом приближении обратно пропорционально.

Выражения, описывающие геометрические деформационные aberrации Δx_d , Δy_d объемного осевого ГОЭ, могут быть получены из Δx и Δy вычислением частных производных по напряжению σ

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= (\partial(\Delta x)/\partial\sigma)\Delta\sigma, \\ \Delta y_d &= (\partial(\Delta y)/\partial\sigma)\Delta\sigma,\end{aligned}\quad (7)$$

где $\Delta\sigma$ – изменение механического напряжения в объеме ГОЭ.

Из (7) получаем следующие выражения для определения изменения координат Δx_d , Δy_d , Δz_d луча в плоскости изображения из-за изменения на $\Delta\sigma$ механического напряжения объемного осевого ГОЭ:

1) при деформационной aberrации положения

$$\begin{aligned}\Delta z_d &= (\partial z_i/\partial\sigma)\Delta\sigma = (k\mu/m_x^2)(1/z_r \pm 1/z_o)(2\Delta m_{x,d}/m_x + \Delta n_d/n_o)z_i^2, \\ \Delta z_d &= (\partial z_i/\partial\sigma)\Delta\sigma = (k\mu/m_y^2)(1/z_r \pm 1/z_o)(2\Delta m_{y,d}/m_y + \Delta n_d/n_o)z_i^2,\end{aligned}$$

2) при деформационной aberrации увеличения

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= (B_{100} + zB_{101} + z^2B_{102})\Delta z_d, \\ \Delta y_d &= (B_{010} + zB_{011} + z^2B_{012})\Delta z_d,\end{aligned}$$

3) при деформационной дефокусировке

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= (\partial F_{200}/\partial\sigma + z\partial F_{201}/\partial\sigma + z^2\partial F_{202}/\partial\sigma)xz_i\Delta\sigma + (F_{200} + zF_{201} + z^2F_{202})x\Delta z_d, \\ \Delta y_d &= (\partial F_{020}/\partial\sigma + z\partial F_{021}/\partial\sigma + z^2\partial F_{022}/\partial\sigma)yz_i\Delta\sigma + (F_{200} + zF_{021} + z^2F_{022})y\Delta z_d,\end{aligned}$$

где $\partial F_{200}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r \pm 1/z_o)(2\Delta m_{x,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

$\partial F_{201}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r^2 \pm 1/z_o^2)(2\Delta m_{x,d} + \Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

$\partial F_{202}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r^3 \pm 1/z_o^3)(2\Delta m_{x,d} + 2\Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

$\partial F_{020}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r \pm 1/z_o)(2\Delta m_{y,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

$\partial F_{021}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r^2 \pm 1/z_o^2)(2\Delta m_{y,d} + \Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

$\partial F_{022}/\partial\sigma = k\mu(1/z_r^3 \pm 1/z_o^3)(2\Delta m_{y,d} + 2\Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta\sigma$;

4) при деформационной сферической aberrации третьего порядка

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= (\partial S_{400}/\partial\sigma + 3z\partial S_{401}/\partial\sigma + 6z^2\partial S_{402}/\partial\sigma)x^3z_i\Delta\sigma/2 + \\ &+ (S_{400} + 3zS_{401} + 6z^2S_{402})x^3\Delta z_d/2 + \\ &+ (\partial S_{220}/\partial\sigma + 3z\partial S_{221}/\partial\sigma + 6z^2\partial S_{222}/\partial\sigma)xy^2z_i\Delta\sigma/2 + (S_{220} + 3zS_{221} +\end{aligned}$$

$$+ 6z^2S_{222})xy^2\Delta z_d/2,$$

$$\Delta y_d = (\partial S_{040}/\partial \sigma + 3z\partial S_{041}/\partial \sigma + 6z^2\partial S_{042}/\partial \sigma)y^3z_i\Delta \sigma/2 +$$

$$+ (S_{400} + 3zS_{041} + 6z^2S_{042})y^3\Delta z_d/2 +$$

$$+ (\partial S_{220}/\partial \sigma + 3z\partial S_{221}/\partial \sigma + 6z^2\partial S_{222}/\partial \sigma)yx^2z_i\Delta \sigma/2 + (S_{220} + 3zS_{221} +$$

$$+ 6z^2S_{222})yx^2\Delta z_d/2,$$

$$\text{где } \partial S_{400}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^3 \pm 1/z_o^3)(4\Delta m_{x,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

$$\partial S_{401}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^4 \pm 1/z_o^4)(4\Delta m_{x,d} + \Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

$$\partial S_{402}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^5 \pm 1/z_o^5)(4\Delta m_{x,d} + 2\Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

$$\partial S_{040}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^3 \pm 1/z_o^3)(4\Delta m_{y,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

$$\partial S_{041}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^4 \pm 1/z_o^4)(4\Delta m_{y,d} + \Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

$$\partial S_{042}/\partial \sigma = k\mu(1/z_r^5 \pm 1/z_o^5)(4\Delta m_{y,d} + 2\Delta m_{z,d} + \Delta n_d/n_o)/\Delta \sigma;$$

5) при деформационной коме третьего порядка

$$\Delta x_d = 3(C_{300} + 3zC_{301} + 6z^2C_{302})x^2\Delta z_d/2 + (C_{210} + 3zC_{211} + 6z^2C_{212})xy\Delta z_d +$$

$$+ (C_{120} + 3zC_{121} + 6z^2C_{122})y^2\Delta z_d/2,$$

$$\Delta y_d = (C_{210} + 3zC_{211} + 6z^2C_{212})x^2\Delta z_d/2 + (C_{120} + 3zC_{121} + 6z^2C_{122})xy\Delta z_d +$$

$$+ 3(C_{030} + 3zC_{031} + 6z^2C_{032})y^2\Delta z_d/2;$$

6) при деформационном астигматизме третьего порядка

$$\Delta x_d = (A_{200} + 3zA_{201} + 6z^2A_{202})x\Delta z_d + (A_{110} + 3zA_{111} + 6z^2A_{112})y\Delta z_d,$$

$$\Delta y_d = (A_{110} + 3zA_{111} + 6z^2A_{112})x\Delta z_d + (A_{020} + 3zA_{021} + 6z^2A_{022})y\Delta z_d;$$

7) при деформационной кривизне поверхности изображения третьего порядка

$$\Delta x_d = (E_{200} + 3zE_{201} + 6z^2E_{202})x\Delta z_d/2,$$

$$\Delta y_d = (E_{200} + 3zE_{201} + 6z^2E_{202})y\Delta z_d/2;$$

8) при деформационной дисторсии третьего порядка

$$\Delta x_d = (D_{100} + 3zD_{101} + 6z^2D_{102})\Delta z_d/2,$$

$$\Delta y_d = (D_{100} + 3zD_{101} + 6z^2D_{102})\Delta z_d/2.$$

Отметим, что величина дисторсии не зависит от размеров объемного осевого ГОЭ и определяется величиной деформационной аберрации положения Δz_d .

Важность получения аналитических выражений деформационной аберрации объемного ГОЭ заключается в том, что они позволяют получить количественные величины этих аберраций, сравнить их с заданными допустимыми погрешностями. Аналитические выражения для расчета термоиндуцированных и фотоиндуцированных аберраций могут быть получены из выражений для деформационных аберраций заменой в них деформационных изменений показателя преломления и коэффициента усадки на соответствующие фотоиндуцированные и термоиндуцированные изменения.

Полученные в явном виде выражения коэффициентов аберрации позволяют выявить новые возможности компенсации фотоиндуцированных, термоиндуцированных и деформационных аберраций и установить более оптимальные условия использования объемных ГОЭ. Так, например, фотоиндуцированная, термоиндуцированная и деформационная сферические аберрации взаимно компенсируются при изменении температуры на величину

$$\Delta T = [\pm(1/z_c^{i+j+k-1} - 1/z_i^{i+j+k-1})/(\lambda_c/\lambda_o + \Delta\lambda_c/\lambda_o)(1/z_r^{i+j+k-1} - 1/z_o^{i+j+k-1}) + 1 -$$

$$i(\Delta m_{x,f} + \Delta m_{x,d}) - j(\Delta m_{y,f} + \Delta m_{y,d}) - k(\Delta m_{z,f} + \Delta m_{z,d}) - \Delta n_{c,f}/n_o -$$

$$-\Delta n_{c,d}/n_o]/(i\alpha_x + j\alpha_y + k\alpha_z + \partial n_{c,f}/n_o \partial T + \partial n_{c,d}/n_o \partial T), \quad (8)$$

где $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – коэффициенты температурного расширения вдоль осей Ox, Oy, Oz ; $\partial n_{c,f}/n_o \partial T$ – фотоиндуцированный термооптический коэффициент объемного осевого ГОЭ; $\partial n_{c,d}/n_o \partial T$ – деформационный термооптический коэффициент объемного осевого ГОЭ; $\Delta m_{x,f}, \Delta m_{x,d}, \Delta m_{y,f}, \Delta m_{y,d}, \Delta m_{z,f}, \Delta m_{z,d}$ – фотоиндуцированное и деформационное изменения коэффициента усадки относительно осей Ox, Oy, Oz ; $\Delta n_{c,f}, \Delta n_{c,d}$ – фотоиндуцированное и деформационное изменения показателя преломления.

Формула (8) может быть использована и локально при неоднородном изменении показателя преломления и усадки ГОЭ. В этом случае требуется формирование соответствующего пространственного поля температур $\Delta T(x,y,z)$ в объеме ГОЭ.

Таким образом, в работе получены выражения коэффициентов объемных aberrаций седьмого и девятого порядков объемного голограммного оптического элемента. Показана необходимость учета aberrаций девятого порядка для голограммных оптических элементов с относительным отверстием больше 1:1. В явном виде выделены деформационные aberrации объемного голограммного оптического элемента. Получено, выражение, для вычисления температуры, при которой могут быть скорректированы отдельные типы aberrаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meier R.W. Magnification and third-order aberration in holography // JOSA.1965.V. 55. P. 987-992.
2. Latta J.N. Fifth-Order Hologram Aberrations // Appl. Optics. – 1971. – V. 10, N 3. – P. 666–667.
3. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л., ГОИ. 1984. 140 с.
4. Mehta P.S., Rao K., Syam Sunder, Hradaynath R. Higher order aberrations in holographic lenses / Appl. Opt.1982.V. 21, № 24. P. 4553–4558.
5. Rebordão J.M. General form for aberration coefficients in holography // J. Opt. Soc. Am. A. 1984. V.1. N. 7. P. 788-790.
6. Forshaw M.R.B. The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms // Opt. Acta.1973.V. 20, № 9. P. 669–686.
7. Батомункуев Ю.Ц., Сандер Е.А., Шойдин С.А. Абerrации объемных голограмм // Тезисы Всесоюзного семинара "Автоматизация проектирования оптических систем"(26 - 28 октября 1988 г. Москва).– М., 1989.–С.101–112.
8. Батомункуев Ю.Ц. Особенности aberrаций рентгеновского голограммного элемента / Сб. трудов VI Международной конференции «ГОЛОГРАФИЯ ЭКСПО-2009». – Киев, 2009. – С.151-154.

Приложение

Члены разложения пятого порядка характеристической функции объемного ГОЭ

$$V_{5t}(x,y) = (S_{600}x^6 + 3S_{420}x^4y^2 + 3S_{240}x^2y^4 + S_{060}y^6)/16 + 3(S_{400}x^4 + 2S_{220}x^2y^2 + S_{040}y^4)/16 - \\ - 3(C_{500}x^5 + 2C_{320}x^3y^2 + C_{140}xy^4 + C_{410}x^4y + 2C_{230}x^2y^3 + C_{050}y^5)/8 - \\ - 3(C_{300}x^3 + C_{210}x^2y + C_{120}xy^2 + C_{030}y^3)/4 + 3(A_{200}x^2 + 2A_{110}xy + A_{020}y^2)/4 + \\ + 3(E_{200}x^2 + E_{020}y^2)/16 - 3(D_{100}x + D_{010}y)/8 + \\ + 3(P_{400}x^4 + P_{220}x^2y^2 + 2P_{310}x^3y + 2P_{130}xy^3 + P_{040}y^4)/4 - \\ (Z_{300}x^3 + 3Z_{210}x^2y + 3Z_{120}xy^2 + Z_{030}y^3)/2,$$

$$V_{5v}(x,y,z) = 5z(S_{601}x^6 + 3S_{421}x^4y^2 + 3S_{241}x^2y^4 + S_{061}y^6)/16 + \\ + 15z(S_{401}x^4 + 2S_{221}x^2y^2 + S_{041}y^4)/16 - \\ - 15z(C_{501}x^5 + 2C_{321}x^3y^2 + C_{141}xy^4 + C_{411}x^4y + 2C_{231}x^2y^3 + C_{051}y^5)/8 - \\ - 15z(C_{301}x^3 + C_{211}x^2y + C_{121}xy^2 + C_{031}y^3)/4 + \\ + 15z(A_{201}x^2 + 2A_{111}xy + A_{021}y^2)/4 + 15z(E_{201}x^2 + E_{021}y^2)/16 - \\ - 15z(D_{101}x + D_{011}y)/8 + \\ + 15z(P_{401}x^4 + P_{221}x^2y^2 + 2P_{311}x^3y + 2P_{131}xy^3 + P_{041}y^4)/4 + \\ 5z(Z_{301}x^3 + 3Z_{211}x^2y + 3Z_{121}xy^2 + Z_{031}y^3)/2,$$

где коэффициенты аберраций пятого порядка объемного осевого ГОЭ:

$$S_{ijk} = 1/z_c^{5+k} \pm 1/z_i^{5+k} - (k\mu/m_x^i m_y^j m_z^k)(1/z_r^{5+k} \pm 1/z_o^{5+k}) \quad (ijk = 600; 601; 060; 061; 420; 421, 240, 241),$$

$$S_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{5+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{5+k} \quad (ijk = 400; 401; 040; 041; 220; 221),$$

$$C_{ijk} = x_c(x_c^2 + y_c^2)^{(5-i-j)/2}/z_c^{5+k} \pm x_i(x_i^2 + y_i^2)^{(5-i-j)/2}/z_i^{5+k} \quad (ijk = 500; 501; 320; 321; 140; 141; 300; 301; 210; 211),$$

$$C_{ijk} = y_c(x_c^2 + y_c^2)^{(5-i-j)/2}/z_c^{5+k} \pm y_i(x_i^2 + y_i^2)^{(5-i-j)/2}/z_i^{5+k} \quad (ijk = 050; 051; 230; 231; 410; 411; 030; 031; 120; 121),$$

$$A_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{5+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{5+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021; 110; 111),$$

$$E_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)^2/z_c^{5+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^2/z_i^{5+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021),$$

$$D_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^2/z_c^{5+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^2/z_i^{5+k} \quad (ijk = 100; 101; 010; 011),$$

$$P_{ijk} = x_c^{i/2} y_c^{j/2}/z_c^{5+k} \pm x_i^{i/2} y_i^{j/2}/z_i^{5+k} \quad (ijk = 400; 401; 040; 041),$$

$$P_{ijk} = x_c y_c/z_c^{5+k} \pm x_i y_i/z_i^{5+k} \quad (ijk = 310; 311; 130; 131),$$

$$P_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{5+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{5+k} \quad (ijk = 220; 221),$$

$$Z_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^{4-i-j}/z_c^{5+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^{4-i-j}/z_i^{5+k} \quad (ijk = 300; 301; 210; 211; 120; 121; 030; 031).$$

Члены разложения седьмого порядка характеристической функции объемного ГОЭ

$$V_{7t}(x,y) = -5(S_{800}x^8 + 4S_{620}x^6y^2 + 6S_{440}x^4y^4 + 4S_{260}x^2y^6 + S_{080}y^8)/128 - \\ - 5(S_{600}x^6 + 3S_{420}x^4y^2 + 3S_{240}x^2y^4 + S_{060}y^6)/32 - 15(S_{400}x^4 + 2S_{220}x^2y^2 + S_{040}y^4)/64 - \\ + 5(C_{700}x^7 + 3C_{520}x^5y^2 + 3C_{340}x^3y^4 + C_{160}xy^6 + C_{610}x^6y + 3C_{430}x^4y^3 + 3C_{250}x^2y^5 + C_{070}y^7)/16 + \\ + 15(C_{500}x^5 + C_{410}x^4y + 2C_{320}x^3y^2 + 2C_{230}x^2y^3 + C_{140}xy^4 + C_{050}y^5)/16 + \\ + 15(C_{300}x^3 + C_{210}x^2y + C_{120}xy^2 + C_{030}y^3)/16 - \\ - 15(A_{200}x^2 + 2A_{110}xy + A_{020}y^2)/16 - 5(E_{200}x^2 + E_{020}y^2)/32 + 5(D_{100}x + D_{010}y)/16 - \\ - 15(P_{600}x^6 + 2P_{510}x^5y + P_{420}x^4y^2 + 2P_{420}x^4y^2 + 4P_{330}x^3y^3 + 2P_{240}x^2y^4 + P_{240}x^2y^4 + 2P_{150}xy^5 + \\ + P_{060}y^6)/16 + 5(P_{500}x^5 + 3P_{410}x^4y + P_{320}x^3y^2 + P_{230}x^2y^3 + 3P_{140}xy^4 + P_{050}y^5)/4 - \\ - 15(P_{400}x^4 + 2P_{310}x^3y + P_{220}x^2y^2 + 2P_{130}xy^3 + P_{040}y^4)/8 - \\ - 5(Z_{400}x^4 + 4Z_{310}x^3y + 6Z_{220}x^2y^2 + 4Z_{130}xy^3 + Z_{040}y^4)/8 + \\ + 5(Z_{300}x^3 + 3Z_{210}x^2y + 3Z_{120}xy^2 + Z_{030}y^3)/4,$$

$$V_{7v}(x,y,z) = -35z(S_{801}x^8 + 4S_{621}x^6y^2 + 6S_{441}x^4y^4 + 4S_{261}x^2y^6 + S_{081}y^8)/128 - \\ - 35z(S_{601}x^6 + 3S_{421}x^4y^2 + 3S_{241}x^2y^4 + S_{061}y^6)/32 - 105z(S_{401}x^4 + 2S_{221}x^2y^2 + S_{041}y^4)/64 - \\ + 35z(C_{701}x^7 + 3C_{521}x^5y^2 + 3C_{341}x^3y^4 + C_{161}xy^6 + C_{611}x^6y + 3C_{431}x^4y^3 + 3C_{251}x^2y^5 + C_{071}y^7)/16 + \\ + 105z(C_{501}x^5 + C_{411}x^4y + 2C_{321}x^3y^2 + 2C_{231}x^2y^3 + C_{141}xy^4 + C_{051}y^5)/16 + \\ + 105z(C_{301}x^3 + C_{211}x^2y + C_{121}xy^2 + C_{031}y^3)/16 - \\ - 105z(A_{201}x^2 + 2A_{111}xy + A_{021}y^2)/16 - 35z(E_{201}x^2 + E_{021}y^2)/32 + 35z(D_{101}x + D_{011}y)/16 - \\ - 105z(P_{601}x^6 + 2P_{511}x^5y + P_{421}x^4y^2 + 2P_{421}x^4y^2 + 4P_{331}x^3y^3 + 2P_{241}x^2y^4 + P_{241}x^2y^4 + 2P_{151}xy^5 + \\ + P_{061}y^6)/16 + 35z(P_{501}x^5 + 3P_{411}x^4y + P_{321}x^3y^2 + P_{231}x^2y^3 + 3P_{141}xy^4 + P_{051}y^5)/4 - \\ - 105z(P_{401}x^4 + 2P_{311}x^3y + P_{221}x^2y^2 + 2P_{131}xy^3 + P_{041}y^4)/8 - \\ - 35z(Z_{401}x^4 + 4Z_{311}x^3y + 6Z_{221}x^2y^2 + 4Z_{131}xy^3 + Z_{041}y^4)/8 + \\ + 35z(Z_{301}x^3 + 3Z_{211}x^2y + 3Z_{121}xy^2 + Z_{031}y^3)/4,$$

где коэффициенты аберраций седьмого порядка объемного осевого ГОЭ:

$$\begin{aligned}
S_{ijk} &= 1/z_c^{7+k} \pm 1/z_i^{7+k} - (k\mu/m_x^i m_y^j m_z^k)(1/z_r^{7+k} \pm 1/z_o^{7+k}) \quad (ijk = 800; 801; 080; 081; 620; 621, 260, \\
&261, 440, 441), \\
S_{ijk} &= (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{7+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 600; 601; 060; 061; 420; 421, 240, \\
&241), \\
S_{ijk} &= (x_c^2 + y_c^2)^2/z_c^{7+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^2/z_i^{7+k} \quad (ijk = 400; 401; 040; 041; 220; 221), \\
C_{ijk} &= x_c(x_c^2 + y_c^2)^{(7-i-j)/2}/z_c^{7+k} \pm x_i(x_i^2 + y_i^2)^{(7-i-j)/2}/z_i^{7+k} \quad (ijk = 700; 701; 520; 521; 340; 341; 160; \\
&161; 500; 501; 320; 321; 140; 141; 300; 301; 120; 121), \\
C_{ijk} &= y_c(x_c^2 + y_c^2)^{(7-i-j)/2}/z_c^{7+k} \pm y_i(x_i^2 + y_i^2)^{(7-i-j)/2}/z_i^{7+k} \quad (ijk = 070; 071; 250; 251; 430; 431; 610; \\
&611; 050; 051; 230; 231; 410; 411; 030; 031; 210; 211), \\
A_{ijk} &= x_c y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^j/z_c^{7+k} \pm x_i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^j/z_i^{7+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021; 110; 111), \\
E_{ijk} &= (x_c^2 + y_c^2)^3/z_c^{7+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^3/z_i^{7+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021), \\
D_{ijk} &= x_c y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^3/z_c^{7+k} \pm x_i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^3/z_i^{7+k} \quad (ijk = 100; 101; 010; 011), \\
Z_{ijk} &= x_c y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^{4-i-j}/z_c^{7+k} \pm x_i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^{4-i-j}/z_i^{7+k} \quad (ijk = 400; 401; 310; 311; 220; 221; \\
&130; 131; 040; 041; 300; 301; 210; 211; 120; 121; 030; 031), \\
P_{ijk} &= x_c^{i-4} y_c^j/z_c^{7+k} \pm x_i^{i-4} y_i^j/z_i^{7+k} \quad (ijk = 600; 601); \\
P_{ijk} &= x_c^i y_c^{j-4}/z_c^{7+k} \pm x_i^i y_i^{j-4}/z_i^{7+k} \quad (ijk = 060; 061); \\
P_{ijk} &= x_c y_c/z_c^{7+k} \pm x_i y_i/z_i^{7+k} \quad (ijk = 510; 511; 330; 331; 150; 151); \\
P_{ijk} &= (2x_c^2 + y_c^2)/z_c^{7+k} \pm (2x_i^2 + y_i^2)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 420; 421); \\
P_{ijk} &= (x_c^2 + 2y_c^2)/z_c^{7+k} \pm (x_i^2 + 3y_i^2)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 240; 241); \\
P_{ijk} &= x_c^{i-3} y_c^j/z_c^{7+k} \pm x_i^{i-3} y_i^j/z_i^{7+k} \quad (ijk = 500; 501; 410; 411); \\
P_{ijk} &= x_c^i y_c^{j-3}/z_c^{7+k} \pm x_i^i y_i^{j-3}/z_i^{7+k} \quad (ijk = 050; 051; 140; 141); \\
P_{ijk} &= (3x_c y_c^2 + x_c^3)/z_c^{7+k} \pm (3x_i y_i^2 + x_i^3)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 320; 321); \\
P_{ijk} &= (3x_c^2 y_c + y_c^3)/z_c^{7+k} \pm (3x_i^2 y_i + y_i^3)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 230; 231); \\
P_{ijk} &= x_c^{i-2} y_c^j (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{7+k} \pm x_i^{i-2} y_i^j (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 400; 401; 310; 311); \\
P_{ijk} &= x_c^i y_c^{j-2} (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{7+k} \pm x_i^i y_i^{j-2} (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{7+k} \quad (ijk = 040; 041; 130; 131); \\
P_{ijk} &= (x_c^2 + y_c^2)^2/z_c^{7+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^2/z_i^{7+k} \quad (ijk = 420; 421; 240; 241).
\end{aligned}$$

Члены разложения девятого порядка характеристической функции объемного ГОЭ

$$\begin{aligned}
V_{9l}(x,y) &= + 7(S_{1000}x^{10} + 5S_{820}x^8y^2 + 10S_{640}x^6y^4 + 10S_{460}x^4y^6 + 5S_{280}x^2y^8 + S_{0100}y^{10})/256 + 35(S_{800} \\
&x^8 + 4S_{620}x^6y^2 + 6S_{440}x^4y^4 + 4S_{260}x^2y^6 + S_{080}y^8)/256 + \\
&+ 35(S_{600}x^6 + 3S_{420}x^4y^2 + 3S_{240}x^2y^4 + S_{060}y^6)/128 + 35(S_{400}x^4 + 2S_{220}x^2y^2 + \\
&+ S_{040}y^4)/128 - 35(C_{900}x^9 + 4C_{720}x^7y^2 + 6C_{540}x^5y^4 + 4C_{360}x^3y^6 + C_{180}xy^8 + C_{810}x^8y + \\
&+ 4C_{630}x^6y^3 + 6C_{450}x^4y^5 + 4C_{270}x^2y^7 + C_{090}y^9)/128 - 35(C_{700}x^7 + C_{610}x^6y + 3C_{520}x^5y^2 + 3C_{430}x^4y^3 + \\
&+ 3C_{340}x^3y^4 + 3C_{250}x^2y^5 + C_{160}xy^6 + C_{070}y^7)/32 - 105(C_{500}x^5 + C_{410}x^4y + \\
&+ 2C_{320}x^3y^2 + 2C_{230}x^2y^3 + C_{140}xy^4 + C_{050}y^5)/64 - 35(C_{300}x^3 + C_{210}x^2y + C_{120}xy^2 + \\
&+ C_{030}y^3)/32 + 35(A_{200}x^2 + 2A_{110}xy + A_{020}y^2)/32 + 35(E_{200}x^2 + E_{020}y^2)/256 - \\
&- 35(D_{100}x + D_{010}y)/128 + 35(P_{800}x^8 + 2P_{710}x^7y + P_{620}x^6y^2 + 6P_{530}x^5y^3 + 3P_{440}x^4y^4 + \\
&+ 6P_{350}x^3y^5 + P_{260}x^2y^6 + 2P_{170}xy^7 + P_{080}y^8)/32 + 105(P_{600}x^6 + 2P_{510}x^5y + P_{420}x^4y^2 + \\
&+ 4P_{330}x^3y^3 + P_{240}x^2y^4 + 2P_{150}xy^5 + P_{060}y^6)/32 + 35(Q_{600}x^6 + 4Q_{510}x^5y + Q_{420}x^4y^2 + \\
&+ 4Q_{330}x^3y^3 + Q_{240}x^2y^4 + 4Q_{150}xy^5 + Q_{060}y^6)/16 + 105(P_{400}x^4 + 2P_{310}x^3y + P_{220}x^2y^2 + \\
&+ 2P_{130}xy^3 + P_{040}y^4)/32 - 35(P_{700}x^7 + 3P_{610}x^6y + P_{520}x^5y^2 + P_{430}x^4y^3 + P_{340}x^3y^4 + \\
&+ P_{250}x^2y^5 + 3P_{160}xy^6 + P_{070}y^7)/16 - 35(P_{500}x^5 + 3P_{410}x^4y + P_{320}x^3y^2 + P_{230}x^2y^3 + \\
&+ 3P_{140}xy^4 + P_{050}y^5)/8 - 7(Z_{500}x^5 + 5L_{410}x^4y + 10Z_{320}x^3y^2 + 10Z_{230}x^2y^3 + 5Z_{140}xy^4 + \\
&+ Z_{050}y^5)/8 + 35(Z_{400}x^4 + 4Z_{310}x^3y + 6Z_{220}x^2y^2 + 4Z_{130}xy^3 + Z_{040}y^4)/16 - 35(Z_{300}x^3 + \\
&+ 3Z_{210}x^2y + 3Z_{120}xy^2 + Z_{030}y^3)/16,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{9v}(x,y,z) &= 63(S_{1001}x^{10} + 5S_{821}x^8y^2 + 10S_{641}x^6y^4 + 10S_{461}x^4y^6 + 5S_{281}x^2y^8 + \\
&+ S_{0101}y^{10})z/256 + 35(S_{801}x^8 + 4S_{621}x^6y^2 + 6S_{441}x^4y^4 + 4S_{261}x^2y^6 + S_{081}y^8)z/256 + \\
&+ 35(S_{601}x^6 + 3S_{421}x^4y^2 + 3S_{241}x^2y^4 + S_{061}y^6)z/128 + 35(S_{401}x^4 + 2S_{221}x^2y^2 + \\
&+ S_{041}y^4)z/128 - 35(C_{901}x^9 + 4C_{721}x^7y^2 + 6C_{541}x^5y^4 + 4C_{361}x^3y^6 + C_{181}xy^8 + C_{811}x^8y + \\
&+ 4C_{631}x^6y^3 + 6C_{451}x^4y^5 + 4C_{271}x^2y^7 + C_{091}y^9)z/128 - 35(C_{701}x^7 + C_{611}x^6y + 3C_{521}x^5y^2 + \\
&+ 3C_{431}x^4y^3 + 3C_{341}x^3y^4 + 3C_{251}x^2y^5 + C_{161}xy^6 + C_{071}y^7)z/32 - 105(C_{501}x^5 + C_{411}x^4y +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2C_{321}x^3y^2 + 2C_{231}x^2y^3 + C_{141}xy^4 + C_{051}y^5)z/64 - 35(C_{301}x^3 + C_{211}x^2y + C_{121}xy^2 + \\
& + C_{031}y^3)z/32 + 35(A_{201}x^2 + 2A_{111}xy + A_{021}y^2)z/32 + 35(E_{201}x^2 + E_{021}y^2)z/256 - \\
& - 35(D_{101}x + D_{011}y)z/128 + 35(P_{801}x^8 + 2P_{711}x^7y + P_{621}x^6y^2 + 6P_{531}x^5y^3 + 3P_{441}x^4y^4 + \\
& + 6P_{351}x^3y^5 + P_{261}x^2y^6 + 2P_{171}xy^7 + P_{081}y^8)z/32 + 105(P_{601}x^6 + 2P_{511}x^5y + P_{421}x^4y^2 + \\
& + 4P_{331}x^3y^3 + P_{241}x^2y^4 + 2P_{151}xy^5 + P_{061}y^6)z/32 + 35(Q_{601}x^6 + 4Q_{511}x^5y + Q_{421}x^4y^2 + \\
& + 4Q_{331}x^3y^3 + Q_{241}x^2y^4 + 4Q_{151}xy^5 + Q_{061}y^6)z/16 + 105(P_{401}x^4 + 2P_{311}x^3y + P_{221}x^2y^2 + \\
& + 2P_{131}xy^3 + P_{041}y^4)z/32 - 35(P_{701}x^7 + 3P_{611}x^6y + P_{521}x^5y^2 + P_{431}x^4y^3 + P_{341}x^3y^4 + \\
& + P_{251}x^2y^5 + 3P_{161}xy^6 + P_{071}y^7)z/16 - 35(P_{501}x^5 + 3P_{411}x^4y + P_{321}x^3y^2 + P_{231}x^2y^3 + \\
& + 3P_{141}xy^4 + P_{051}y^5)z/8 - 7(Z_{501}x^5 + 5L_{411}x^4y + 10Z_{321}x^3y^2 + 10Z_{231}x^2y^3 + 5Z_{141}xy^4 + \\
& + Z_{051}y^5)z/8 + 35(Z_{401}x^4 + 4Z_{311}x^3y + 6Z_{221}x^2y^2 + 4Z_{131}xy^3 + Z_{041}y^4)z/16 - 35(Z_{301}x^3 + \\
& + 3Z_{211}x^2y + 3Z_{121}xy^2 + Z_{031}y^3)z/16,
\end{aligned}$$

где коэффициенты aberrаций девятого порядка объемного осевого ГОЭ:

$$S_{ijk} = 1/z_c^{9+k} \pm 1/z_i^{9+k} - (k\mu/m_x m_y m_z)(1/z_r^{9+k} \pm 1/z_o^{9+k}) \quad (ijk = 1000; 1001; 0100; 0101; 820; 821, 280, 281, 640, 641, 460, 461),$$

$$S_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)^{(10-i-j)/2}/z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^{(10-i-j)/2}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 800; 801; 080; 081; 620; 621, 260, 261, 440, 441),$$

$$C_{ijk} = x_c(x_c^2 + y_c^2)^{(9-i-j)/2}/z_c^{9+k} \pm x_i(x_i^2 + y_i^2)^{(9-i-j)/2}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 900; 901; 720; 721; 540; 541; 360; 361; 180; 181; 700; 701; 520; 521; 340; 341; 160; 161; 500; 501; 320; 321; 140; 141; 300; 301; 120; 121),$$

$$C_{ijk} = y_c(x_c^2 + y_c^2)^{(9-i-j)/2}/z_c^{9+k} \pm y_i(x_i^2 + y_i^2)^{(9-i-j)/2}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 090; 091; 270; 271; 450; 451; 630; 631; 810; 811; 070; 071; 250; 251; 430; 431; 610; 611; 050; 051; 230; 231; 410; 411; 030; 031; 210; 211),$$

$$A_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^3/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^3/z_i^{9+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021; 110; 111),$$

$$E_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)^3/z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^3/z_i^{9+k} \quad (ijk = 200; 201; 020; 021),$$

$$D_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^4/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^4/z_i^{9+k} \quad (ijk = 100; 101; 010; 011),$$

$$Z_{ijk} = x_c^i y_c^j (x_c^2 + y_c^2)^{5-i-j}/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^j (x_i^2 + y_i^2)^{5-i-j}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 500; 501; 410; 411; 320; 321; 230; 231; 140; 141; 050; 051; 400; 401; 310; 311; 220; 221; 130; 131; 040; 041; 300; 301; 210; 211; 120; 121; 030; 031),$$

$$P_{ijk} = x_c^{i-6} y_c^j/z_c^{9+k} \pm x_i^{i-6} y_i^j/z_i^{9+k} \quad (ijk = 800; 801);$$

$$P_{ijk} = x_c^i y_c^{j-6}/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^{j-6}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 080; 081);$$

$$P_{ijk} = x_c y_c/z_c^{9+k} \pm x_i y_i/z_i^{9+k} \quad (ijk = 710; 711; 530; 531; 350; 351; 170; 171);$$

$$P_{ijk} = (3x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm (3x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 620; 621);$$

$$P_{ijk} = (x_c^2 + 3y_c^2)/z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + 3y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 260; 261);$$

$$P_{ijk} = (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 440; 441);$$

$$P_{ijk} = x_c^{i-4} y_c^j/z_c^{9+k} \pm x_i^{i-4} y_i^j/z_i^{9+k} \quad (ijk = 700; 701; 610; 611);$$

$$P_{ijk} = x_c^i y_c^{j-4}/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^{j-4}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 070; 071; 160; 161);$$

$$P_{ijk} = (3x_c y_c^2 + 2x_c^3)/z_c^{9+k} \pm (3x_i y_i^2 + 2x_i^3)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 520; 521);$$

$$P_{ijk} = (3x_c y_c^3 + 2y_c^3)/z_c^{9+k} \pm (3x_i y_i^3 + 2y_i^3)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 250; 251);$$

$$P_{ijk} = (6x_c y_c^2 + y_c^3)/z_c^{9+k} \pm (6x_i y_i^2 + y_i^3)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 430; 431);$$

$$P_{ijk} = (6x_c y_c^3 + x_c^3)/z_c^{9+k} \pm (6x_i y_i^3 + x_i^3)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 340; 341);$$

$$P_{ijk} = x_c^{i-4} y_c^j (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm x_i^{i-4} y_i^j (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 600; 601; 510; 511);$$

$$P_{ijk} = x_c^i y_c^{j-4} (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^{j-4} (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 060; 061; 150; 151);$$

$$P_{ijk} = (2x_c^2 + y_c^2)(x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm (2x_i^2 + y_i^2)(x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 420; 421);$$

$$P_{ijk} = (x_c^2 + 2y_c^2)(x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + 2y_i^2)(x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 240; 241);$$

$$P_{ijk} = Q_{ijk} = x_c y_c (x_c^2 + y_c^2)/z_c^{9+k} \pm x_i y_i (x_i^2 + y_i^2)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 330; 331);$$

$$Q_{ijk} = x_c^{i-2} y_c^j/z_c^{9+k} \pm x_i^{i-2} y_i^j/z_i^{9+k} \quad (ijk = 600; 601; 510; 511);$$

$$Q_{ijk} = x_c^i y_c^{j-2}/z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^{j-2}/z_i^{9+k} \quad (ijk = 060; 061; 150; 151);$$

$$Q_{ijk} = (6x_c^2 y_c^2 + x_c^4)/z_c^{9+k} \pm (6x_i^2 y_i^2 + x_i^4)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 420; 421);$$

$$Q_{ijk} = (6x_c y_c^2 + y_c^4)/z_c^{9+k} \pm (6x_i y_i^2 + y_i^4)/z_i^{9+k} \quad (ijk = 240; 241);$$

$$\begin{aligned}
P_{ijk} &= x_c^{i-2} y_c^j (x_c^2 + y_c^2) / z_c^{9+k} \pm x_i^{i-2} y_i^j (x_i^2 + y_i^2) / z_i^{9+k} & (ijk = 500; 501; 410; 411; 400; 401; 310; \\
&311); \\
P_{ijk} &= x_c^i y_c^{j-2} (x_c^2 + y_c^2) / z_c^{9+k} \pm x_i^i y_i^{j-2} (x_i^2 + y_i^2) / z_i^{9+k} & (ijk = 050; 051; 140; 141; 040; 041; 130; \\
&131); \\
P_{ijk} &= (x_c^3 + 3x_c y_c^2) (x_c^2 + y_c^2) / z_c^{9+k} \pm (x_i^3 + 3x_i y_i^2) (x_i^2 + y_i^2) / z_i^{9+k} & (ijk = 320; 321); \\
P_{ijk} &= (x_c^3 + 3x_c^2 y_c) (x_c^2 + y_c^2) / z_c^{9+k} \pm (x_i^3 + 3x_i^2 y_i) (x_i^2 + y_i^2) / z_i^{9+k} & (ijk = 230; 231); \\
P_{ijk} &= (x_c^2 + y_c^2)^3 / z_c^{9+k} \pm (x_i^2 + y_i^2)^3 / z_i^{9+k} & (ijk = 220; 221).
\end{aligned}$$

© Ю.Ц. Батомункуев, 2012

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ С ЛЮМИНОФОРАМИ, С НАНОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗА

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, младший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Андрей Борисович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, доктор технических наук, профессор, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Анна Евгеньевна Кусакина

Новосибирский государственный технический университет, ЗАО «СКБ», 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, магистр, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Полимерные пленки, содержащие люминофор, могут быть применены в различного рода приемных системах и датчиках. В статье рассматриваются некоторые характеристики преобразования оптического сигнала в полимерных пленках с добавками люминофора. Также рассматривается возможность управления выходным излучением за счет воздействия магнитного поля.

Ключевые слова: полимерные пленки, люминофор.

CHARACTERISTICS OF THE TRANSFORMATION OF OPTICAL SIGNALS IN POLYMER FILMS WITH PHOSPHORS WITH NANO PARTICLES OF IRON

Alexander V. Britvin

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, younger research associate, ph. 330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Andrey B. Poller

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Boris V. Poller

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, Doctor of Engineering., professor, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Anna E. Kusakina

Novosibirsky state technical university, JSC SKB, 630092, Novosibirsk, Charles Marx Ave., 20, master, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Polymer film containing phosphor can be applied in various types of reception systems and sensors. This article discusses some of the characteristics of the optical signal transformation in polymer films with additives of phosphor. Also addresses the ability to control the output radiation by magnetic fields.

Key words: polymer film, phosphor.

Ранее в работах [1–3] исследовались временные и энергетические характеристики полимерных пленок с люминофорами.

В настоящее время представляет интерес количественная оценка характеристик затухания излучения люминесценции и преобразование его спектра при распространении излучения в прямоугольных полимерных пленках.

Как известно [4] затухание излучения в материале оптического волновода описывается законом Бугера.

$$P_{\text{вых}} = A \cdot P_{\text{вх}} \exp(-\alpha \cdot L) \quad (1)$$

где α - коэффициент ослабления; $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ - входная и выходная мощности.

Для проверки применимости этого закона и получения экспериментальных оценок затухания была разработана схема измерений, представленная на рис. 1.

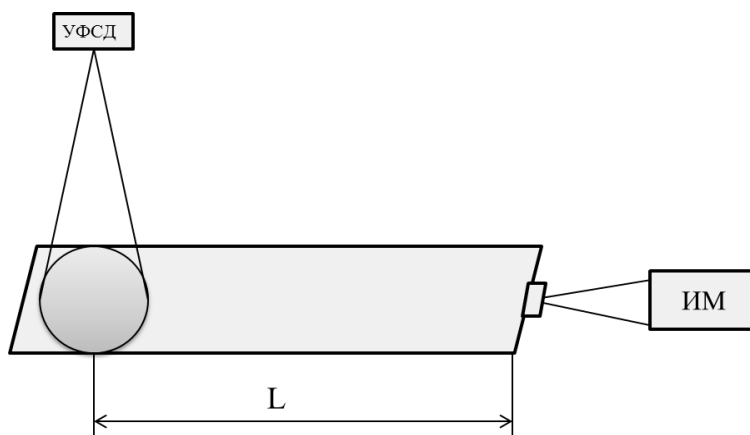


Рис. 1. Схема измерений, УФСД – ультрафиолетовый светодиода, ИМ – измеритель мощности, ПЛ – пленка с люминофором

В соответствии с этой схемой были выполнены измерения зависимости $P_{\text{вых}}$ от длины L для 12 видов пленок, длиной от 10 до 80 мм и толщиной от 0,08 до 0,15 мм.

Так для плёнки из ПММА с добавлением люминофора РОРОР такая зависимость представлена на рис. 2. Для пленки длиной 9 мм зависимость представлена на рис. 3.

Для оценки характеристик α в формуле (1) была выполнена интерполяция экспериментальной кривой с помощью подбора величины α и оценки минимума среднеквадратичного отклонения между экспериментальной и расчетной зависимостью.

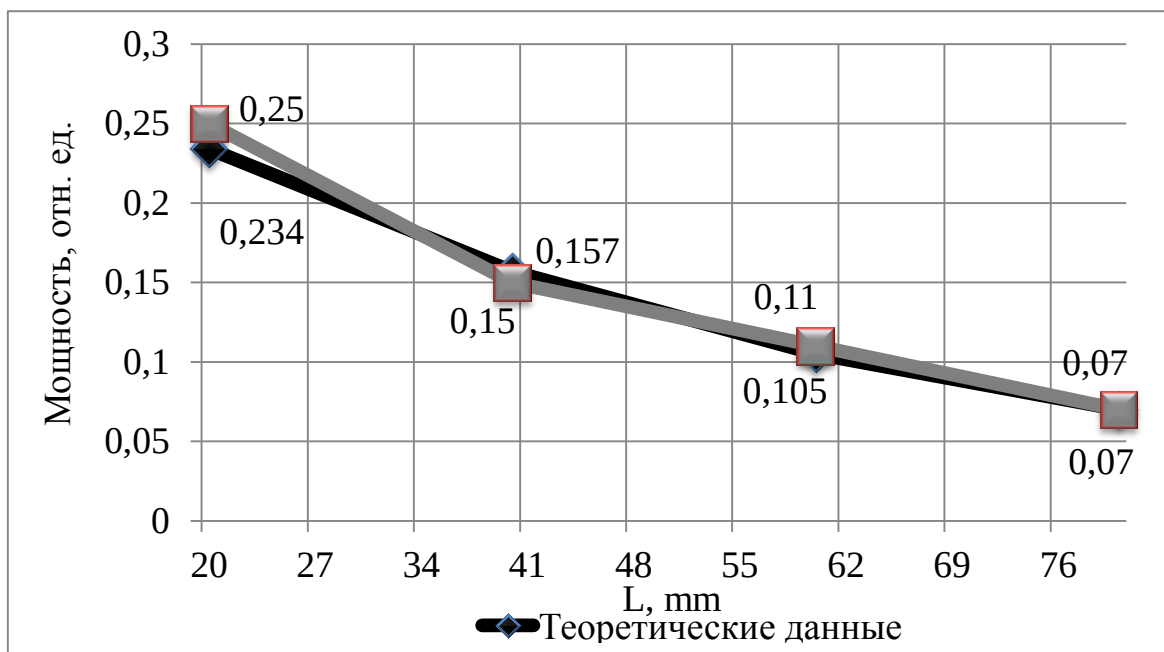


Рис. 2. характеристики зависимости $P_{\text{вых}}$ от l для пленки из ПММА с добавлением люминофора ROROP

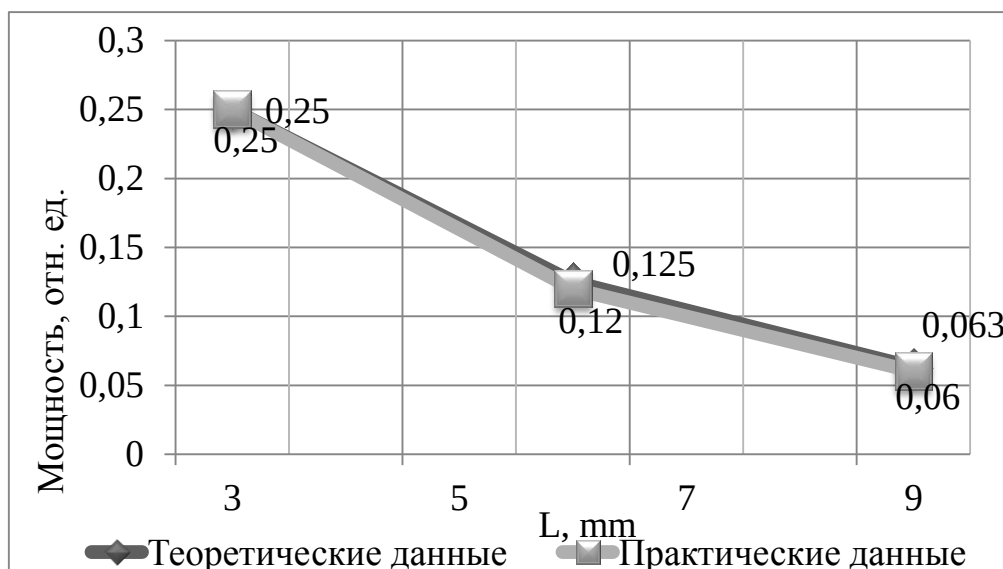


Рис. 3. Характеристики зависимости $P_{\text{вых}}$ от l для пленки из акрилового полимера с добавлением люминофора ROROP

Так для ПММА (рис. 2) коэффициент α составляет 0,02, а среднее квадратическое отклонение не более 6,2%, для акрилового полимера (рис. 3) коэффициент α близок к 0,23, а среднее квадратическое отклонение не более 3,05%.

Были исследованы пленки, содержащие различные люминофоры. Эксперименты показали, что в пленках, содержащих люминофор Родамин 6g, затухание сигнала происходит значительно сильнее, чем в пленках, содержащих ROROP.

Замена измерителя мощности на спектрометр показало, что с удалением области засветки от торца волновода у пленки с люминофором изменяется спектр сигнала на торце волновода. Это может быть объяснено наличием поглощения в коротковолновой области переизлучаемого спектра. На рис. 4 представлены спектры поглощения люминофорами и спектральные распределения мощности принимаемого сигнала на торцах планарных приемников с люминофором Родамин 6g и РОРОР.

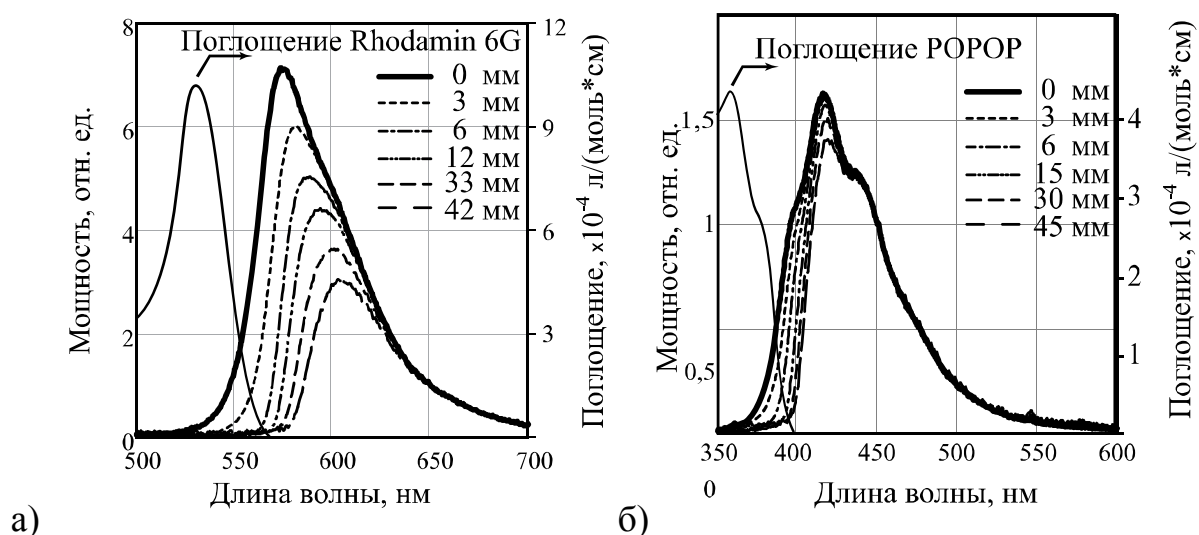


Рис. 4 – Спектральное распределение мощности принимаемого сигнала (нормированный по верхней границе спектра) с торца планарного приемника с люминофором: а) Родамин 6g; б) РОРОР

Как видно из рис. 4 спектры поглощения люминофора Родамин 6g (рис. 4а) и спектры люминесценции значительно пересекаются по сравнению с РОРОР (рис. 4б), что приводит к значительному изменению спектрального состава выходного излучения.

Управление пленочными приемниками возможно за счет отклонения свободного конца пленки от начального положения, что изменяет степень поступления сигнала, выходящего с торца пленки на близ расположенные элементы.

Для оценки возможности управления параметрами выходного оптического излучения из торца пленки был выполнен эксперимент по влиянию постоянного магнитного поля на частицы железа размером менее 400 нм размещенных в пленке из поливинилового спирта толщиной 100 мкм. Концентрация кластеров из таких частиц составляет около 1 шт/мм³.

Величина отклонения торца пленки длиной 40 мм и шириной 10 мм при приближении постоянного магнита с потоком около 10 мТл представлена на Рис.5. Магнитный поток пленки приводит к ее максимальному отклонению на 10% от ее длины.



Рис. 5. График зависимости амплитуды отклонения пленки при приближении магнита

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

Ослабление излучения люминесценции в полимерных пленках достаточно хорошо описывается законом Бугера;

Для увеличения оптимальной длины планарного приемника, необходим подбор люминофора с минимальным перекрытием спектра поглощения и люминесценции. Также необходим подбор характеристик пропускания полимерной матрицы.

Применение магнитных наночастиц позволяет осуществлять управление сигналом за счет отклонения свободного конца волновода под действием магнитного поля. Это позволяет применять данный вид пленок в различных сенсорных системах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубенков А.А., Плюснин В.Ф., Поллер Б.В. приемники УФ излучения на основе раствора люминофора в пленке. В сб. докл. VII МНТК «Радиолокация. Навигация. Связь», изд. ВГУ т. 2 стр. 1262 – 1269, Воронеж 2001.
2. Б.В.Поллер, Ю.Д.Коломников, Д.Е.Трушенко. ИЛФ СО РАН, Новосибирск, Международный научный конгресс «Гео – Сибирь – 2006, Исследование планарных полимерных антенн с люминофорами для лазерных информационных систем.
3. Волоконно–оптические датчики. В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. Москва энергоатомиздат, 1990 год. Стр 21
4. А.Б. Поллер, Б.В. Поллер, А.Е. Кусакина О распространении и накоплении света в слоях люминофоров длительного послесвечения. ГЕО-Сибирь – 2011. Т.5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микро техника, нано технологии. Ч. 2.: сб. матер. VII Междунар. Научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь – 2011», 19-29 апреля 2011 г. Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2011 с. 69 – 74.

MEMS-СЕНСОРЫ ОРИЕНТАЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Геннадий Александрович Сырецкий

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. 8-913-897-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

В статье рассмотрены принципы построения и важные характеристики современных MEMS-сенсоров ориентации параметров движения.

Ключевые слова: MEMS, цифровой компас, цифровой гироскоп и акселерометр.

MEMS-SENSORS OF ORIENTATION AND OF MOVEMENT PARAMETERS

Gennady A. Syreckiy

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Parchomenko, Novosibirsk, 630108, senior teacher, department of nanosystems and optotechnik, tel. 8-913-896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

In article describes the principles of construction and the important characteristics modern MEMS-sensors of orientation and of movement parameters.

Key words: MEMS, digital compass, digital gyroscope and accelerometer sensor.

Ныне для создания разнообразных миниатюрных датчиков используются технологии микроэлектромеханических систем — систем, представляющих собой взаимоувязанное объединение микромеханических и микроэлектронных компонентов (Micro Electro Mechanical System, MEMS) на одном кремниевом кристалле, в корпусе одной микросхемы. Различают не только MEMS, но и 3D-MEMS технологии производства компонентов таких систем. Причем, в настоящее время в корпусе одной микросхемы могут содержаться два и более 3-осевых датчиков различных физических величин. Для датчиков, созданных по указанным технологиям, характерно низкое собственное энергопотребление.

MEMS-сенсоры, производимые множеством зарубежных компаний, находят широкое применение в приборах и автоматизированных системах различного назначения, используемых как в промышленности, так и в изделиях военного и гражданского назначения. Например, ими оснащаются автономные транспортные средства, мобильные домашние роботы, смартфоны Apple iPhone 4, электроэнцефалографические гарнитуры компании Emotiv Systems и сегвеи. Они применяются и в моделях устройств, конструируемых на базе робототехнических образовательных наборов (http://laurensvalk.com/nxt-2_0-only/anyway; <http://legolab.daimi.au.dk/DigitalControl.dir/NXT/Sensors.html>).

Данная статья посвящена краткому изложению принципов действия и важных характеристик таких типов MEMS-сенсоров, как цифровой компас, гироскоп и акселерометр.

Цифровой компас. Компас, как известно, предназначен для ориентации на местности и задания курса движения объекта по земной поверхности относительно четырех сторон горизонта.

Первичным измерительным преобразователем компаса служат, чаще всего, четыре магниторезистора (например, микросхема HMC52L 216), соединенных в мостовую схему. У магниторезисторов сопротивление меняется в зависимости от индукции внешнего магнитного поля. Обработка измерительных сигналов, снимаемых с диагонали моста, осуществляется встроенным либо внешним микроконтроллером (например, PIC16F677 компании Microchip). Посредством такого компаса можно определять не только азимут, но и измерять индукцию внешнего магнитного поля.

На рис. 1 показан внешний вид цифрового двухосного компаса HiTechnic Compass Sensor, компоненты конструкции и ось отсчета азимута.

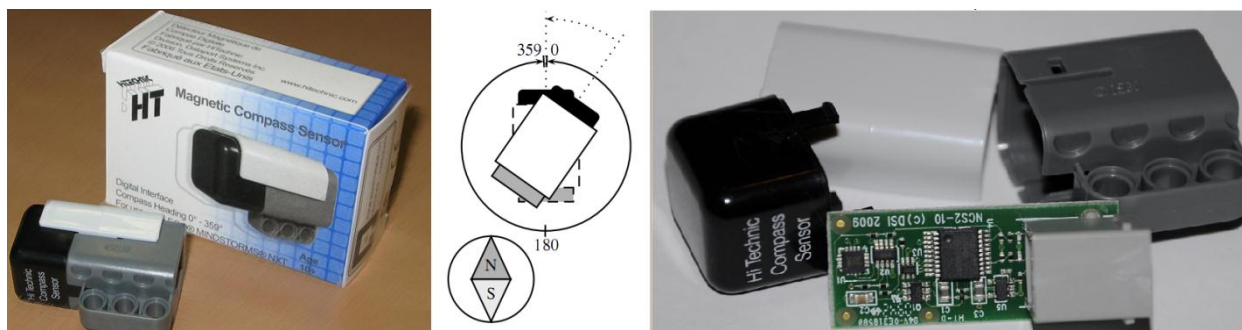


Рис. 1. Цифровой компас HiTechnic Compass Sensor
а — внешний вид; б — отсчет азимута; в — компоненты датчика

Точность измерения направления в диапазоне от 0° до 359° составляет 1° . Передача данных, организуемая микроконтроллером PIC16F677 датчика, происходит по цифровому протоколу связи I²C. Результаты измерений обновляются с частотой 100 раз в секунду. Цифровой компас может работать в одном из двух программно задаваемых режимов: режим измерения (абсолютного либо относительного); режим калибровки. В режиме калибровки (выполнения встроенной функции) вычисляется и сохраняется в компасе корректирующее смещение, т.е. компас с определенной погрешностью компенсирует влияния аномалий магнитного поля, вызванных внешним окружением датчика (например, электромоторами, аккумуляторными батареями и металлическими конструкциями).

Цифровой гироскоп. Гироскопы используются для стабилизации направления движения, измерения поворотной скорости и угла наклона тела в инерциальном пространстве.

Важнейшими техническими характеристиками современных гироскопов являются следующие: диапазон угловых скоростей, град/с; чувствительность, град/с; нелинейность масштабного коэффициента, %FS(full-scale); максимальный выходной сигнал, В; время запуска, с; полоса пропускания, Гц; ударопрочность, g/мс; виброустойчивость, g, RMS (gravity root mean square,

среднеквадратичное значение вибрационного ускорения (СКО), оцениваемое в единицах ускорения свободного падения); напряжение питания, В.

Основой конструкции традиционного гироскопа (<http://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>) служит карданов подвес с размещенным внутри его вращающимся телом. Карданов подвес позволяет закрепленному внутри его вращающемуся телу (например, диску) сохранять неизменное направление оси вращения независимо от ориентации самого подвеса и при отсутствии воздействия на неё моментов внешних сил.

Как известно, при вращении тел могут возникать прецессия, нутация и сила Кориолиса. На использовании эффекта Кориолиса строится множество MEMS гироскопов.

На рис. 2. приведены примеры механических резонаторов MEMS-гироскопов, возбуждаемых извне и реагирующих на Кориолиса (поворотное) ускорение. Управление и измерение колебаний чувствительного элемента (ЧЭ) осуществляется обычно с помощью электростатической системы. Емкостные датчики системы позволяют измерить высокочастотные угловые колебания ЧЭ по обобщенным координатам. Угловые колебания возбуждаются с помощью создаваемого электростатическим приводом момента М. Рис. 3 поясняет принципы работы некоторых гироскопов с одной осью.

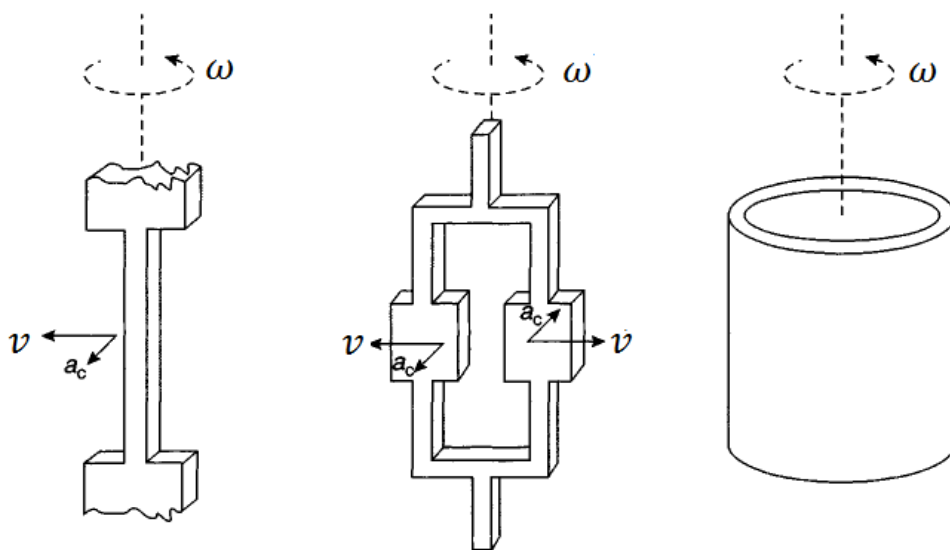


Рис. 2. Примеры конструкций механических резонаторов MEMS-сенсоров углов:
а — простой балочный (одиночной струны) осциллятор; б — сбалансированный мост;
в — цилиндрическая оболочка

В основе обработки измерительных сигналов современных гироскопов лежит математический аппарат аналитической механики (обычно на основе углов Эйлера) или кватернионов, посредством которых устраняется эффект Карданова подвеса и достигается простота вычисления направляющих косинусов.

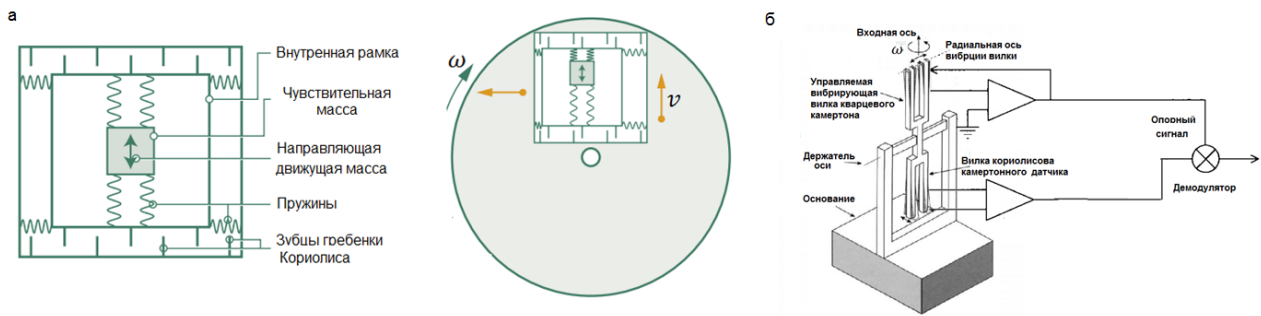


Рис. 3. ЧЭ одноосевого гироскопа

а — с чувствительной массой и емкостными преобразователями; б — камертонного типа

Так, пересчет координат точки тела (x_b, y_b, z_b) , определенной в навигационной (опорной, неподвижной) системе координат, к координатам в связанной СК (x'_b, y'_b, z'_b) , осуществляется по формуле

$$\begin{bmatrix} x'_b \\ y'_b \\ z'_b \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}.$$

Для выполнения обратного преобразования координат предназначена транспонированная матрица $C_b^n = C_n^{bT}$, где

$$C_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

— матрица проекций ортов системы декартовой координат (СК) тела на направляющие оси неподвижной СК.

Данная матрица выражается следующим образом

а) Через углы Эйлера:

$$\begin{bmatrix} \cos \psi \cos \rho & \cos \psi \sin \rho \sin \gamma - \sin \psi \cos \gamma & \cos \psi \sin \rho \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma \\ \sin \psi \cos \rho & \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \rho \sin \gamma & -\sin \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \rho \cos \gamma \\ -\sin \rho & \cos \rho \sin \gamma & \cos \rho \cos \gamma \end{bmatrix};$$

б) Через компоненты кватерниона

$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3] = q_0 \cdot 1 + q_1 \cdot \mathbf{i} + q_2 \cdot \mathbf{j} + q_3 \cdot \mathbf{k}:$$

$$\begin{bmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 1 - 2q_1^2 - 2q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & 1 - 2q_1^2 - 2q_2^2 \end{bmatrix}.$$

В динамическом режиме трехосный гироскоп измеряет угловые скорости $\omega(t) = [\omega_x(t) \ \omega_y(t) \ \omega_z(t)]^T$ вокруг осей подвижной СК. Угловая скорость вращения вектора вычисляется с учетом

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{c} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = 1/2 \begin{bmatrix} a & -b & -c & -d \\ b & a & -d & c \\ c & d & a & -b \\ d & -c & b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = 1/2 \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y & \omega_x \\ -\omega_z & 0 & \omega_x & \omega_y \\ \omega_y & -\omega_x & 0 & \omega_z \\ -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}.$$

На рис. 4 приведена конструкция микросхемы 3-х осевого гироскопического MEMS-датчика L3G4200D компании STMicroelectronics и его функциональная схема.

Работа вращающегося гироскопа основана на периодическом движении в горизонтальной плоскости четырех чувствительных масс M1, M2, M3 и M4. Под действием сил Кориолиса происходит их отклонение от прямолинейного движения, фиксируемое в позициях Y, P и R микросхемы. В позициях изменение положения масс фиксируется емкостными датчиками, расположенными над позициями. Приращение емкости каждого датчика преобразуется вначале в напряжение, которое пропорционально прикладываемой к датчику угловой скорости, а затем — в 16-битный код, сохраняемый во внутренних регистрах ASIC-процессора.

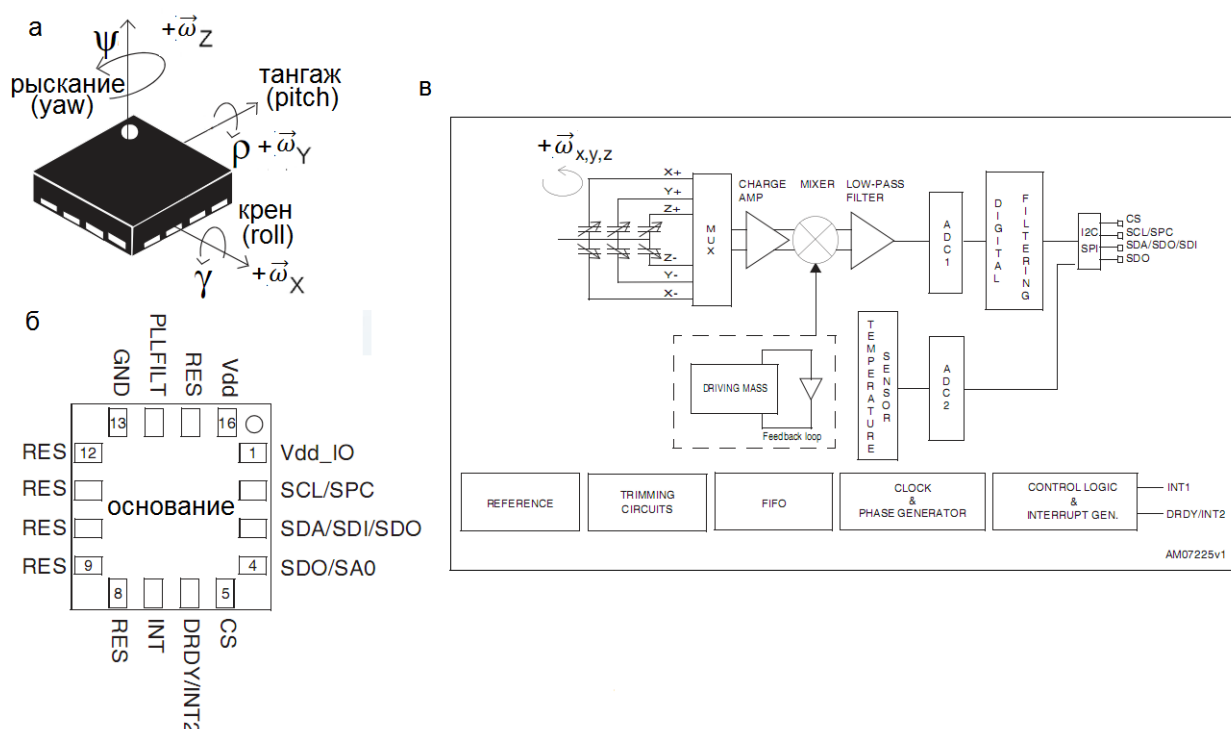


Рис. 4. MEMS-гироскоп L3G4200D в корпусе LGA (Land Grid Array)

а — вид сверху; б — вид основания ; в — функциональная схема

Акселерометр. Он является устройством для измерения наклона, изменений положения объекта (например, при ускорении 1...2g), линейных и вращательных свободных падений (1g), перегрузок, вибраций и ударов.

Главная часть акселерометра — датчик скорости. Основой большинства таких датчиков служит емкостной чувствительный элемент, представляющий собой микромеханическую систему, которая сформирована на поверхности кремниевой подложки. ЧЭ состоит из центральной пластины, закрепленной при помощи упругих элементов, и трех неподвижных пластин (две основные и одна нужна для реализации функции самотестирования). В совокупности образуется дифференциальная емкость. Центральная пластина обладает чувствительной массой и может смещаться под действием ускорения, изменяя тем самым свое

положение относительно неподвижных пластин. Это приводит к изменению емкости микроконденсатора. Подвижная пластина находится в среднем положении при отсутствии ускорения.

Примером 3-осевого аналогового акселерометра служит энергоэкономичный чип LIS344ALH от компании STMicroelectronics. Инерциальный датчик включает в себя емкостной ЧЭ и блок обработки сигнала. Измерения производятся LIS344ALH в одном из двух программно задаваемых диапазонов: $\pm 2g/\pm 6g$. Наделен функцией самотестирования. Напряжение питания чипа: 2,4 В...3,6. Температурный диапазон: $-40^{\circ}\text{C}...+85^{\circ}\text{C}$.

© Г.А. Сырецкий, 2012

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЮСТИРОВКИ МИКРООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Виктор Павлович Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, старший научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Александр Сергеевич Конченко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, инженер лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru, Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант кафедры квантовой оптики

Назар Александрович Николаев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090 г. Новосибирск, просп. академика Коптюга 1, младший научный сотрудник лаборатории информационной оптики, тел. (383) 330-8453, e-mail: nazar@iae.nsk.su

Александр Анатольевич Мамрашев

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090 г. Новосибирск, просп. академика Коптюга 1, инженер-программист лаборатории информационной оптики, тел. (383) 330-8453, e-mail: mamrashev@iae.nsk.su

В статье описан метод юстировки микрооптической системы, предназначенной для увеличения эффективности генерации импульсов субмиллиметрового излучения. Увеличение эффективности достигается за счет оптимального использования фемтосекундного лазерного излучения при генерации излучения на основе эффекта Дембера.

Ключевые слова: субмиллиметровое импульсное электромагнитное излучение, микрооптика.

DEVELOPMENT OF METHODS OF ADJUSTMENT OF MICROOPTICAL SYSTEM FOR GENERATION OF SUBMILLIMETER ELECTROMAGNETIC PULSES

Victor P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptiyuga avenue 1, senior researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: victork@iae.nsk.su

Alexander S. Konchenko

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptiyuga avenue 1, laboratory of diffractive optics engineer, phone +7(383)3333-091, e-mail: as_konch@ngs.ru, Novosibirsk state university, 630090, Novosibirsk, Pirogova str., 2, undergraduate of quantum physics department

Nazar A. Nikolaev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptyuga avenue 1, laboratory of informational optics junior researcher, phone +7(383) 330-845, e-mail: nazar@iae.nsk.su

Aleksander A. Mamrashev

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptyuga avenue 1, laboratory of informational optics engineer-programmer, phone +7(383) 330-845, e-mail: mamrashev@iae.nsk.su

Paper describes a method of alignment of microoptical system intended for generation of submillimeter electromagnetic irradiation pulses. The microoptical system is designed to increase generation efficiency for account of optimal usage of femtosecond laser irradiation at generation on the base of Dember effect.

Key words: submillimeter pulsed electromagnetic radiation, microoptics, adjustment method.

На сегодняшний день генерация субмиллиметрового излучения является важной задачей для спектроскопии и прикладных задач. В этой области спектра лежит множество колебательных и вращательных уровней молекул, что открывает дополнительные возможности по идентификации и анализу состава и структуры молекул. Такое излучение более длинноволновое чем инфракрасное, имеет более высокую проникающую способность и позволяет использовать его для бесконтактного контроля и поиска взрывчатых веществ.

Отдельной задачей является генерация импульсного субмиллиметрового излучения. Установки по генерации импульсного излучения сложны в исполнении и имеют высокую стоимость, но, в отличие от непрерывного излучения, импульсный режим позволяет собирать информацию о глубине и показателе преломления объекта. К тому же, в импульсном режиме малая частота излучения позволяет проводить временной анализ излучения. Кроме амплитуды сигнала, также может быть зафиксирована фаза волны. Такие измерения позволяют напрямую измерять сдвиг фаз, вносимый объектом исследований.

Многие из методов генерации импульсного субмиллиметрового излучения основаны на фотогальваническом эффекте Дембера. Суть эффекта заключается в том, что при поглощении возбуждающего излучения на поверхности полупроводника возникают носители заряда, которые диффундируют вглубь полупроводника. Подвижность электронов, как правило, больше, чем дырок и они быстрее и глубже проникают в материал. В результате в приповерхностном слое возникает кратковременное разделение зарядов, генерирующее импульс субмиллиметрового излучения. В классическом эффекте Дембера колебания концентрации носителей заряда направлены вглубь полупроводника, а максимум интенсивности излучения направлен вдоль поверхности, что значительно снижает эффективность излучения за счет поглощения внутри полупроводника. Для того, чтобы повысить эффективность генерации, можно «развернуть» получившиеся диполи вдоль поверхности, тогда максимум интенсивности излучения будет направлен перпендикулярно поверхности.

Существует несколько способов развернуть диполи^[1]. Один из них заключается в том, что если нанести на поверхность полупроводника непрозрачное металлическое покрытие с резкой границей, то на границе электроны быстрее дырок диффундируют под покрытие и возникает разделение заряда вдоль поверхности. При нанесении набора линейных полос непрозрачного покрытия излучение генерируется на каждой из границ, и эффективность должна резко повышаться, но излучение от двух противоположных границ одной полосы в дальней зоне интерферирует деструктивно.

Одно из решений проблемы деструктивной интерференции заключается в том, чтобы использовать для генерации только одну границу полосы. Например, применялось покрытие в виде металлической линейной решетки с ассиметричным профилем штрихов [2]. Но в такой постановке эксперимента есть очевидный недостаток – высокие потери возбуждающего фемтосекундного излучения на поглощение и отражение металлической решеткой. В настоящей работе обсужден способ настройки оптической схемы для генерации субмиллиметрового излучения, позволяющей повысить эффективность использования возбуждающего фемтосекундного лазерного излучения (ФЛИ). В данном методе ФЛИ фокусируется растром цилиндрических микролинз на края зон линейной бинарной амплитудной решетки, сформированной на поверхности полупроводника. Таким образом, генерация субмиллиметрового излучения происходит только с одной стороны металлических полос при существенно более низких потерях энергии ФЛИ.

Для реализации предложенного метода была изготовлен растр цилиндрических микролинз с периодом 10 и 15 мкм и фокусом 20 мкм и 30 мкм и линейная решетка из непрозрачных полосок золота с таким же периодом на поверхности пластин InSb(Ge) и InAs. Для совмещения сфокусированных пучков с краями линейной решетки была создана установка совмещения, где на время настройки пучок фемтосекундного импульсного лазера с длиной волны 1.55 мкм был заменен на полупроводниковый лазер с длиной волны 632 нм.

Для контроля совмещения по визуальному изображению использовался эффект Муара. По ширине и ориентации муаровых полос можно судить о степени параллельности решетки микролинз и амплитудной золотой решетки (рис.1). При идеально совмещенных решетках ширина полос Муара стремится к бесконечности, а их направление совпадает с ориентацией совмещаемых решеток. Таким образом, поворачивая решетку и добившись максимально возможной ширины полос, мы считаем образцы совмещенными по направлению (рис. 2).

О попадании поверхности полупроводника в фокус микролинз также можно судить по поведению полос Муара. Чем меньше ширина распределения интенсивности света на поверхности полупроводника, тем полосы более контрастные.

Для того, чтобы получить количественное подтверждение качества настройки системы, после визуального наблюдения проводились измерения интенсивности отраженного от решеток света. При идеально сфокусированной и совмещенной системе график зависимости интенсивности отраженного света

от сдвига решеток должен представлять собой меандр. Максимальное значение интенсивности должно соответствовать попаданию сфокусированного пятна на золотое покрытие, а минимальное – на поверхность полупроводника.

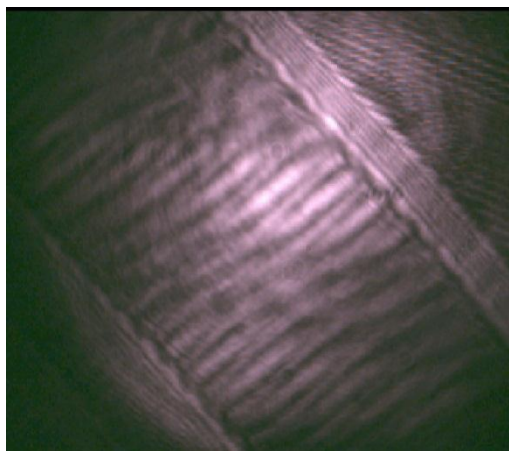


Рис. 1. Полосы Муара при плохом совмещении ориентации образцов

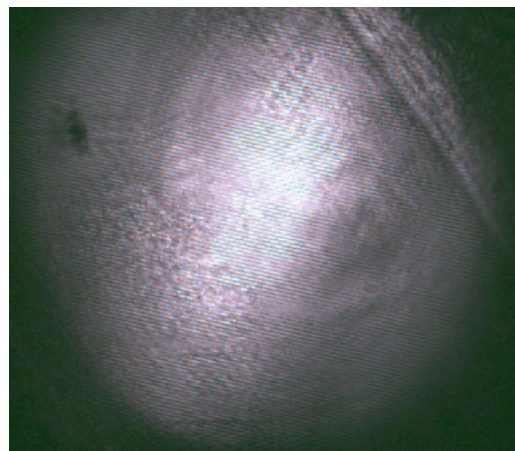


Рис. 2. Широкая полоса Муара при сонаправленных решетках

Экспериментально полученный график для решетки 15 мкм представлен на рис. 3. Участки постоянной интенсивности свидетельствуют о том, что ширина пятна на поверхности образца была меньше ширины полосы металлического покрытия. Для определения точного размера пятна мы воспользовались методом ножа Фуко. Усредненная ширина пятна по уровню e^{-2} составила 3 мкм.

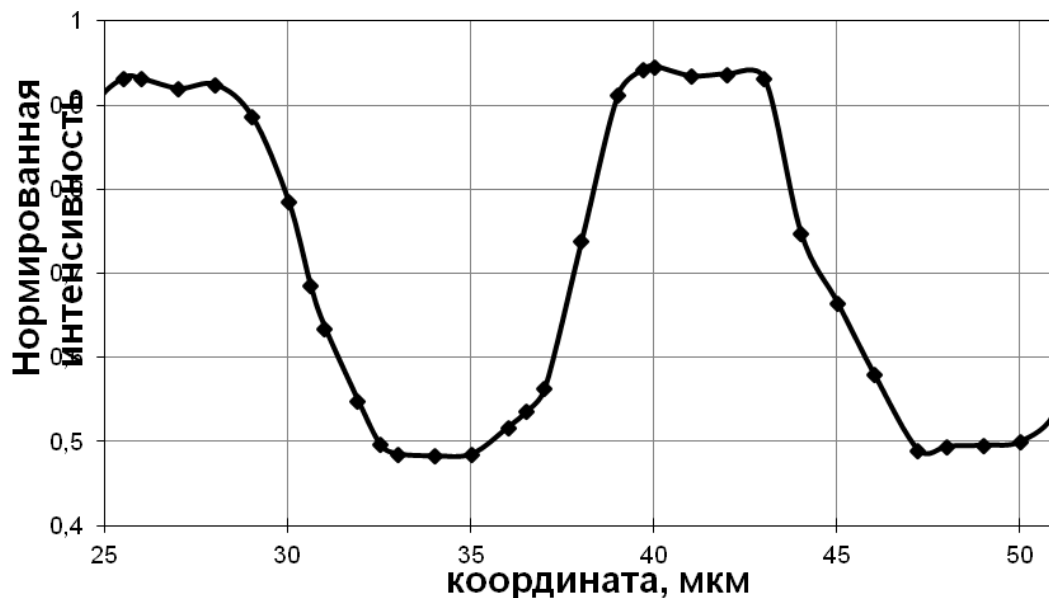


Рис. 3. График зависимости интенсивности отраженного от образца светового пучка от координаты взаимного сдвига решеток

После юстировки микрооптической системы фемтосекундный лазерный пучок заводился по нормали к поверхности микролинзового растра. Сбор субмиллиметрового импульсного излучения производился в обратном направлении. Для коллимации субмиллиметрового (и фокусировки ФЛИ) было установлено внеосевое поворотное градусное параболическое зеркало. После фильтрации от излучения накачки субмиллиметровое излучение фокусируется таким же зеркалом на детектор. Грубая установка внеосевых параболических зеркал осуществляется по шаблону, при этом область излучения на генераторе помещается в фокус зеркала. Для точной настройки используется матовая бумага, помещенная максимально близко к фокусу и рассеивающая обратно отраженное излучения лазера накачки, которое фокусируется вторым зеркалом на детектор и должно симметрично сходиться визуально из круглого пятна в точку. Окончательная юстировка системы производится по максимум сигналу с детектора субмиллиметрового излучения.

Заключение. Разработана методика юстировки микрооптической системы для генерации субмиллиметрового излучения путем фокусировки фемтосекундного лазерного излучения растром цилиндрических микролинз на границы штрихов непрозрачной линейной решеткой из золота на поверхности полупроводника. Разработана методика юстировки оптической системы транспортировки фемтосекундного лазерного излучения к микрооптической системе и вывода субмиллиметрового электромагнитного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Царев М.В., Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 75 с.
2. G. Klatt¹, F. Hilser, W. Qiao, et al, Terahertz emission from lateral photo-Dember currents // OPTICS EXPRESS, 2010, Vol. 18, No. 5, 4939.

© В.П. Корольков, А.С. Конченко, Н.А. Николаев, А.А. Мамрашев, 2012

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ НЕТИПИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДОЭ

Александр Григорьевич Полещук

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект акад. Коптюга, 1, доктор технических наук, заведующий лабораторией дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: poleschchuk@iae.nsk.su

Руслан Камильевич Насыров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Проспект акад. Коптюга, 1, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики, тел. (383)3333-091, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Рассмотрены вопросы применения дифракционных оптических элементов для прецизионного контроля формы нетипичных оптических поверхностей. Приведены результаты разработки методов расчета и изготовления ДОЭ, а также контроля неосесимметричных поверхностей.

Ключевые слова: Дифракционная оптика, синтезированные голограммы, контроль асферики, цилиндрическая оптика, нетипичные оптические поверхности, интерферометры.

TEST OF A FREE FORM SURFACES BY MEANS OF DOE

Alexander G. Poleschchuk

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, head of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: poleschchuk@iae.nsk.su

Ruslan K. Nasirov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Novosibirsk, Koptuyuga avenue 1, researcher of laboratory of diffractive optics, phone +7(383)3333-091, e-mail: nasyrov.ruslan@gmail.com

Application of diffraction optical elements for precision testing of the freeform optical surfaces are considered. Results of development of the methods of design, manufacture of DOE, and also testing of non-axis-symmetrical surfaces are presented.

Key words: diffraction optics, computer generated holograms, aspherical optics test, cylindrical optics, free form optical surfaces, interferometers.

Введение. В настоящее время достигнут существенный прогресс в области изготовления и контроля оптических поверхностей с нанометрической точностью. Обычный интерферометр обеспечивает контроль плоских или сферических поверхностей. Для контроля поверхностей сложной формы, например, асферических, цилиндрических, конических, торических, а в общем случае произвольной формы (Freeform surfaces), необходимо использовать корректоры волнового фронта [1]. В качестве таких корректоров наиболее часто используют дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Однако расчет,

изготовление и применение ДОЭ для контроля нетипичных поверхностей имеет ряд особенностей.

В настоящей работе представлены результаты разработки оптических схем, методов расчета и применения ДОЭ для контроля формы цилиндрических, конических и произвольных оптических поверхностей.

Контроль цилиндрических поверхностей. Основная проблема при разработке интерферометрических схем контроля цилиндрических поверхностей – это фильтрация автоколлимационных бликов. Для того, чтобы их исключить, вводят небольшой излом оптической оси непосредственно перед ДОЭ в пределах $\varphi=0.5-1$ градуса [2]. В этом случае блики от контролируемой поверхности не попадают в интерферометр. Для компенсации наклона в фазовую функцию ДОЭ добавляют эквивалент клина, который представляет собой дифракционную решетку с постоянным шагом. Для того чтобы обеспечить заданный наклон ДОЭ, дополнительно на той же подложке записывается вспомогательная решетка с периодом $T=\lambda/2\sin(\varphi)$. При этом свет в первом порядке дифракции возвращается строго назад в интерферометр, когда ДОЭ наклонена на нужный угол. Соответственно, по этой вспомогательной интерферограмме можно выставить угол наклона ДОЭ с точностью до нескольких угловых секунд.

Для контроля цилиндрических поверхностей с большой числовой апертурой, мы предлагаем использовать интерферометр Физо с эталонным объективом (ЭО). В этом случае ДОЭ устанавливается строго перпендикулярно оптической оси в сходящемся пучке света, как показано на рис. 1а. Для юстировки ДОЭ относительно интерферометра используется вспомогательный отражательный дифракционный элемент в виде дифракционного аналога сферы. Преимущество такой схемы заключается в том, что период дифракционной структуры ДОЭ (рис.1б) в два раза больше, чем в известных схемах и все оптические компоненты располагаются вдоль оптической оси.

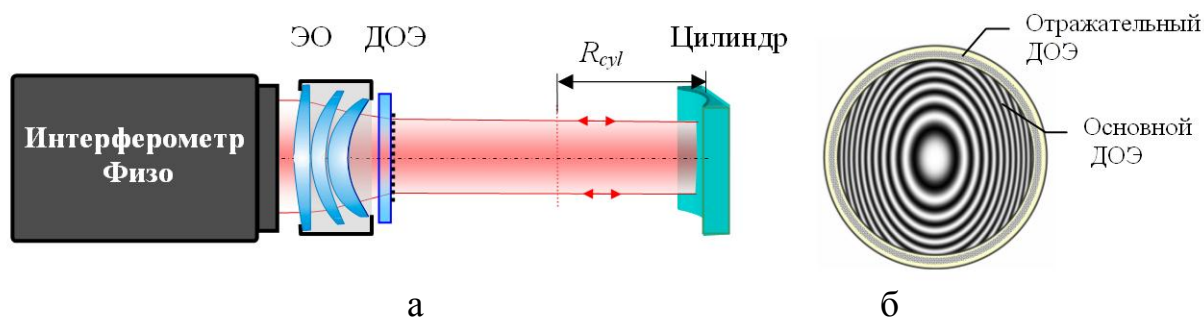


Рис. 1. Оптическая схема (а) контроля цилиндрической поверхности и вид фазовой функции ДОЭ (б)

Контроль поверхностей свободной формы. Сложные оптические поверхности не имеют осевой симметрии и могут задаваться в виде двумерной карты. Но, как правило, оптические поверхности являются гладкими и могут

быть описаны полиномами. Характерное описание для такой поверхности - это внеосевой участок тороидальной поверхности:

$$z(x, y) = \frac{C_x X^2 + C_y Y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_x)(C_x^2 X^2) - (1 + K_y)(C_y^2 Y^2)}} + \\ + AR[(1 - AP)X^2 + (1 + AP)Y^2]^2 + BR[(1 - BP)X^2 + (1 + BP)Y^2]^3 + \\ + CR[(1 - CP)X^2 + (1 + CP)Y^2]^4 + DR[(1 - DP)X^2 + (1 + DP)Y^2]^5$$

где C_x , C_y – кривизна, а K_x , K_y – конические константы, соответственно вдоль координат X и Y . AR , BR , CR , DR – осесимметричные, а AP , BP , CP , DP – неосесимметричные коэффициенты полинома.

Имеются две основные особенности при разработке оптических систем контроля таких поверхностей.

1. Расчет функции пропускания ДОО требует существенных объемов вычислений. Это связано с тем, что дифракционная структура является внеосевой, поэтому необходим расчет всей поверхности с плотностью 4000×4000 отсчетов фазы на мм^2 и более. Объем данных достигает десятков и сотен Гб для ДОО диаметром более 100 мм.

2. Для обеспечения погрешности контроля менее $1/10$ длины волны, оптическая измерительная система (рис. 2а), включающая интерферометр, ЭО, ДОО и поверхность должны быть установлены в пространстве в расчетные положения вдоль осей x , y , z с погрешностью менее 1 мкм и углов α_x , α_y , α_z с погрешностью порядка 1 угл. сек. Такую точность практически невозможно обеспечить без дополнительных юстировочных ДОО (рис. 2б).

В настоящей работе, для точной установки ДОО относительно контролируемой поверхности использовались дополнительные юстировочные ДОО (рис. 2б), которые фокусировали свет в заданные точки пространства. На контролируемой поверхности изготавливались сферические микрозеркала (МЗ). Оптическая схема рассчитывалась таким образом, чтобы световой поток сфокусированный дополнительными ДОО отражался от микрозеркал строго назад в интерферометр. Таким образом, по нескольким интерферограммам можно однозначно выставить контролируемую поверхность относительно ДОО.

Эксперимент. Для экспериментального исследования предложенных оптических схем были изготовлены ДОО с амплитудным и фазовым пропусканием. Запись дифракционных структур в пленках хрома нанесенных на кварцевые подложки производилась на установке CLWS-300IAE [3]. Фазовый рельеф получался методом реактивного-ионного травления на установке Plasmalab 80+. Контроль формы поверхностей проводился с помощью интерферометра Intellium Z100 с эталонными объективами $f/2.2$ и $f/3.3$. На рис. 3 в качестве примера приведены интерферограмма (а) и карта (б) поверхности, полученные с помощью цилиндрического ДОО. Видно, что интерферограмма в центре (квадратной формы) обеспечивает контроль исследуемой поверхности, а интерферограмма на периферии обеспечивает установку ДОО в расчетное положение.

Заключение. Разработаны интерферометрические схемы контроля цилиндрических, конических и произвольных оптических поверхностей. Разработаны методы расчета и изготовления ДОЭ. Показано, что при помощи вспомогательных юстировочных ДОЭ можно контролировать положение ДОЭ в пространстве с точностью нескольких угловых секунд.

Данная работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта № 112 СО РАН, программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 24-8 и проектов РФФИ 12-02-00974-а и 12-02-01118-а.

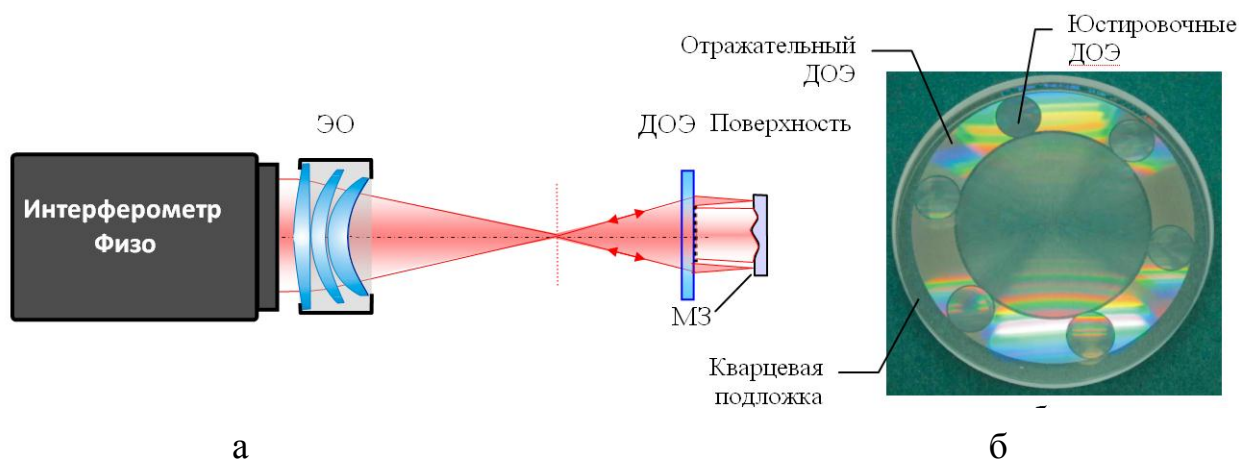


Рис. 2. Оптическая схема (а) контроля поверхности свободной формы и вид изготовленного ДОЭ (б)

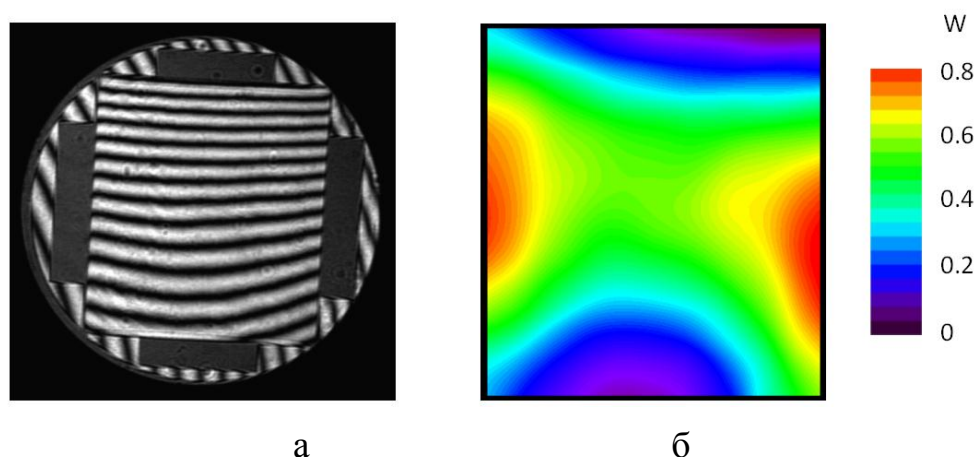


Рис. 3. Интерферограмма (а) и карта (б) поверхности, полученные с помощью цилиндрического ДОЭ. Погрешность волнового фронта 0.8λ (PV) и 0.18λ (rms)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chang Y.-C., Zhou P., and Burge J.H. Analysis of phase sensitivity for binary computer-generated holograms// Appl. Opt.-2006.- V.45.-P. 4223-4234.
2. <http://www.diffraction.com/cylinder.php>.

3. Poleshchuk A.G., Churin E.G., Koronkevich V.P., Korolkov V.P., etc.. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure// Appl. Opt.-1999.-V. 38.-P. 1295-1301.

© А.Г. Полещук, Р.К. Насыров, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Игорь Анатольевич Козулин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1, инженер, тел. 8-923-182-0897, e-mail: igornt@yandex.ru

Владимир Васильевич Кузнецов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1, доктор физико-математических наук, зав. отделом теплофизики многофазных систем, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

В работе изучена структура потока и градиенты давления при двухфазном газожидкостном течении в микроканале прямоугольного сечения с поперечным размером существенно меньше капиллярной постоянной. Изучение структуры потока осуществлялось с помощью видеосъемки и методом лазерного сканирования течения.

Ключевые слова: микроканал, газожидкостное течение, режимы течения, скорость снарядов, статистические характеристики потока.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TWO-PHASE FLOW IN RECTANGULAR MICROCHANNEL

Igor A. Kozulin

Institute of Thermophysics SB RAS, pr. Akademika Lavrentjeva, 1, Novosibirsk 630090, engineer, tel. 8-923-182-0897, e-mail: igornt@yandex.ru

Vladimir V. Kuznetsov

Institute of Thermophysics SB RAS, pr. Akademika Lavrentjeva, 1, Novosibirsk 630090, Dr. Sc., Head Laboratory of multiphase systems, e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

In this paper was observed the structure of the flow and pressure gradients of two-phase gas-liquid flow in the microchannel with rectangular cross section and dimension substantially less than the capillary constant. The study of the flow structure was carried out using video and the method of laser scanning flow.

Key words: microchannel, gas-liquid flow, flow regimes, slug velocity, the statistical characteristics of the flow.

1. Введение

Микроканальные системы в последнее время начинают применяться в электронике для охлаждения процессоров суперкомпьютеров, в энергетике, химических и медицинских технологиях. Это связано, как со значительным увеличением поверхности тепло и массообмена при переходе к каналам микронного размера, так и с возможностью организации новых режимов течения для каналов, с поперечным размером значительно меньше капиллярной постоянной. В литературе имеется достаточно много работ по исследованию

восходящих и горизонтальных газожидкостных потоков для труб малого диаметра. В работах [1, 2] представлен обзор работ по режимам газожидкостного течения в круглых и прямоугольных трубах малого размера. Большинство работ по исследованию двухфазных течений в трубах малого размера посвящены рассмотрению режимов течения, были выделены три основные режимы течения: изолированные пузырьки, сжатые пузырьки и кольцевое/снарядное течение. В данной работе проводилось исследование структуры двухфазного течения вода-азот в горизонтальном прямоугольном микроканале с размерами $0,217 \times 0,370$ мм и гидравлическим диаметром 274 мкм, то есть в канале с поперечным размером существенно меньше капиллярной постоянной, равной для воды 2,7 мм.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для изучения гидродинамики двухфазного газожидкостного потока представлена на рис. 1. В экспериментальной установке сжатый газ (N_2) поступал из баллона (1) через цифровой регулятор расхода газа (3) в экспериментальный участок (5). Вода поступала из бака (2) через цифровой термо-массовый регулятор расхода жидкости LIQUI-FLOW L30, и далее в Т-образный смеситель, где проводилось смешивание жидкости и газа, в прямоугольный микроканал. Поперечный размер микроканала равен $0,217 \times 0,370$ мм, длина 300 мм. На выходе из экспериментального участка газожидкостная смесь разделялась, и вода откачивалась перистальтическим насосом (9) в открытый бак. Для исследования режимов газожидкостного течения использовался метод двойного лазерного сканирования. В данном методе два лазера (7) располагались так, что лазерные лучи освещали длинную сторону прямоугольного канала с диаметром светового пятна порядка поперечного размера канала. Расстояние между лучами равно 53 мм. Питание лазеров осуществлялось с помощью источника напряжения ТЕС-42 (8). Интенсивность прошедшего света измерялась с помощью фотодиодов (6), расположенных на противоположной стороне канала. Сигналы с фотодиодов регистрировались с помощью высокоскоростной платы АЦП (Lcard L-264) и обрабатывались на компьютере (11). Оцифровка сигнала осуществлялась с частотой 5 кГц. С лицевой стороны канала, проводилась визуализация течения при помощи цифровой видеокамеры AOS X-Pri (10).

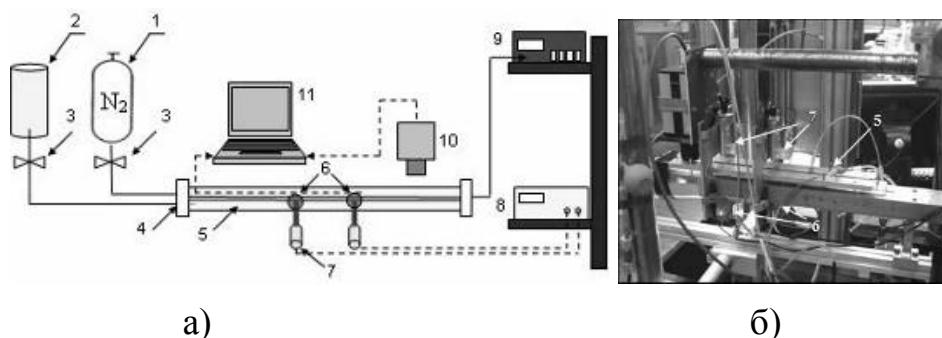


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для моделирования горизонтального газожидкостного течения в микроканале – (а), и фото экспериментального стенда для изучения гидродинамики горизонтального течения – (б)

3. Режимы течения

Применение метода непрерывного лазерного сканирования потока позволило детально изучить структуру двухфазного потока в микроканале прямоугольного сечения. В результате проведенных исследований были определены режимы течения. Режимы течения определялись как по визуализации течения с помощью скоростной видео камеры, так и с помощью лазерного сканирования. Получено, что основными режимами течения в микроканале являются режим течения с периодическими и непериодическими удлинненными пузырями (аналог снарядного течения) и кольцевое течение.

Периодическое течение с удлинненными пузырями наблюдается в микроканале в диапазонах приведенных скоростей и чисел Рейнольдса по жидкости $J_{liq}=0,035\div0,192$ м/с ($Re_{liq}=10\div53$) и газа $J_{gas}=0,08\div0,67$ м/с ($Re_{gas}=2\div12$). Оно характеризуется последовательным прохождением удлинненных пузырей и жидких пробок, и длина пузырей возрастает с увеличением расхода газа. На рис. 2 приведены сигналы с фотодиода и визуализация течения для течения с короткой и длинной жидкой перемычкой.

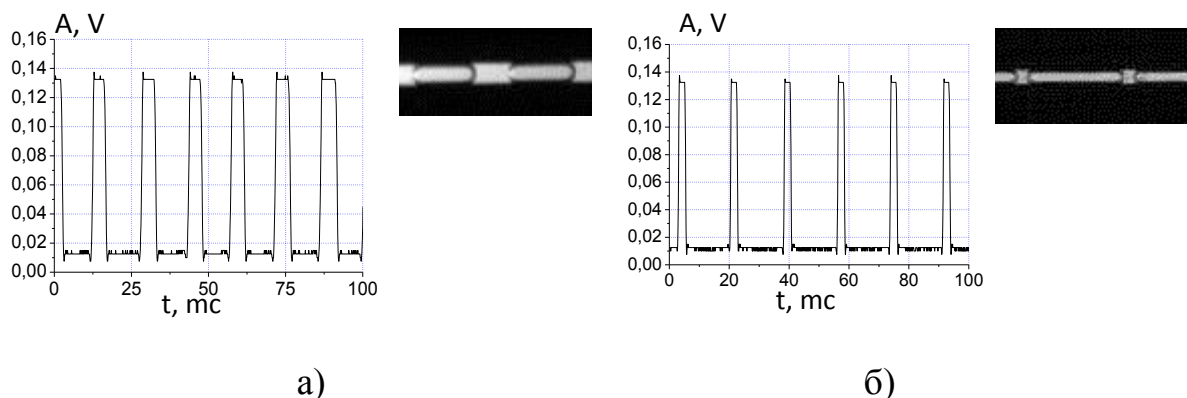


Рис. 2. Оптический сигнал с фотодиода и визуализация для снарядного периодического режима течения а) $J_{liq}=0,052$ м/с, $J_{gas}=0,083$ м/с б) $J_{liq}=0,036$ м/с, $J_{gas}=0,212$ м/с

Непериодическое течение с удлинненными пузырями наблюдается в диапазоне приведенных скоростей жидкости $J_{liq}=0,035\div0,088$ м/с ($Re_{liq}=10\div24$) и газа $J_{gas}=0,68\div4,2$ м/с ($Re_{liq}=10,7\div75$). На рис. 3 (а) представлен сигнал с фотодиода и визуализация течения для этого режима течения. В отличие от эмульсионного течения для каналов с гидравлическим диаметром больше 1 мм, снарядный непериодический режим не характеризовался разрушением заднего фронта снаряда. Газовые снаряды, движущиеся в микроканале, имеют разную длину, при этом более короткие снаряды газа могут догонять более медленные длинные и объединяться.

С увеличением приведенной скорости газа наблюдался переход к кольцевому режиму течения. Данный режим наблюдался при скоростях жидкости $J_{liq}=0,035\div0,088$ м/с ($Re_{liq}=10\div24$) и газа $J_{gas}=4,15\div20,0$ м/с ($Re_{gas}=74\div357$). На рис. 3 (б) представлена визуализация кольцевого режима

течения. Из визуализации видно, что кольцевое течение характеризуется тем, что газовое ядро движется в центре канала, жидкость при этом течет в виде устойчивой волновой пленки по стенкам микроканала.

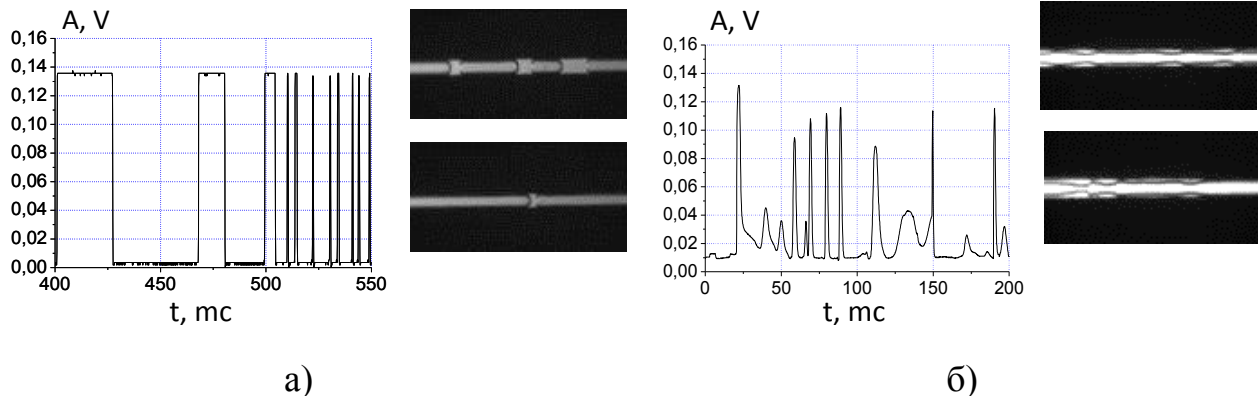


Рис. 3. Оптический сигнал с фотодиода и визуализация для снарядного неперидического течения $J_{liq}=0.055$ м/с, $J_{gas}=0.627$ м/с - (а) и оптический сигнал с фотодиода и визуализация течения для кольцевого режима течения при $J_{liq}=0.052$ м/с, $J_{gas}=4.152$ м/с - (б)

На рис. 4 приведена карта режимов течения для микроканала 0,217x0,370 мм. Проведено сравнение режимов с модифицированной моделью Mishima K., Ishii M., которая предложена в работе [3]. При сравнении видно, что модель не удовлетворительно описывает границы режимов течения в микроканале. Это связано с тем, что в работе не учитывается эффекты стеснения и доминирования капиллярных сил в каналах с поперечным размером существенно меньше капиллярной постоянной.

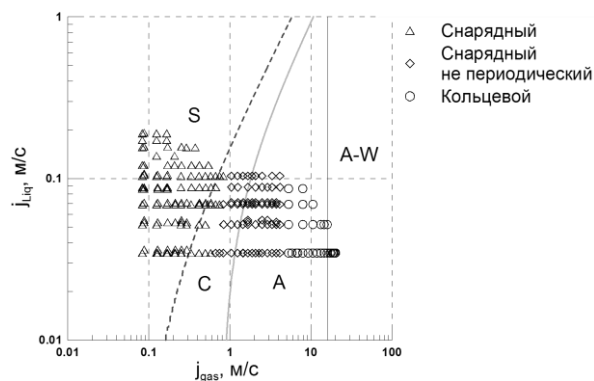


Рис. 4. Карта режимов течения в микроканале с размерами 0,217x0,370 мм и сравнение границ режимов с расчетом по модифицированной модели Mishima K., Ishii M. [3], где S-область снарядного режима, С - эмульсионного, А – кольцевого, А-В – дисперсно-кольцевого течения

4. Перепад давления

Проведено измерение градиентов давления в горизонтальном микроканале 0,217x0,370 мм и соотношением сторон 0,729. Число Пуазейля для микроканала

составило 15,08. В микроканале измерялся перепад давления для однофазного и двухфазного течения до 30 кПа. Ограничение связано с возможностью разрушения микроканала при больших перепадах давления.

На рис. 5 (а) представлена зависимость фактора трения от числа Рейнольдса для однофазного и двухфазного течения. Число Рейнольдса построено по гомогенной модели Dukler et. al. [4]. Все точки лежат в области ламинарного течения. Из рисунка видно, что экспериментальные точки лежат существенно выше расчета по гомогенной модели [4]. С увеличением приведенной скорости потока данные для двухфазного потока при кольцевом режиме течения стремятся к расчету по гомогенной модели.

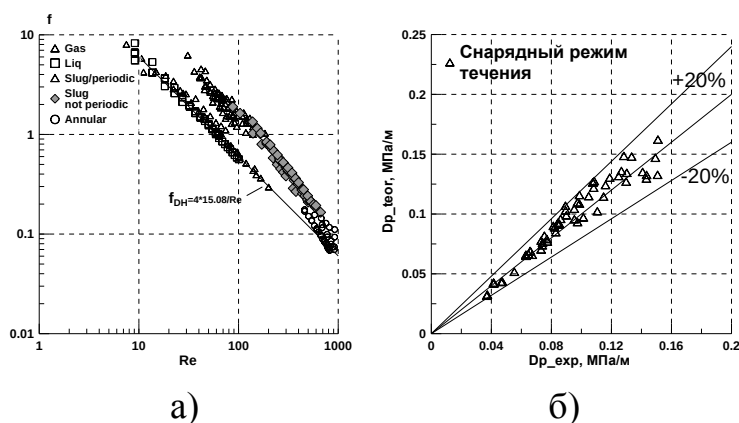


Рис. 5. а) Коэффициент сопротивления для однофазного и двухфазного режимов течения б) Сравнение двухфазного перепада давления в микроканале между экспериментом и расчетом по модели Kreutzer M.T. et.al. [5]

На рис. 5 (б) приведено сравнение измеренных градиентов давления для двухфазного течения с расчетом по модели [5], предложенной для микроканалов. Данная модель построена для снарядного режима течения, для которого длины газового снаряда и жидкой перемычки определялись с помощью визуализации и метода лазерного сканирования. Как видно на рисунка, модель аппроксимирует экспериментальные данные с ошибкой меньше $\pm 20\%$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-01140-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Coleman J.W., Garimella S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1999. – V. 42, № 15. – P. 2869–2881.
2. Sarisorn, S., Wongwises, S. Review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – V12, № 3. – P. 824–838.
3. Козулин И.А., Кузнецов В.В. Статистические характеристики двухфазного газожидкостного потока в вертикальном микроканале // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, N 6. – С. 129-139.

4. Dukler A. E., Wicks M., and Cleveland R. G. Frictional pressure drop in two-phase flow // AIChE J. – 1964. – Vol.10(1). – P. 38-51.
5. Kreutzer M.T., Kapteijn F., Moulijn J.A., Kleijn C.R., Heiszwolf J.J. Inertial and interfacial effects on pressure drop of Taylor flow in capillaries // AIChE J. – 2005. – Vol. 51(9). – P. 2428–2440.

© И.А. Козулин, В.В. Кузнецов, 2012

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ СРЕД СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Валентин Владиславович Комиссаров

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, тел. 8(383)3519714, 89138979648, e-mail: kmssrv@lvs.ru

Наталья Васильевна Комиссарова

Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА), 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, Новосибирск, старший преподаватель кафедры высшей математики, тел. 8(383)3519714, 89138979615, e-mail: n_kmssrv@ngs.ru.

Рассматривается прямая задача теплопроводности состоящая в отыскании функции, удовлетворяющей в области сложной конфигурации уравнению теплопроводности при заданных начальных и граничных условиях. Подобные постановки задачи возникают в строительстве, при моделировании процессов распространения тепла.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, неявная разностная схема, начальные условия, граничные условия, шести точечный шаблон, продольно-поперечная схема, локально-одномерная схема, метод прогонки, устойчивость схемы.

THE SOLUTION OF THE DIRECT HEAT CONDUCTION PROBLEM FOR ENVIRONMENTS WITH COMPLEX GEOMETRY

Valentin V. Komissarov

Candidate of Physics and Mathematics (Cand. Sci. (Phys.–Math.)), associate professor, Novosibirsk State Technical University (NSTU), 10 strit Karla Marksa, Novosibirsk 630073, associate professo, department of higher mathematics, tel. 8(383)3519714, 89138979648, e-mail.: kmssrv@lvs.ru

Natal'ja V. Komissarova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 10 Plachotnogo, Novosibirsk 630108, senior teacher, department of higher mathematics, tel. 8(383)3519714, 89138979615, e-mail.: n_kmssrv@ngs.ru

The direct problem of heat conductivity consisting in search of the function satisfying in the field of a difficult configuration to the equation of heat conductivity at for-g initial and boundary conditions is considered. Similar statements of a problem arise in building, at modeling of processes of distribution of heat.

Key words: the heat conductivity equation, implicit разностная the scheme, entry conditions, the boundary conditions, six dot template, the longitudinal-cross-section scheme, the locally-one-dimensional scheme, a prorace method, stability of the scheme.

Рассматривается прямая задача теплопроводности состоящая в отыскании функции $u(x,t)$, удовлетворяющей в некоторой области D уравнению теплопроводности: при заданных начальных и граничных условиях. Область D при этом обладает достаточно сложной геометрией. В двухмерном случае, например, область может быть не выпуклая, кроме этого во внутренней части

области могут находиться источники тепла достаточно сложной конфигурации. Подобные постановки задачи возникают в строительстве, при моделировании процессов распространения тепла.

В качестве примера иллюстрирующего предложенный алгоритм рассмотрим прямую двумерную задачу теплопроводности. Задача состоит в отыскании функции $u(x,y,t)$, удовлетворяющей в области $D = \{(x,y,t) \mid 0 < x < a, 0 < y < b, 0 < t \leq t_{\max}\}$ уравнению

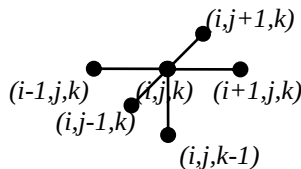
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho C}{\beta} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \\ u(x, y, 0) = T_0, \\ u(x, y, t) = T_1, (c \leq x \leq d) \& (e \leq y \leq f), \\ u(0, y, t) = T_2, \\ u(a, y, t) = T_2, \\ u(x, 0, t) = T_2, \\ u(x, b, t) = T_2. \end{array} \right. \quad (1)$$

$(0 < c < d < a, 0 < e < f < b)$

Здесь T_0 начальное значения температуры, в общем случае $T_0 = T_0(x,y)$, температура источника тепла T_1 и температура на границы области T_2 . Условие $(c \leq x \leq d) \& (e \leq y \leq f)$ определяет прямоугольную область в которой находится источник тепла. В случае более сложной геометрии источника тепла его можно представить в виде объединения выпуклых областей, области могут быть пересекающиеся, если это удобно при описании.

Построим в области D равномерную прямоугольную сетку с шагом h в направлении x, y и с шагом τ – в направлении t . Обозначим узлы сетки (x_i, y_j, t_k) , а приближенные значения функции $u(x,y,t)$ в этих узлах – $u_{i,j}^k$. Тогда $x_i = ih, i = 0, 1, \dots, n_x, n_x = a/h; y_j = jh, j = 0, 1, \dots, n_y, n_y = b/h; t_j = j\tau, j = 0, 1, \dots, m, \tau = t_{\max}/m$.

Аппроксимируем уравнение теплопроводности на шести точечном шаблоне:



Воспользуемся продольно-поперечной схемой (неявный метод переменных направлений) [3]. Переход от слоя $k - 1$ к слою k совершается в два этапа с шагами $0,5\tau$: сначала решается уравнение, неявное по направлению x и явное по направлению y , переход со слоя $k - 1$ на слой $k - 1/2$, затем уравнение явное по направлению x и неявное по направлению y , переход со слоя $k - 1/2$ на слой k .

Продольно-поперечная схема безусловно устойчива (при любых τ и h) и имеет точность $O(\tau^2 + h^2)$.

Переход от слоя $k - 1$ к слою k совершается в два этапа с шагами 0.5 τ : сначала решается уравнение, неявное по направлению x и явное по направлению y , переход со слоя $k - 1$ на слой $k - \frac{1}{2}$, затем уравнение явное по направлению x и неявное по направлению y , переход со слоя $k - \frac{1}{2}$ на слой k .

Схема неявная по направлению x и явная по направлению y .

Обозначим далее $N_x = a/h$, $N_y = b/h$, $N_c = c/h$, $N_d = d/h$, $N_e = e/h$, $N_f = f/h$,

$$\lambda_{i,j} = \frac{\beta(x_i, y_j)\tau}{\rho(x_i, y_j)C(x_i, y_j)h^2}.$$

Алгоритм в этом случае следующий: последовательно для всех j по явной разностной схеме определяется значение поля температур $u(x_i, y_j, t_{k-1/2}) \approx \underline{u}_{i,j+1}^{k-1/2}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Для всех } i = \overline{1, N_x - 1}, j = \overline{1, N_y - 2}, \text{ имеем,} \\ \text{если } (N_c \leq i \leq N_d) \& (N_e - 1 \leq j \leq N_f - 1), \text{ то } \underline{u}_{i,j+1}^{k-1/2} = T_1, \text{ иначе} \\ \underline{u}_{i,j+1}^{k-1/2} = \lambda_{i,j+1}(u_{i+1,j+1}^{k-1} + u_{i-1,j+1}^{k-1} + u_{i,j+2}^{k-1} + u_{i,j}^{k-1} - 4u_{i,j+1}^{k-1}) + u_{i,j+1}^{k-1}, \\ \underline{u}_{i,N_y}^{k-1/2} = T_2, i = \overline{1, N_x - 1}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Далее это значение используется в неявной схеме при решении системы $N_x + 1$ линейных уравнений с $N_x + 1$ переменными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{u}_{0,j}^{k-1/2} = T_2, \\ \text{для всех } i = \overline{1, N_x - 1}, j = \overline{1, N_y - 1}, \text{ имеем,} \\ \text{если } (N_c \leq i \leq N_d) \& (N_e \leq j \leq N_f), \text{ то } \underline{u}_{i,j}^{k-1/2} = T_1, \text{ иначе} \\ \lambda_{i,j} \underline{u}_{i-1,j}^{k-1/2} - (1 + 4\lambda_{i,j}) \underline{u}_{i,j}^{k-1/2} + \lambda_{i,j} \underline{u}_{i+1,j}^{k-1/2} = -\lambda_{i,j} \underline{u}_{i,j-1}^{k-1/2} - \underline{u}_{i,j}^{k-1} - \lambda_{i,j} \underline{u}_{i,j+1}^{k-1/2}, \\ \underline{u}_{N_x,j}^{k-1/2} = T_2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для перехода с $k - 1$ -го слоя на $k - \frac{1}{2}$ -ый всего решается $N_y - 1$ таких систем.

Схема неявная по направлению y и явная по направлению x : последовательно для всех i по явной разностной схеме определяется значение поля температур $u(x_i, y_j, t_{k-1/2}) \approx \bar{u}_{i+1,j}^k$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Для всех } i = \overline{1, N_x - 2}, j = \overline{1, N_y - 1}, \text{ имеем,} \\ \text{если } (N_c - 1 \leq i \leq N_d - 1) \& (N_e \leq j \leq N_f), \text{ то } \bar{u}_{i+1,j}^k = T_1, \text{ иначе} \\ \bar{u}_{i+1,j}^k = \lambda_{i+1,j}(u_{i,j}^{k-1/2} + u_{i+1,j-1}^{k-1/2} + u_{i+1,j+1}^{k-1/2} + u_{i+2,j}^{k-1/2} - 4u_{i+1,j}^{k-1/2}) + u_{i+1,j}^{k-1/2}, \\ \bar{u}_{N_x,j}^k = T_2, j = \overline{1, N_y - 1}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Далее это значение используется в неявной схеме при решении системы $N_y + 1$ линейных уравнений с $N_y + 1$ переменными:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{i,0}^k = T_2, \\ \text{для всех } i = \overline{1, N_x - 1}, j = \overline{1, N_y - 1}, \text{ имеем,} \\ \text{если } (N_c \leq i \leq N_d) \& (N_e \leq j \leq N_f), \text{ то } u_{i,j}^k = T_1, \text{ иначе} \\ \lambda_{i,j} u_{i,j-1}^k - (1 + 4\lambda_{i,j}) u_{i,j}^k + \lambda_{i,j} u_{i,j+1}^k = -\lambda_{i,j} u_{i-1,j}^k - u_{i,j}^{k-1/2} - \lambda_{i,j} u_{i+1,j}^{-k}, \\ u_{i,N_y}^k = T_2. \end{array} \right. \quad (5)$$

Для перехода с $k - 1/2$ -го слоя на k -ый всего решается $N_x - 1$ таких систем.

Матрица системы уравнений имеет специальный вид: она трехдиагональная, если i -ый слой (в случае схемы неявная по направлению x и явная по направлению y) или j -ый столбец (для схемы неявная по направлению y и явная по направлению x) не проходит через источник тепла матрица системы. Если же соответствующий слой проходит через источник тепла, то в матрице на соответствующих местах стоят единицы.

Системы уравнений с матрицей подобной структуры рациональней всего решать методом прогонки или методом Зейделя.

Продольно-поперечная схема безусловно устойчива (при любых τ и h) и имеет точность $O(\tau^2 + h^2)$.

Рассмотренный алгоритм может быть обобщен на случай нескольких источников тепла, располагающихся внутри области D и в случае границы области (помещения) произвольной формы.

Схема (2) – (5) нельзя обобщить на случай трех пространственных переменных x, y, z . Так построенная схема неустойчива.

Используя подобный подход к описанию геометрии, рассмотренный алгоритм будет пригодным для решения уравнения теплопроводности с переменными и даже разрывными коэффициентами в произвольной области любого числа измерений с помощью локально-однородного метода ([3], стр. 614). В его основе лежит понятие суммарной аппроксимации схемы. Решение задачи (1) в этом случае ищется в виде цепочки одномерных задач, в которых решение первой из них будет есть начальные условия для последующей.

На рисунке 1 приводится пример расчёта поля температур от трёх источников тепла, причём один из которых со сложной конфигурацией (крест).

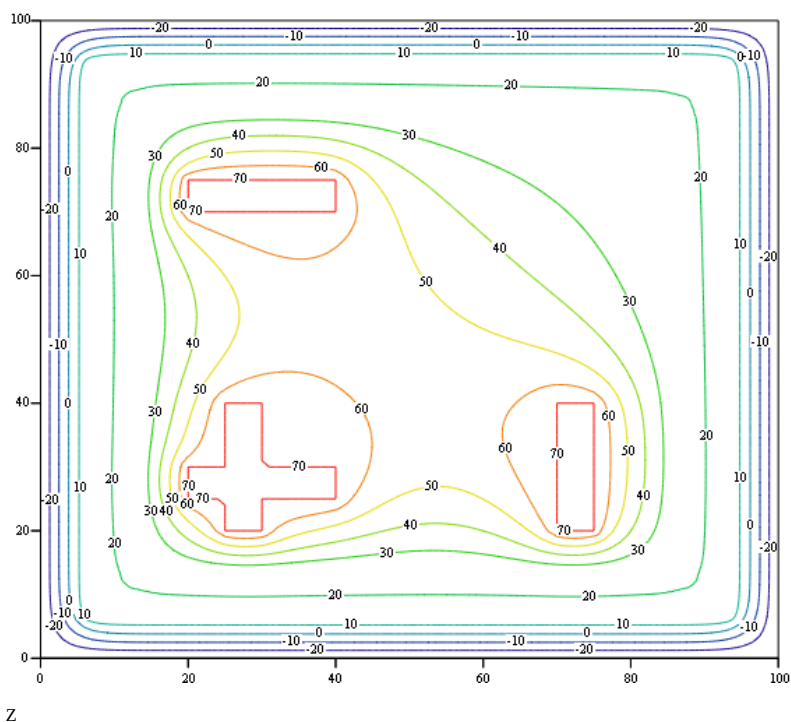


Рис. 1. Поле температур для прямоугольной области с тремя источниками

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы (введение в теорию). Учебное пособие: - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1973. – 400 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. Учебное пособие: - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983. – 616 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Изд. 5-е, стереотипное, учебное пособие для высших учебных заведений: - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1977. – 736 с.

© В.В. Комиссаров, Н.В. Комиссарова, 2012

МЕТОДИКА, АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Алексей Александрович Торопов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант по специальности «01.04.05 – Оптика», тел. 89537670189, e-mail: Alx89@yandex.ru

Любовь Васильевна Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Наносистемы и Опотехника», тел. 89039355455, e-mail: kaf.oep@ssga.ru

Василий Михайлович Тымкул

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Наносистемы и Опотехника», тел. 89059541100, e-mail: kaf.oep@ssga.ru

В статье рассмотрены уравнение теплового баланса относительно температуры наружной поверхности объектов, а также схема алгоритма и результаты программы моделирования поля температур наружных поверхностей ограждений в условиях естественного освещения.

Ключевые слова: уравнение теплового баланса, программа моделирования, математическая модель.

TECHNIQUES, ALGORITHMS AND SIMULATION RESULTS TEMPERATURE-VRHNOSTI OBJECTS IN THE NATURAL LIGHTING

Alexey A. Toropov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo, 10, a graduate student on specialty «01.04.05 – Optics», tel. 89537670189, e-mail: Alx89@yandex.ru

Lyubov V. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo, 10, c.t.s., docent, the professor of chair «Nanosistemy and Optotekhnika», tel. 89039355455, e-mail: kaf.oep@ssga.ru

Vasily M. Tymkul

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo, 10, c.t.s., professor, the professor of chair «Nanosistemy and Optotekhnika», tel. 89059541100, e-mail: kaf.oep@ssga.ru

The article deals with the heat balance equation with respect to the outer surface temperature of objects, as well as the scheme of the algorithm and the results of a simulation of the temperature field in the outer surfaces of enclosures under natural lighting.

Key words: heat balance equation, the program of modeling, mathematical model.

В теории и практике исследований теплозащитных свойств ограждающих конструкций жилых и производственных зданий широко используются понятия сопротивления теплопередаче и термического сопротивления. Согласно работе [1] для контроля этих параметров необходимо знание температур наружной поверхности T_{nn} и внутренней T_{nv} поверхности ограждений исследуемых объектов.

В работе [2] нами разработана и предложена математическая модель поля температур поверхности объектов в условиях естественного освещения и теплообмена. Эта модель представлена в виде решения уравнения теплового баланса относительно температуры T_{nn} наружной поверхности объектов. Для непрозрачных ограждений уравнение для определения T_{nn} имеет следующий вид:

$$\alpha_c E \cos \theta_c + \sigma T_n^4 \left\{ 1 - e^{-[(\beta_p + \beta_n)l_o]} \right\} + \frac{\kappa}{d} (T_{nn} - T_o) = \varepsilon_n \sigma T_{nn}^4 + h_c (T_n - T_{nn}). \quad (1)$$

Анализ уравнения (1) показывает, что температура T_{nn} сложным образом зависит от значения освещенности от Солнца (E), высоты Солнца (θ_c), показателей рассеяния (β_p) и поглощения атмосферы (β_n), температуры атмосферы (T_n), скорости ветра (V), коэффициента теплопроводности (κ) и толщины ограждения (d), температуры основания ограждения (T_o), коэффициентов излучения (ε_n) и поглощения (α_c) солнечного излучения, а также от геометрической толщины (L_o) всей атмосферы и коэффициента (h_c) конвективного переноса тепла.

Схема алгоритма программы моделирования поля температур наружных поверхностей ограждений в условиях стационарного режима теплообмена представлена на рис. 1. В блоке 2 происходит ввод исходных данных для моделирования, а именно таких параметров как высота Солнца, скорость ветра, коэффициент поглощения солнечных тепловых лучей, показатели рассеяния и поглощения земной атмосферы, температура наружного воздуха, геометрическая толщина всей атмосферы, температура подложки, коэффициент теплового излучения наружной поверхности ограждения и толщина ограждения. Затем, в блоке 3 происходит проверка данных на допустимость значений этих исходных параметров для конкретной задачи.

Так как в окончательном виде поле температур наружных поверхностей ограждений мы получили в виде уравнения в неявной форме относительно T_{nn} , то полученное трансцендентное уравнение решается на основе минимизации разности левой и правой части уравнения. При этом левая часть обозначена в виде функции y_1 , которая равна выражению в блоке 4, где $h_k = \kappa/d$, а правая часть (функция y_2) равна непосредственно значению T_{nn} .

В блоке 4 и 5 происходит присвоение значениям y_1 и y_2 правой и левой части уравнения соответственно. В блоке 6 уравнение неявного вида записывается в более простой форме, где Δy и является той наименьшей разностью между левой и правой частью уравнения неявного вида, которая ближе всего совпадает с реальной температурой наружной поверхности T_{nn} , далее в блоке 7 происходит обработка данных, которая более подробно рассмотрена на рис. 6.

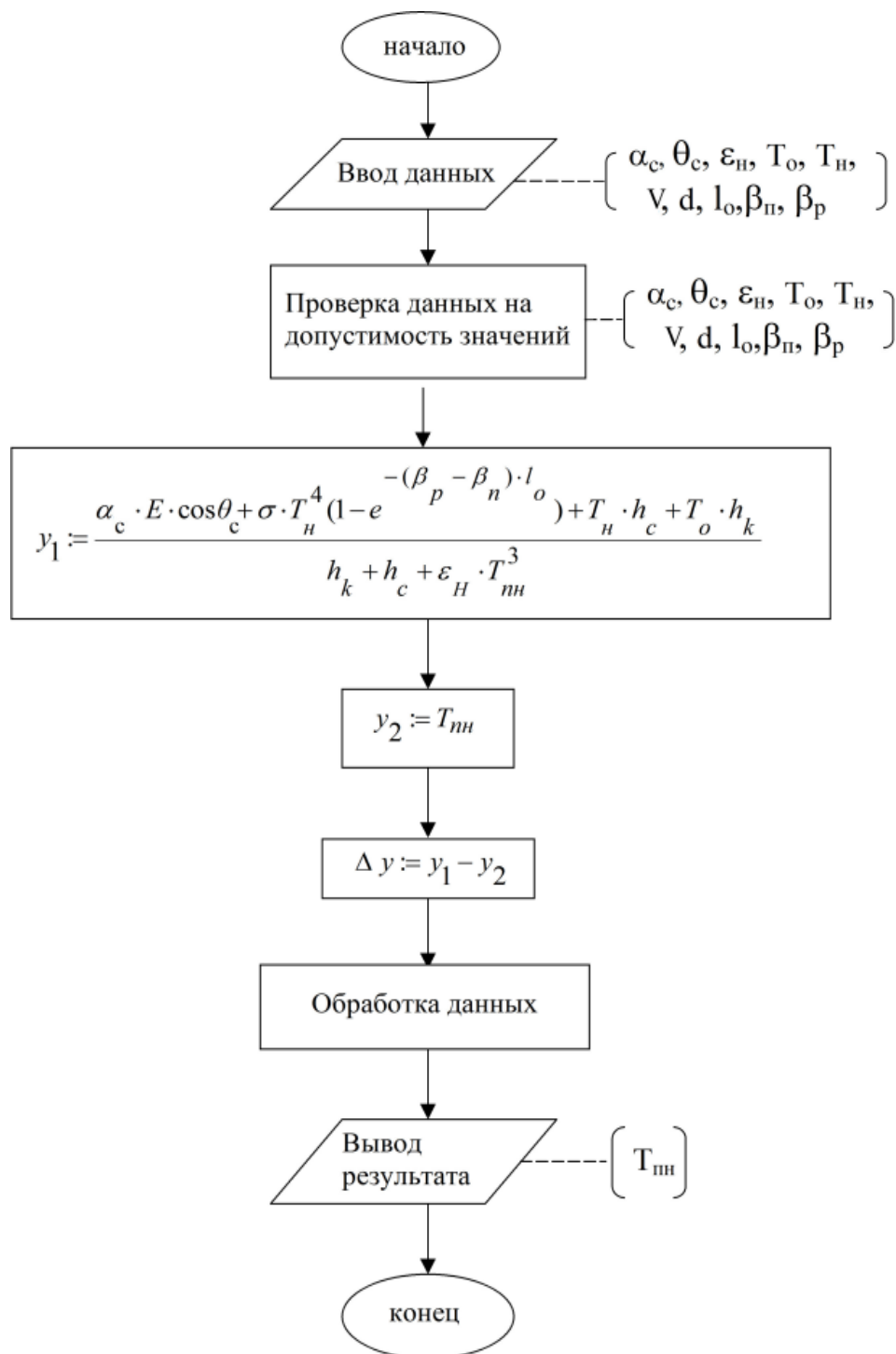


Рис. 1. Схема алгоритма программы моделирования температур наружных поверхностей ограждений в условиях стационарного режима теплообмена

В процедуре обработки данных (рисунок 2), чтобы найти Δy берётся шаг=1° и вводится величина T_k , это начальная температура, с которой начинаем перебирать значения лежащие в пределах от -40° С до +50° С (рабочий диапазон ИК-пирометра «Heat Spy»), затем все эти значения подставляются в блоки 4 и 5 и Δy вычисляется в блоке 6. В программе существуют 2 цикла. Первый - это условие остановки, если шаг будет <0,001, то сработает условие остановки, так как решение найдено, если шаг > 0,001, то переходим к условию

отрицательности (второй цикл), если оно соблюдается, то к начальной температуре T_k прибавляем шаг, если не соблюдается, то значит, решение проскочили и надо вернуться и поделить шаг, затем эти значения посылаются в блок 13 до тех пор, пока не сработает условие остановки.

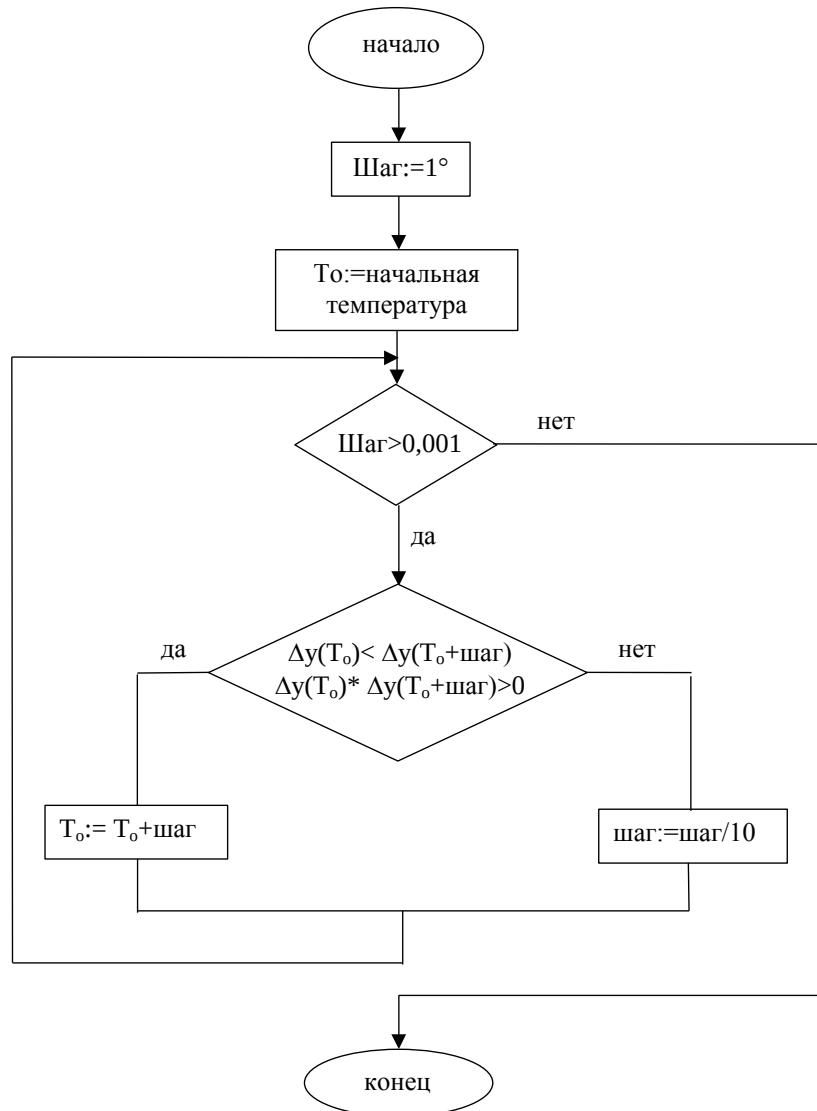


Рис. 2. Схема алгоритма обработки данных

С учётом отмеченных исходных данных и компьютерной программы, реализующей решение уравнения теплового баланса, нами проводились расчёты поля температур T_{nn} в зависимости от различных входящих в уравнение (1) параметров и характеристик.

На рис. 3 и 4, в качестве примера, приведены некоторые результаты моделирования температур, а также результаты экспериментальных исследований.

На рис. 3 приведены данные расчетов при температурах внутреннего и наружного воздуха соответственно $T_e=19,4^{\circ}\text{C}$ и $T_n = -27,3^{\circ}\text{C}$ для кирпичной стены и окна для зависимости температуры наружной поверхности T_{nn} от скорости ветра V . Измерения производились в тени.

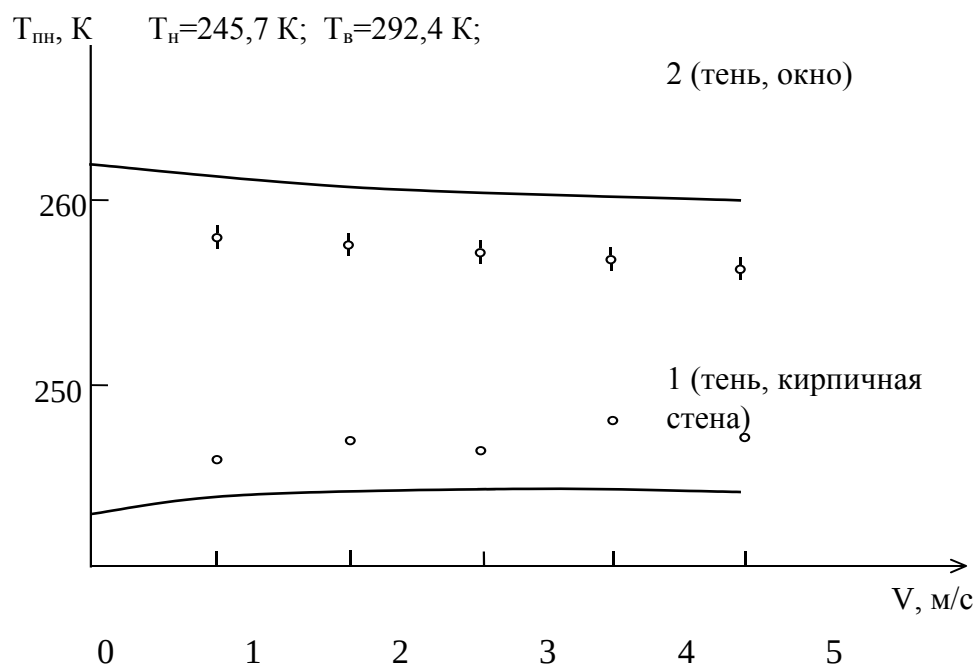


Рис. 3. Результаты расчетов и экспериментов. Зависимость температуры наружной поверхности объектов от скорости ветра

На рис. 4 приведены данные расчетов и измерений при температурах внутреннего и наружного воздуха соответственно $T_в = 23^\circ\text{C}$ $T_н = 2^\circ\text{C}$. В качестве иллюстрации приведена зависимость температуры наружной поверхности $T_{пн}$ от высоты Солнца θ_c .

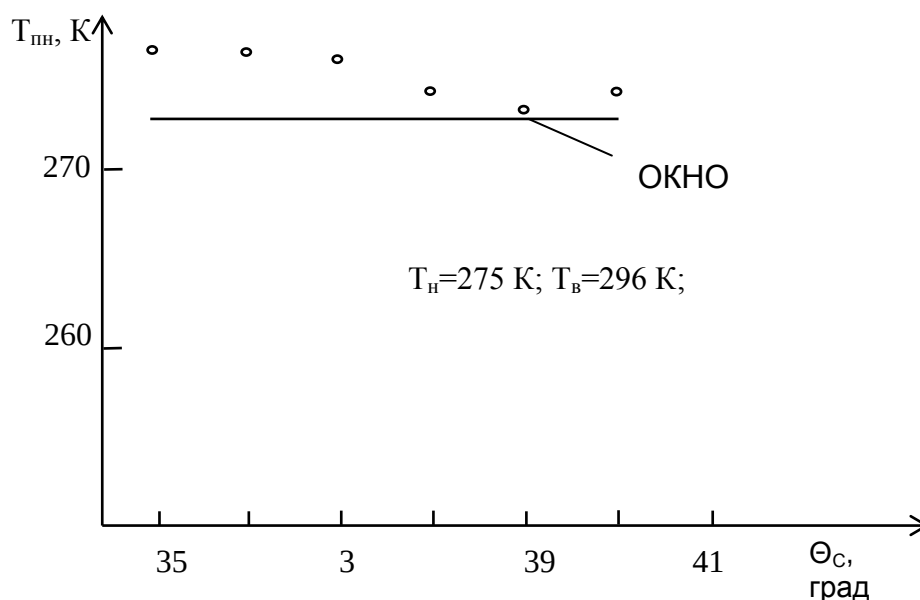


Рис. 4. Результаты расчетов и экспериментов. Зависимость температуры наружной поверхности объектов от высоты Солнца

Кривые на этих графиках соответствуют расчётным данным, а точки, расположенные рядом, соответствуют результатам экспериментов.

Анализ этих данных показывает следующее:

- С увеличением скорости ветра температура наружной поверхности слабо падает, а с увеличением угла высоты Солнца растёт;
- Результаты расчётов и экспериментов находятся в удовлетворительном согласии, что свидетельствует о работоспособности предложенной методики моделирования температур строительных ограждений, находящихся в реальных условиях естественного теплообмена с окружающей средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций [Текст]. – Введ. 1984 – 02 – 08. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
2. Михайлова В.А. Моделирование поля температур объектов в условиях естественного освещения [Текст] / В.А. Михайлова, А.А. Торопов, В.М. Тымкул // "ГЕО – Сибирь-2011" Том 5 ч. 1. Сборник материалов VII Международного научного конгресса "ГЕО – Сибирь-2011." - Новосибирск: СГГА, 2011. – с. 52-55.

© А.А. Торопов, Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул, 2012

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ БЫСТРОДЕЙСТВИЕ МЭМС С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Владимир Станиславович Корнеев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 8, кандидат технических наук, доцент кафедры физики, тел (383)361-08-36, e-mail: korneyv@mail.ru

Валерий Андреевич Райхерт

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 8, вед. инженер кафедры физики, тел (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

Проведен комплексный анализ основных факторов, ограничивающих амплитуду колебаний подвижных элементов МЭМС на частотах выше 1 кГц, оценен вклад магнетосопротивления и тормозящей силы.

Ключевые слова: микроэлектромеханические устройства МЭМС, МОЭМС, магнетосопротивление, тормозящая сила.

ANALYSIS OF FACTORS IS RESTRICTED BY THE MEMS WITH ELECTROMAGNETIC CONTROL

Vladimir S. Korneyev

Siberian State Academy of Geodesy, 8 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, docent, department of physics, tel. (383)361-08-36, e-mail: korneyv@mail.ru

Valery A. Reichert

Siberian State Academy of Geodesy, 8 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, tel. (383)361-08-36, e-mail: vreichert@yandex.ru

A comprehensive analysis of the major factors limiting amplitude of the vibrations of moving MEMS components at frequencies above 1 kHz, the contribution of the magneto resistance and the retarding force.

Key words: microelectromechanical systems-MEMS, MOEMS, magneto resistance, retarding force.

Микромеханические устройства МЭМС в последнее десятилетие получили мощный импульс развития благодаря технологиям поверхностной и объемной обработки кремния. Одной из областей применения МЭМС является оптика. Оптические микромеханические устройства выделяют в особый класс, так называемые МОЭМС, их отличает малое энергопотребление и высокая точность позиционирования оптических лучей.

Большинство серийно выпускаемых на сегодня МОЭМС конструктивно выполнены в виде матрицы микрзеркал с высоким качеством отражающей поверхности, которые управляются электростатически и имеют быстродействие 1 – 10 мс при угле поворота не более $5 - 10^0$ [1].

В течении 10 лет нами разрабатывались МОЭМС, в основе которых лежит электромагнитный принцип управления положением торсионных микрзеркал, на этом принципе функционируют микромеханический дефлектор световых потоков [2], микромеханическая управляемая дифракционная решетка [3]. Экспериментальные исследования рабочих параметров этих МОЭМС наиболее полно представлены в работе [4], а на рис. 1. приведены графики амплитудно – частотных характеристик этих устройств.

В процессе экспериментов были выявлены основные ограничения, приводящие к уменьшению быстродействия на частотах сканирования свыше 1 кГц. Цель данной статьи – анализ факторов ограничивающих быстродействие МЭМС с электромагнитным управлением.

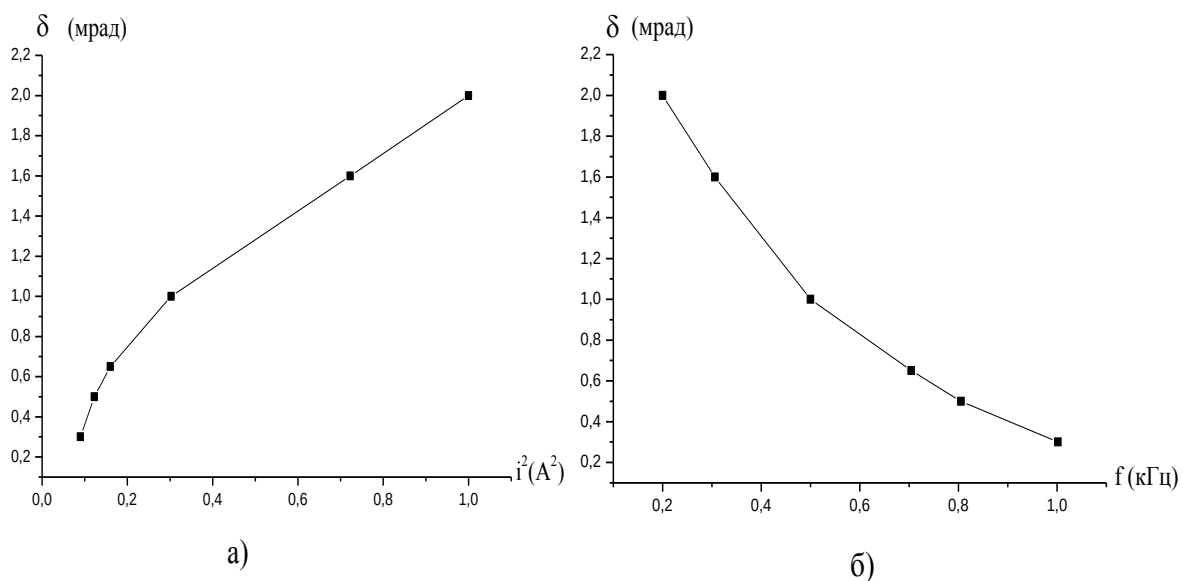


Рис. 1. Экспериментальные зависимости амплитуды угла сканирования δ_d : а) от частоты колебаний f ; б) квадрата силы тока в катушке i^2

В динамическом режиме подвижные элементы МОЭМС, использующие неполяризованные магнитные сердечники, совершают крутильные колебания с частотой $\omega = 2\pi f$, равной удвоенной частоте ω вынуждающей силы F , пропорциональной индукции магнитного поля в зазоре магнитопровода $F = kB^2 \sin(\omega t)$ [3].

Амплитуда вынужденных колебаний может быть определена из выражения:

$$\delta_d = \frac{\delta_c \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (1)$$

где: δ_d - амплитуда угла сканирования в динамическом режиме, δ_c - статическое отклонение при $\omega = 0$; ω_0 - собственная частота крутильных колебаний микрзеркал; β - коэффициент релаксации.

В общем случае β определяется известным выражением:

$$\beta = r / 2I_c, \quad (2)$$

где: r - коэффициент сопротивления среды; I_c - полярный момент инерции сечения микрозеркал.

Собственная частота крутильных колебаний ω_0 рассчитана теоретически [2] и экспериментально определена $\omega_0 \approx 30$ кГц, в работе [4].

Выразим из (1) коэффициент релаксации $\beta' = \beta / \omega_0$:

$$\beta' = \frac{(1/Q)^2 - (1-\gamma)^2}{4\gamma}, \quad (3)$$

где: $\gamma = (\omega / \omega_0)^2$; $Q = \delta_d / \delta_c$.

Используя данные графиков (рис. 1), были рассчитаны значения $\beta' = 0,7$ и $\beta = 21$ кГц, при этом резонансная частота ω_p значительно отличается от ω_0 :

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - 2\beta'^2}, \quad (4)$$

откуда, $\omega_p = 4,24$ кГц.

Основным фактором, ограничивающим амплитуду вынужденных колебаний, является рост магнетосопротивления схемы управления угловым положением микрозеркал. Вынуждающая сила F прямо пропорциональна квадрату тока в катушке i^2 и убывает с ростом частоты переменного тока. Относительное изменение этой величины можно выразить через параметр k_1 :

$$k_1 = \frac{i_2^2 - i_1^2}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (5)$$

где: i_1 и i_2 - значения силы тока в катушке на частотах ω_1 и ω_2 .

Из данных графика рис. 1 а) получим значение параметра $k_1 \approx 0,02$ А²с.

С физической точки зрения, параметр k_1 обусловлен возрастанием индуктивного сопротивления катушки и увеличением доли энергии магнитного поля, которая затрачивается на перемагничивание магнитопровода.

Вторым фактором, приводящим к уменьшению амплитуды вынужденных колебаний, является сила сопротивления воздуха, действующая на каждое микрозеркало. Сила F_c , действующая на единицу площади поверхности, равна:

$$F_c = -\eta \frac{dv}{dr} = -2\eta\delta_d\omega, \quad (6)$$

где: η - коэффициент вязкости, v - линейная скорость, r - направление нормальное к поверхности.

Для воздуха $\eta \approx 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с, расчет дает значения $F_c \approx 3,6 \cdot 10^{-5}$ Н/м², или $F_c \approx 3,6 \cdot 10^{-11}$ Н/мм². Площадь микрозеркал можно оценить $S \approx 0,5$ мм², тогда суммарная сила F_Σ , действующей на одно микрозеркало $F_\Sigma \approx 1,8 \cdot 10^{-11}$ Н/мм².

Каждый из двух, рассмотренных выше факторов, ограничивает амплитуду вынужденных колебаний подвижных элементов МЭМС. Для компенсации роста магнетосопротивления с частотой переменного тока, детали магнитопровода необходимо изготовить из высокочастотного феррита. Влияние силы

сопротивления можно уменьшить, если поместить МЭМС в корпус с пониженным давлением, при этом F_c уменьшится пропорционально давлению в корпусе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косцов, Э.Г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектро-механики / Э.Г. Косцов Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 3–52.
2. Чесноков Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков // Оптический журнал. 2007. № 4. С.51 – 54.
3. Корнеев В.С. Особенности спектральных характеристик микромеханической управляемой дифракционной решетки / В.С. Корнеев, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков // Сб. материалов Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2009». – Т. 4, ч.2. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 24–28.
4. Корнеев, В.С. Экспериментальные исследования параметров крутильных колебаний полосок микромеханической отражательной дифракционной решетки / В.С. Корнеев // «Вестник СГГА» / Вып. 1(12). – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 117-122.

© В.С. Корнеев, В.А. Райхерт, 2012

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОБСЕРВАТОРИИ СО РАН «КАЙТАНАК» НА ГОРНОМ АЛТАЕ

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, доктор технических наук, профессор, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, младший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: jeero@yandex.ru

Юрий Дмитриевич Коломников

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Юрий Георгиевич Голочаев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, тел. 333-21-10, e-mail: golovachev@laser.nsc.ru

Сергей Иванович Коняев

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Анна Евгеньевна Кусакина

Новосибирский государственный технический университет, ЗАО «СКБ», 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, д. 20, магистр, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Наталья Александровна Шегурнова

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13, корп. 3, аспирант, тел. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

В статье рассматриваются некоторые экспериментальные исследования фоновых характеристик и характеристик распространения оптических сигналов в условиях обсерватории СО РАН «Кайтанак» на Горном Алтае для целей наземно-космической связи.

Ключевые слова: наземно-космическая связь.

SOME CHARACTERISTICS OF LASER SIGNALS IN OBSERVATORY RAS «KAJTANAK» MOUNTAIN ALTAI

Boris V. Poller

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, Doctor of Engineering., professor, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Alexander V. Britvin

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, younger research associate, ph. 330-71-20, e-mail: jeepo@yandex.ru

Yury D. Kolomnikov

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, candidate of physical and mathematical sciences., c.h.c., ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Yury G. Golochayev

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, ph. 333-21-10, e-mail: golovachev@laser.nsc.ru

Sergey I. Konyaev

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, Candidate of Technical Sciences., senior research associate., ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Anna E. Kusakina

Novosibirsk state technical university, JSC SKB, 630092, Novosibirsk, Charles Marx Ave., 20, master, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Natalia A. Shegurnova

Institute of laser physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev Ave., 13, building 3, graduate student, ph. 330-71-20, e-mail: lablis@mail.ru

Here's a look at some pilot studies background characteristics and characteristics of optical signals in Observatory RAS 'Kajtanak' mountain Altai for Earth-space communications.

Key words: Earth-space communications.

Повышение точности космической и наземной навигации, повышение качества дистанционного зондирования Земли требует увеличения скорости и объемов передачи информации между наземными пунктами (НП) и космическими аппаратами (КА) до десятков гигабит в сек. Поэтому в России и за рубежом начаты исследования по построению наземно-космических лазерных линий и сетей связи [1-3]. Для увеличения надежности наземно-космической связи наземный пункт целесообразно располагать на вершинах гор, где лучше условия видимости на КА и другие наземные пункты.

Большой интерес для проведения экспериментов по сверхдальней наземной лазерной связи и связи с космическими аппаратами представляет обсерватория «Кайтанак» СО РАН, располагающаяся в Горном Алтае и имеющая постаменты на горе «Гладкая» высотой около 2 100 м. Немаловажно и то, что на вершину горы оборудование может быть доставлено вездеходом. Профиль рельефа местности в районе обсерватории с учетом лазерной трассы «Кайтанак» - «Академгородок» представлен на рис. 1

При направлении с вершины горы лазерного луча в сторону Академгородка параллельно поверхности Земли он пройдет на высоте 20...30 км над Академгородком, что позволит принять сигналы опторадиеволновыми ретрансляторами на шарах [4, 5].

Экспериментальные исследования в 2011, 2012 гг. проводились с целью визуальной оценки характеристик метеорологической дальности видимости на гору «Гладкую» от лабораторного корпуса на расстоянии около 8 км и с целью экспериментальной оценки характеристик распространения лазерных сигналов и характеристики оптических фонов. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

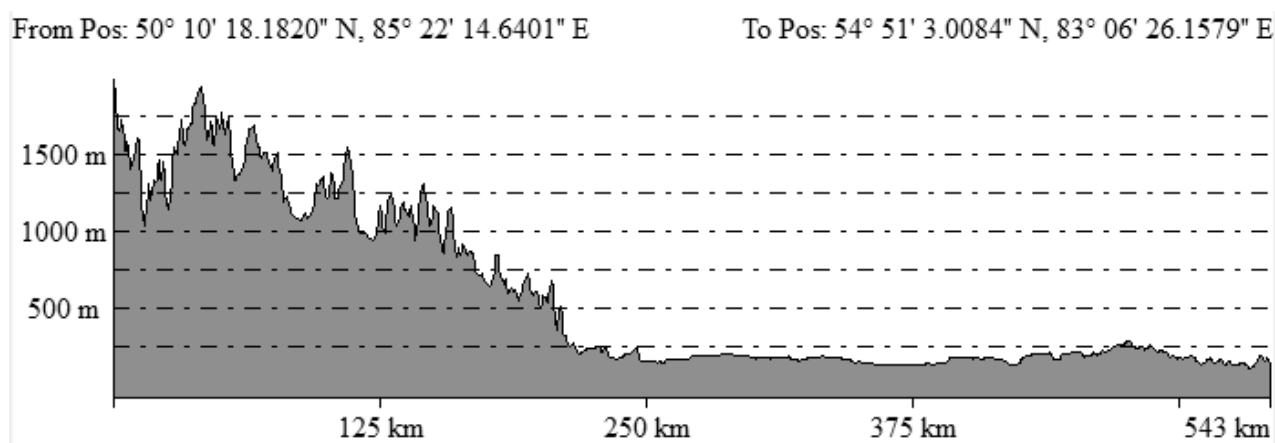


Рис. 1. Профиль рельефа «Кайтанак-Академгородок» без учета кривизны поверхности

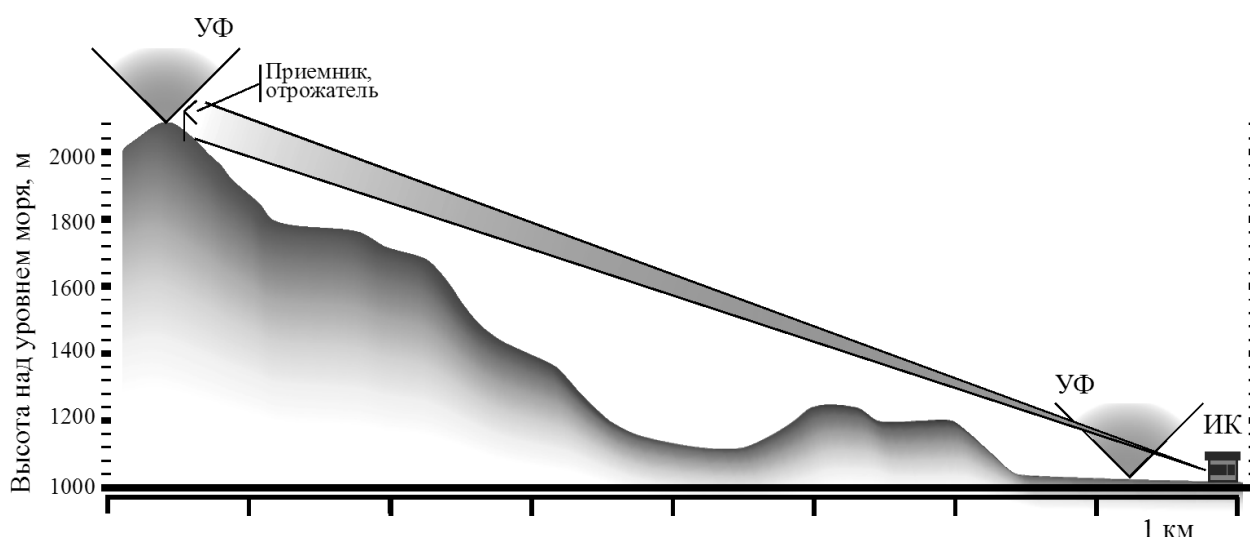


Рис. 2 – Схема эксперимента на обсерватории «Кайтанак»

Измерения характеристик лазерных сигналов и оптических фонов проводились в августе 2011 г., а контроль видимости осуществлялся с августа 2011 по февраль 2012 г. путем визуальной оценки видимости вершины горы.

Если в данный день видимости на гору не было, то считалось что день с пасмурной погодой.

Результаты статистической обработки интервалов времени между пасмурными днями в виде гистограммы представлены на рис.3.

Из этой гистограммы следует, что средние промежутки с ясной погодой составляли около 3 дней и около 10 дней. Расчет по всей совокупности наблюдений показал, что средняя продолжительность ясных дней была равна 7 дням, а пасмурных была равна 3 дням.

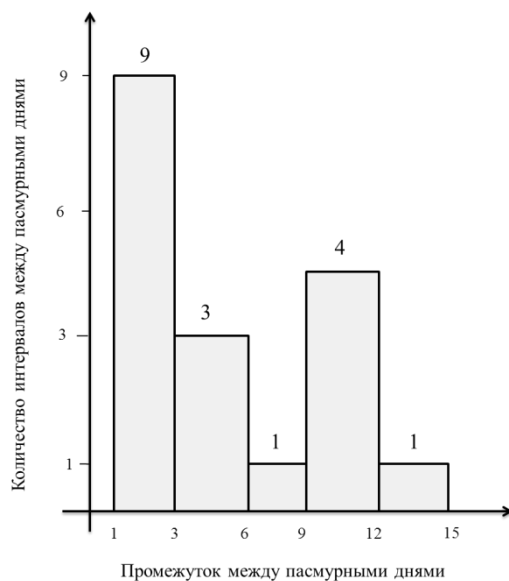


Рис. 3. Результаты статистической обработки интервалов времени между пасмурными днями

В соответствии со схемой на рис.2 были проведены экспериментальные исследования, по которым получены следующие результаты при измерениях в ясную погоду.

1. От лазерного передатчика на длине волны 530 нм, размещенного на горе, на высоте 2100 м принят сигнал фотоприемником на высоте 1000 м на расстоянии около 8,5 км. Отношение сигнал/шум на выходе приемника не менее 5.

2. От лазерного передатчика на длине волны 0,85 мкм на горизонтальной трассе 1200 м принят сигнал с отношением сигнал/шум не менее 10. Быстрые флуктуации принятого сигнала на горизонтальной трассе не превышали 60% от среднего текущего значения.

3. Измерения характеристик обратного рассеяния УФ сигналов на длине волны 360 нм в темное время суток на высоте 1000 м показали, что отсутствуют компоненты рассеяния от промышленных аэрозолей и тепловых выбросов, наблюдающиеся в атмосфере в зоне Академгородка.

4. Анализ характеристик флуктуаций сигналов рассеяния показал, что их частотный спектр не превышает 100 Гц.

5. Максимальный уровень солнечных фонов в видимом диапазоне в 70...80 клюкс был на горе Гладкой, также там наблюдались максимальные ультрафиолетовые фоны в поддиапазоне А (315...400 нм) до 1,7 Вт/м².

6. В целом на трассах распространения лазерных сигналов на обсерватории наблюдалась высокая оптическая прозрачность. Флуктуации лазерных сигналов значительно меньше, чем в зоне Новосибирского Академгородка.

Полученные результаты позволяют уточнить условия и характеристики функционирования лазерной наземно-космической информационной линии в условиях обсерватории «Кайтанак».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поллер Б.В., Федоров Б.В., Щетинин Ю.И. К оценке характеристик систем лазерной связи «спутник – наземный пункт» В сб. докл.6 МНТК «Радиолокация, навигация, связь», изд. ВГУ, Воронеж, 2000., Т. 1, с. 718-727.

2. Багаев С.Н., Гребельский М.Д., Зубарев Ю.Б., Поллер Б.В., Пичхадзе К.М., Фельдман Л.И. Проблемы построения глобальной лазерной сети связи с использованием отражателей сигналов, размещаемых на поверхности Луны или в околоземном космическом пространстве. В сб. докл. 9 МНТК «Радиолокация, навигация, связь», изд. ВГУ, Воронеж, 2003 . т. 1, с. 403-405.

3. Багаев С.Н., Бритвин А.В. Поллер Б.В. Сысоев В.К. О развитии наземно-космических лазерных информационных систем. Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская научн.-техн. конф. - Новосибирск, 2011 Т. 1. с. 22-26.

4. Шергунова Н.А. Поллер Б.В., Бритвин А.В. «О построении информационной системы на базе сверхдальней лазерной атмосферной линии «Алтай – Новосибирск» В сб. трудов VI Межд. азиатской школы – семинара 15-25 авг.2010 г. ИВМи МГ СОРАН, Новосибирск , 2010 г. с. 412-419.

5. Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, С.И. Коняев, Ю.И. Щетинин О характеристиках опторadiоволновых ретрансляторов для лазерных наземно-космических сетей и линий связи в условиях облачности ГЕО-Сибирь – 2011. Т.5. Специализированное приборостроение, метрологи я, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч.2.: сб. матер. VII Междунар. Научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь – 2011», 19 - 29 апреля 2011 г. Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2011 с.64 – 68.

© Б.В. Поллер, А.В. Бритвин, Ю.Д. Коломников, Ю.Г. Голочаев,
С.И. Коняев, А.Е. Кусакина, Н.А. Шегурнова, 2012

ВИЗУАЛЬНО ОПОЗНАВАЕМЫЕ МАКСИМУМЫ В ФОРМУЛАХ ДЛЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ

Александр Николаевич Лузин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат физико-математических наук, профессор, тел. (383)343-29-33

Виктор Николаевич Матуско

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, тел. (383)343-29-55

К визуально анализируемому в окрестности максимумов преобразованы формулы, описывающие электрические колебания в контуре.

Ключевые слова: визуально анализируемые функции, экстремум, резонанс, контур.

VISUALLY IDENTIFIABLE PEAKS IN FORMULAS FOR SINUSOIDAL ELECTRICAL OSCILLATIONS IN THE CIRCUIT

Alexander N. Luzin

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo St., 10, candidate of physical and mathematical sciences, professor, ph. (383) 343-29-33

Victor N. Matusko

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo St., 10, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, ph. (383) 343-29-55

To visually analyzed in the vicinity of maximum mind transformed formulas describing the electrical oscillations in the circuit.

Key words: visually analyzed by functions, extremum, resonance, circuit.

В электротехнике довольно часто один электротехнический параметр немонотонно зависит от другого. В этих случаях наиболее интересны экстремальные значения одного из параметров. Возникает необходимость исследовать на экстремум функцию, описывающую эту немонотонную зависимость.

В общем случае для нахождения экстремальных точек необходимо продифференцировать функцию, результат приравнять нулю и решить полученное уравнение. После этого исследуемую функцию можно преобразовать к визуально анализируемой формуле. Из полученной формулы можно увидеть, при каком значении аргумента функция имеет экстремальное значение, чему равно это экстремальное значение.

Простейшим примером предлагаемых преобразований является выделение полного квадрата из квадратичной функции

$$y(x) = ax^2 + bx + d$$

Из элементарной математики известно, что после выделения полного квадрата

$$y(x) = a \left(x + \frac{b}{2a} \right)^2 - \frac{b^2 - 4ad}{4a} \quad (1)$$

Видно, что это уравнение параболы, вершина которой имеет координаты

$$x_m = -\frac{b}{2a}, y_m = \frac{4ad - b^2}{4a}$$

После выделения полного квадрата нет необходимости вычислять производную квадратичной функции и выяснять, при каких значениях аргумента производная равна нулю.

К визуально анализируемому в окрестности экстремума виду можно преобразовать и многие другие более сложные функции.

Примеры таких преобразований приведены в докладе [1]. Там же приведен общий метод такого преобразования для произвольной дробной рациональной функции:

1. С помощью производной определяются экстремальное значение функции и соответствующее значение аргумента,

2. Приводится к общему знаменателю разность $y(x) - y_m$,

3. Числитель полученной дроби делится без остатка на $(x - x_m)^2$,

4. После этого можно записать соотношение $\frac{y(x) - y_m}{(x - x_m)^2} = f(x)$,

затем

$$y(x) = f(x)(x - x_m)^2 + y_m. \quad (2)$$

Из сравнения с формулой (1) видно, что формула (2) имеет большое сходство с параболой.

Но настоящей параболой является функция $y(x) = f(x_m)(x - x_m)^2 + y_m$

Это парабола, касательная к исследуемой функции $y(x)$.

Из формулы (2) видно, что при $x = x_m$ функция имеет экстремум.

Предложенный здесь метод преобразования применим к многочленам, так как многочлен можно рассматривать как дробную рациональную функцию, знаменатель которой равен единице. Следовательно, этот метод можно применить и к преобразованию квадратичной функции.

Но здесь проще воспользоваться методом выделения полного квадрата - не надо пользоваться понятием производной.

К визуально анализируемому в окрестности экстремума виду можно привести формулы приведенные в учебнике [2]. В этом учебнике речь идет о гармонических колебаниях в последовательном $R-L-C$ контуре, подключенном к источнику синусоидального напряжения.

Значение напряжения на резисторе

$$U_R = \frac{RU}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

где U - действующее значение напряжения источника питания,
 ω - угловая частота источника.

Экстремальные свойства напряжения U_R становятся видимыми, если второе слагаемое в подкоренном выражении умножить на дробь L^2/ω^2 , а выражение, стоящее в скобках, на ω/L .

В этом случае

$$U_R = \frac{RU}{\sqrt{R^2 + \frac{L^2}{\omega^2} \left(\omega^2 - \frac{1}{LC}\right)^2}}$$

Видно, что подкоренное выражение имеет минимальное значение при

$$\omega = \omega_{PE3} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Максимальное значение напряжения $U_{Rmax} = U$.

Для значения действующего напряжения на емкости в [2] приведена формула

$$U_C = \frac{U}{\sqrt{R^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

Для ее преобразования в подкоренном выражении полезно перейти к новому аргументу $x = \omega^2$ и получим

$$y(x) = xR^2C^2 + (xLC - 1)^2 = L^2C^2x^2 + (C^2R^2 - 2LC)x + 1 = ax^2 + bx + d,$$

где $a = L^2C^2$, $b = C^2R^2 - 2LC$, $d = 1$.

Для преобразования $y(x)$ воспользуемся формулой (1) и получим

$$y(\omega^2) = L^2C^2 \left[\omega^2 - \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2} \right) \right]^2 + CR^2 \left[\frac{4L - R^2C}{4L^2} \right].$$

После этого
$$U_C = \frac{U}{\sqrt{L^2C^2 [\omega^2 - \omega_c^2]^2 + CR^2 \left[\frac{4L - R^2C}{4L^2} \right]}}$$

где $\omega_c = \sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2} \right)}$ - угловая частота, при которой напряжение на

ёмкости максимально.

Из полученной формулы видно, что максимальная величина напряжения на ёмкости

$$U_{C\max} = \frac{2LU}{R\sqrt{C(4L - R^2C)}} = \frac{U}{\sqrt{\frac{R^2C}{L}\left(1 - \frac{R^2C}{4L}\right)}}$$

Формула для действующего значения напряжения на индуктивном элементе имеет вид

$$U_L = \frac{U}{\sqrt{\frac{R^2}{L^2\omega^2} + \left(1 - \frac{1}{\omega^2LC}\right)^2}}$$

Если в формулу вместо аргумента ω ввести новый аргумент $x = \frac{1}{\omega^2}$, то подкоренное выражение приобретёт вид

$$y(x) = \frac{R^2}{L^2}x + \left(1 - \frac{x}{LC}\right)^2 = ax^2 + bx + d,$$

$$\text{где } a = \frac{1}{L^2C^2}, b = \frac{R^2}{L^2} - \frac{2}{LC}, d = 1.$$

После использования формулы (1) и тех же математических операций, что и в случае преобразования формул для U_C формула для U_L становится визуально анализируемой в окрестности максимума

$$U_L = \frac{U}{\sqrt{\frac{1}{L^2C^2}\left[\frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_L^2}\right]^2 + \frac{R^2C}{L}\left(1 - \frac{R^2C}{4L}\right)}}$$

$$\text{где } \omega_L^2 = \frac{1}{LC} \frac{1}{1 - \frac{CR^2}{2L}} - \text{квадрат угловой частоты, при которой } - \text{напряжение}$$

на индуктивности становится наибольшим.

Видно, что напряжение U_L имеет максимальное значение при

$$\omega^2 = \omega_L^2 = \frac{1}{LC} \frac{1}{\left(1 - CR^2/2L\right)}$$

$$\text{Причём } U_{L\max} = \frac{U}{\sqrt{\frac{R^2C}{L}\left(1 - \frac{R^2C}{4L}\right)}}.$$

Здесь следует обратить внимание на то, что

$$U_{L\max} = U_{C\max}$$

Из приведенных в работе примеров следует то, что в учебниках и учебных пособиях по электротехнике наряду с традиционными формулами целесообразно приводить формулы, в виде визуально анализируемых в окрестности экстремума. Это способствовало бы более эффективному использованию полученных знаний в практических целях. Разностороннее

рассмотрение одного и того же учебного материала способствует более прочному его освоению.

Студенты во время занятий по электротехнике, например, легко могли бы проверять, эквивалентны ли между собой две приведенные рядом формулы. Проверку легко осуществлять посредством очень простых алгебраических преобразований, получая традиционную формулу из новой визуально анализируемой формулы.

Чтобы успешно решать новые серьезные электротехнические проблемы, будущий инженер должен и сам уметь преобразовывать исследуемые им формулы к визуально анализируемому виду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лузин А.Н. Приведение некоторых формул курса физики к виду, визуально анализируемому вблизи экстремума. Физика в системе своевременного образования (ФССО-2000). Матер. Междун. конф. Санкт-Петербург, 4-8июня 2007 г., том 2, с. 434-437.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 1983.

© А.Н. Лузин, В.Н. Матуско, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОМОЩИ БЛОЧНОГО ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ЕЁ ДВИЖЕНИЕ В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK

Юрий Артемьевич Можжаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. 8-983-309-51-56, e-mail: yura82@mail.ru

В статье рассматривается задача динамики механической системы при помощи блочного построения уравнений, описывающих её движение, в среде Matlab - Simulink.

Ключевые слова: динамическая система, блочное построение, амплитудно - частотная характеристика, программное движение.

RESEARCH OF THE BEHAVIOR OF DYNAMICS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH BLOCK BUILDING STRUCTURE EQUATIONS DESCRIBING ITS MOVEMENT IN THE ENVIRONMENT MATLAB – SIMULINK

Yuriy A. Mozhaev

Siberian State Geodetic Academy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, senior teacher, department of special devices and technologies, tel. 89833095156, e-mail: yura6810@mail.ru

In this paper we consider the dynamics of a mechanical system with block construction of the equations describing its motion in the environment Matlab - Simulink.

Key words: dynamical system, building block, amplitude and frequency response, program motion.

Для моделирования поведения различных динамических систем, используются ЭВМ. Существует большое количество алгоритмических языков, на которых может быть выполнено решение задачи. Выбор того или иного языка программирования зависит от многих условий. Часто решающую роль оказывает удобство программирования, наличие проверенных математических методов, легкость представления результатов моделирования. Такими особенностями обладает пакет Matlab [3, 4], содержащий в своем составе инструмент визуального моделирования Simulink [1, 2].

Simulink - графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Simulink сочетает в себе наглядность аналоговых машин и точность цифровых вычислительных машин, а также обеспечивает пользователю доступ ко всем возможностям пакета Matlab, в том числе к большой библиотеке численных методов. Подготовка задачи для моделирования в Simulink проводится в следующей последовательности: 1 - выбор расчетной схемы, 2 - составление системы уравнений описывающих

исследуемый процесс, 3 - определение начальных условий, 4 - составление структурной схемы, 5 - моделирование возмущающих функций, 6 - определение исходных данных, 7 - составление модели в среде Simulink, 8 - включение средств визуализации, 8 – тестирование, 9 – решение, 10 - анализ результатов.

Пусть поведение механической системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\ddot{\xi} = \frac{mb l_1}{I_0} \ddot{\Delta},$$

$$\ddot{\Delta} + 2\beta_{z_1} \dot{\Delta} + \omega_1^2 \Delta = -2\ddot{y}, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{m}{M} (2\beta_{z_1} \dot{\Delta} + \omega_1^2 \Delta) + \frac{F_y(t)}{M}.$$

Исследования будем проводить при следующих параметрах: $m = 9\text{êã}$, $b = 0.245\text{ì}$, $I_0 = 0.997\text{êã} \cdot \text{ì}^2$, $\omega_1 = 1350\text{Ãö}$, $\beta_{z_1} = 84.375\text{с}^{-1}$, $l_1 = 0.4\text{ì}$, $M = 49.5\text{êã}$, $h_c = 0.2\text{ì}$, $\ddot{y}_0 = 500\text{ì} \text{ñ}^{-2}$.

Опишем структуру программирования в Simulink и то, как производится реализация решений. Из уравнений (1) видно, что связанными являются только два уравнения по Δ и y , а ξ получается из Δ . Поэтому наш анализ исследований и структура построения системы уравнений значительно упрощаются. При построении модели в Simulink за основу мы возьмём только два параметра Δ и y .

Так как в системе уравнений фигурируют переменные $\dot{y}$, y , $\dot{\Delta}$, Δ , то у нас будут фигурировать 4 интегрирующих блока Integrator. Следует отметить, что y и $\dot{y}$ получаются из $\dot{y}$ и $\ddot{y}$, а Δ и $\dot{\Delta}$ получаются из $\dot{\Delta}$ и $\ddot{\Delta}$ путём интегрирования. Этим переменным соответствуют следующие блоки: Integrator - $\dot{\Delta}$, Integrator1 - Δ , Integrator2 - $\dot{y}$, Integrator3 - y . Далее нам необходимо реализовать сначала правую часть уравнения $\ddot{y}$, так как она не зависит от производной второго порядка. Для этого добавляем два блока усилителя, которые выполняют умножение по константе: Gain усиливает входной сигнал переменной Δ , превращая её в сигнал $1.822 \cdot 10^6 \Delta$, Gain1 усиливает входной сигнал $\dot{\Delta}$, превращая его в сигнал $168.75 \dot{\Delta}$. Далее два сигнала суммируются в блоке Add, превращаясь в $-168.75 \dot{\Delta} - 1.822 \cdot 10^6 \Delta$. После этого сигнал увеличивается блоком Gain2, превращаясь в сигнал $-0.182(-168.75 \dot{\Delta} - 1.822 \cdot 10^6 \Delta)$. Далее блок Add1 суммирует три сигнала: 1 - $-0.182(-168.75 \dot{\Delta} - 1.822 \cdot 10^6 \Delta)$, 2 – задаваемая внешняя электродинамическая сила в блоке Sine Wave Function, 3 – сигнал $0 \cdot \dot{y}$ (так как в правой части уравнения $\ddot{y}$ не входит y , то его зануляем в Gain3). Далее суммарный сигнал подаётся на вход блока Integrator 2 – это и будет выражение для $\ddot{y}$.

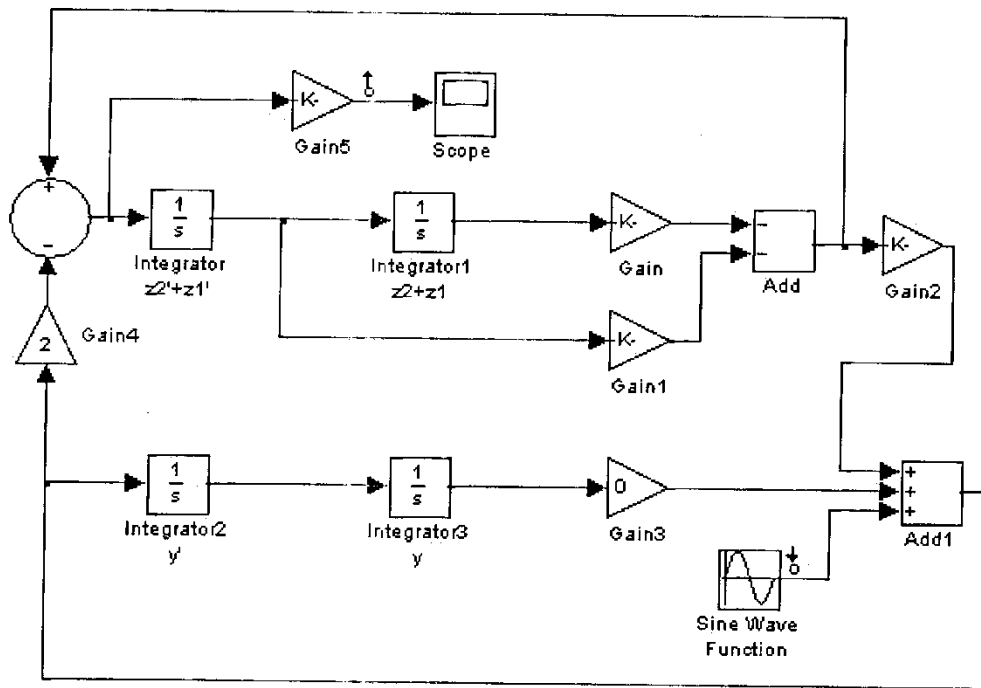
Теперь необходимо сформировать правую часть для $\ddot{\Delta}$. Сигнал $2\ddot{y}$ получается при помощи усилителя Gain4, далее этот сигнал вместе с сигналом $-168.75\dot{\Delta} - 1.822 \cdot 10^6 \Delta$ складывается в блоке Sum, и результирующий сигнал подаётся на вход блока Integrator.

Переменная ξ формируется при помощи усилителя Gain5, где сигнал $\ddot{\Delta}$ умножается на константу $mbl_1 / I_0 = 0.885$. Для отображения результатов используется блок Scope, куда выводится необходимая нам переменная изменяющаяся от времени.

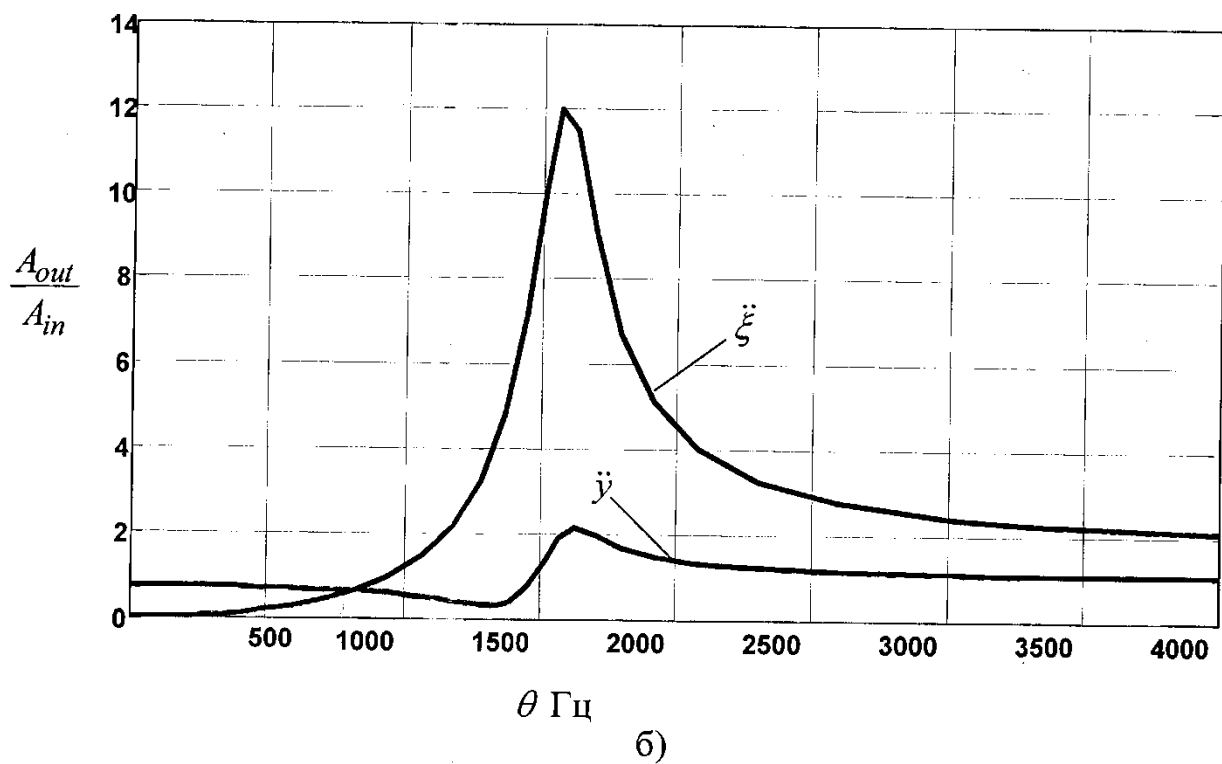
Для построения АЧХ в Simulink используется подпрограмма LTI Viewer [5]. Инструмент Simulink LTI-Viewer входит в состав пакета прикладных программ Control System Toolbox и предназначен для анализа линейных стационарных систем. С помощью данного инструмента можно легко построить частотные характеристики исследуемой системы, получить ее отклики на единичные ступенчатое и импульсное воздействия, найти нули и полюса системы, построить диаграмму Найквиста и Николса. Принцип измерения АЧХ такой: на вход системы подается сигнал с заданной амплитудой, на выходе системы снимается показание амплитуды; затем изменяется частота входного сигнала (при этом амплитуда поддерживается такой, как была установлена в начале), при этом снимаются показания амплитуды на выходе. Потом находится отношение амплитуд на выходе к входной для каждой частоты, получается АЧХ как безразмерная величина. На рис.1 (б) изображены графики двух безразмерных амплитуд ускорений. A_{out} - снимаемая амплитуда на выходе системы (в нашем случае амплитуды $\ddot{\xi}$ и $\ddot{y}$), A_{in} - снимаемая амплитуда на входе системы (амплитуда электродинамической силы $F(\theta)$).

Как видно из графиков рис. 1 на частоте 1350 Гц наблюдается режим динамического гашения параметра $\ddot{y}$, а на частоте 1750 Гц наблюдается максимум амплитуды параметров $\ddot{y}$ и $\ddot{\xi}$.

Далее проведём исследования колебаний модели перевернутого физического маятника с четырьмя попарно равноудалёнными осцилляторами от оси симметрии и точки подвеса подвижной части электродинамического возбудителя рис. 2. Где c_ϕ - коэффициент, характеризующий демпфирование при угловом перемещении; $c_{x,y,z}$ - коэффициенты демпфирования при перемещении вдоль осей x, y и z ; k_ϕ - коэффициент угловой жёсткости пружины; $k_{x,y,z}$ - коэффициенты жёсткости при линейных перемещениях вдоль осей y и z ; $M, m_{1-2-3-4}$ массы маятника и осцилляторов; I_0 - момент инерции физического маятника относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через точку О. При этом $m_1 = m_2$, $m_3 = m_4$, $c_{z_1} = c_{z_2}$, $c_{z_3} = c_{z_4}$, $k_{z_1} = k_{z_2}$, $k_{z_3} = k_{z_4}$, $l_1 = l_2 = l_3 = l_4$, $b_1 = b_2$, $b_3 = b_4$.



а)



б)

Рис. 1. К решению системы дифференциальных уравнений: а) – структурная схема в Simulink; б) – зависимости параметров $\ddot{y}$ и ξ от частоты

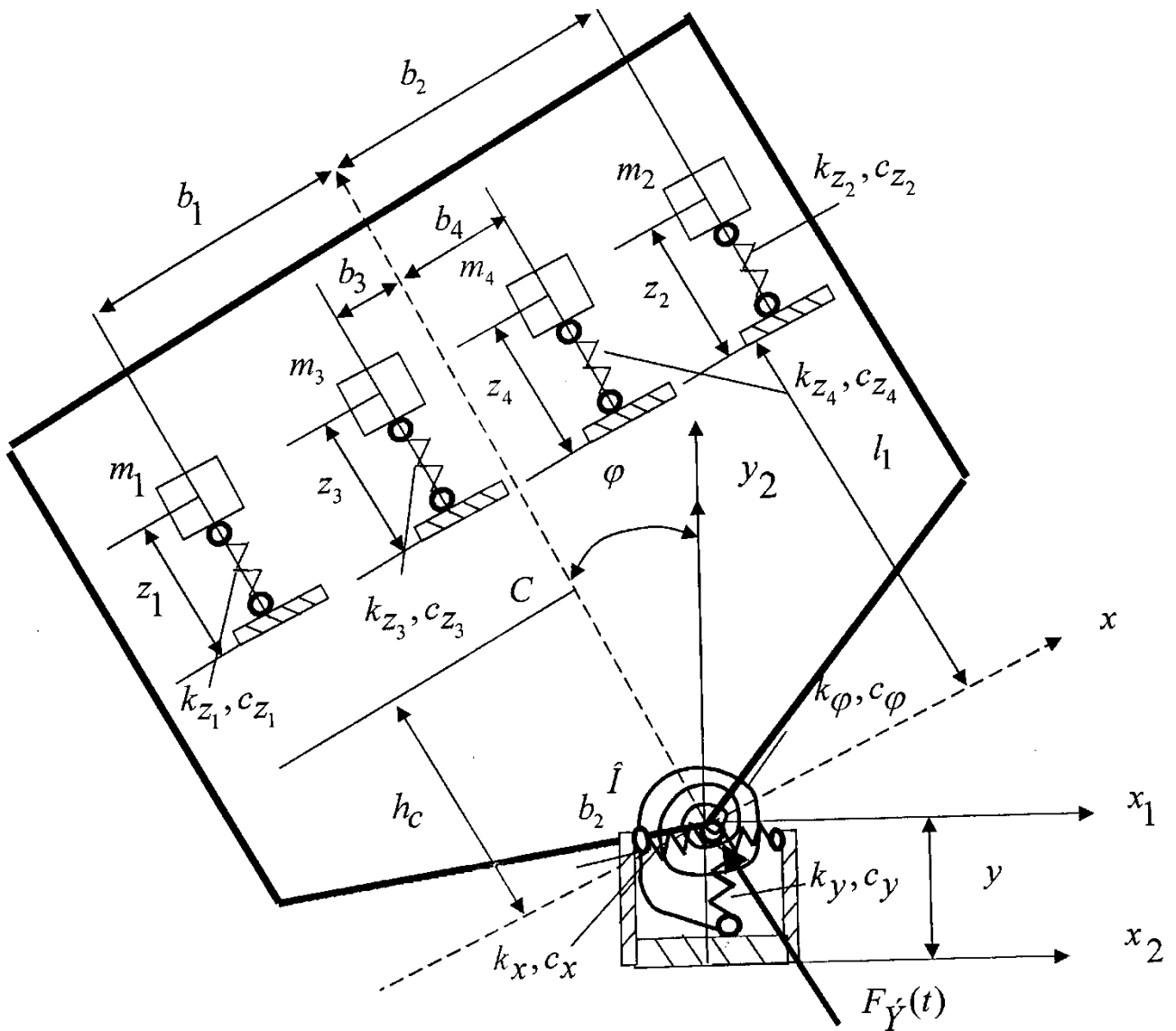


Рис. 2. Модель перевернутого физического маятника

Уравнения, описывающие колебательные движения системы в линейном приближении и учётом того, что парциальные частоты осцилляторов лежат значительно выше парциальной частоты угловых колебаний маятника, имеют вид

$$\begin{aligned}
 \ddot{\xi} &= \frac{mbl_1}{I_0} \ddot{\Delta}_1 + \frac{mbl_2}{I_0} \ddot{\Delta}_2, \\
 \ddot{\Delta}_1 + 2\beta_{z_1} \dot{\Delta}_1 + \omega_1^2 \Delta_1 &= -2\ddot{y}, \\
 \ddot{\Delta}_2 + 2\beta_{z_2} \dot{\Delta}_2 + \omega_2^2 \Delta_2 &= -2\ddot{y} \\
 \Delta_1 &= z_1 + z_2, \\
 \Delta_3 &= z_1 + z_2, \\
 \ddot{y} &= \frac{m_1}{M} (2\beta_{z_1} \dot{\Delta} + \omega_1^2 \Delta) + \frac{m_3}{M} (2\beta_{z_3} \dot{\Delta} + \omega_3^2 \Delta) + \frac{F_Y(t)}{M}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Структурная схема, составленная в пакете Simulink рис. 3 составлялась с учётом следующих физических параметров исследуемой системы:

$$m_1 = m_2 = 9\hat{e}\tilde{a}, m_3 = m_4 = 7\hat{e}\tilde{a}, M = 45\hat{e}\tilde{a}, \tilde{n}_{z_1} = c_{z_2} = 175\text{c}^{-1}, \tilde{n}_{z_3} = c_{z_4} = 93.75\text{c}^{-1}, \\ \omega_1 = 2800\tilde{A}\ddot{o}, \omega_2 = 1500\tilde{A}\ddot{o}, l_1 = l_2 = 0.25, l_3 = l_4 = 0.5.$$

Как видно из аналитических исследований рис.4, в районе двух парциальных частот осцилляторов 1500 и 2800 Гц наблюдается искажение вибрационного режима в рабочем направлении в виде гашения колебания, а в поперечном направлении в районе тех же частот наблюдается значительное усиление колебаний.

Аналитические исследования проводились при помощи дифференциальных уравнений, которые описывают колебательные движения механической системы, в линейном приближении без учёта нелинейных членов при помощи пакета Simulink путём блочного программирования. Построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в случае переменной амплитуды возбуждающей силы, зависящей от частоты. Показано, что в зоне парциальных резонансов наблюдается динамическое гашение задаваемого программного движения в вертикальном направлении и появляются интенсивные поперечные колебания в направлении ортогональному программному.

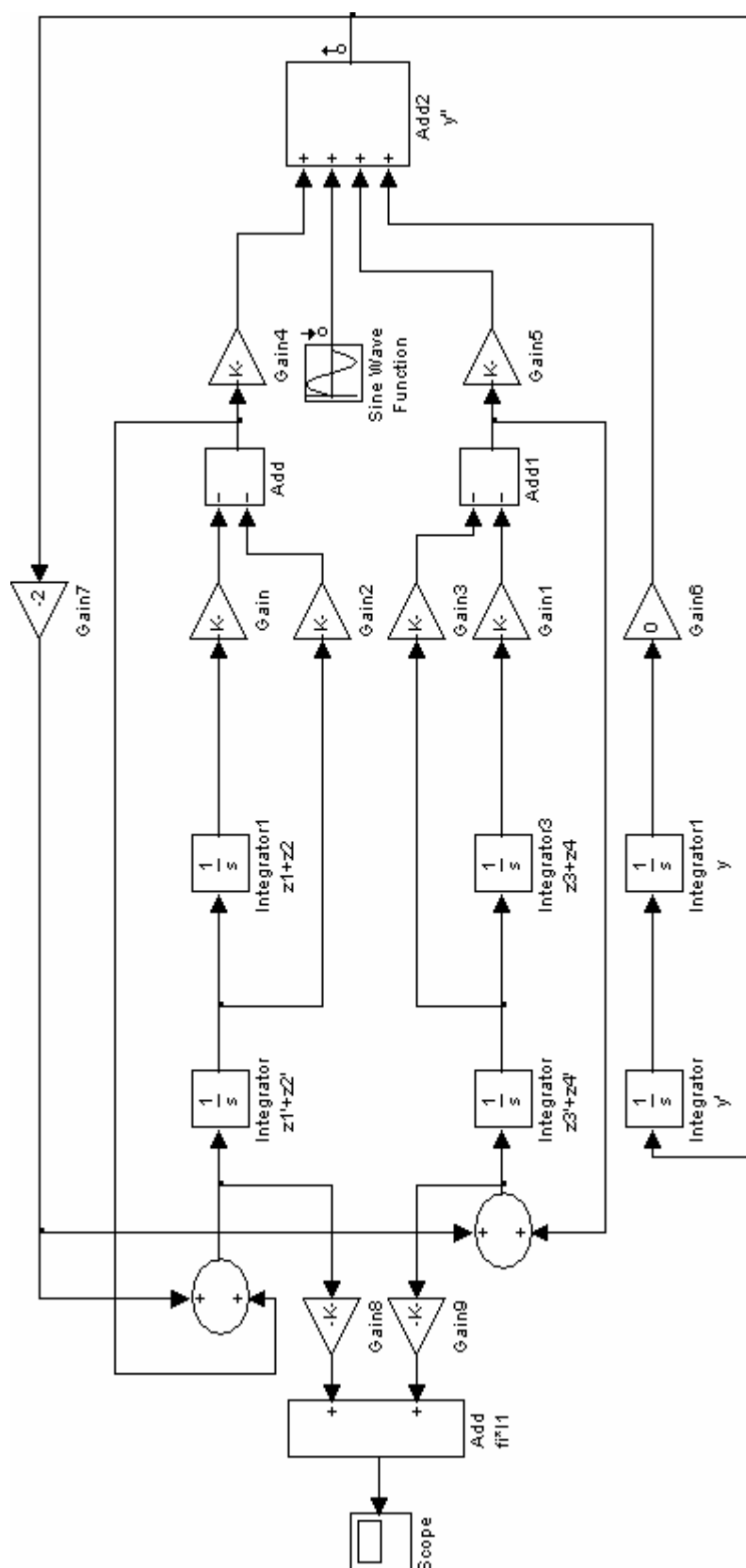


Рис. 3 Структурная схема, составленная в пакете Simulink для исследования системы дифференциальных уравнений, описывающих колебания маятника с четырьмя осцилляторами

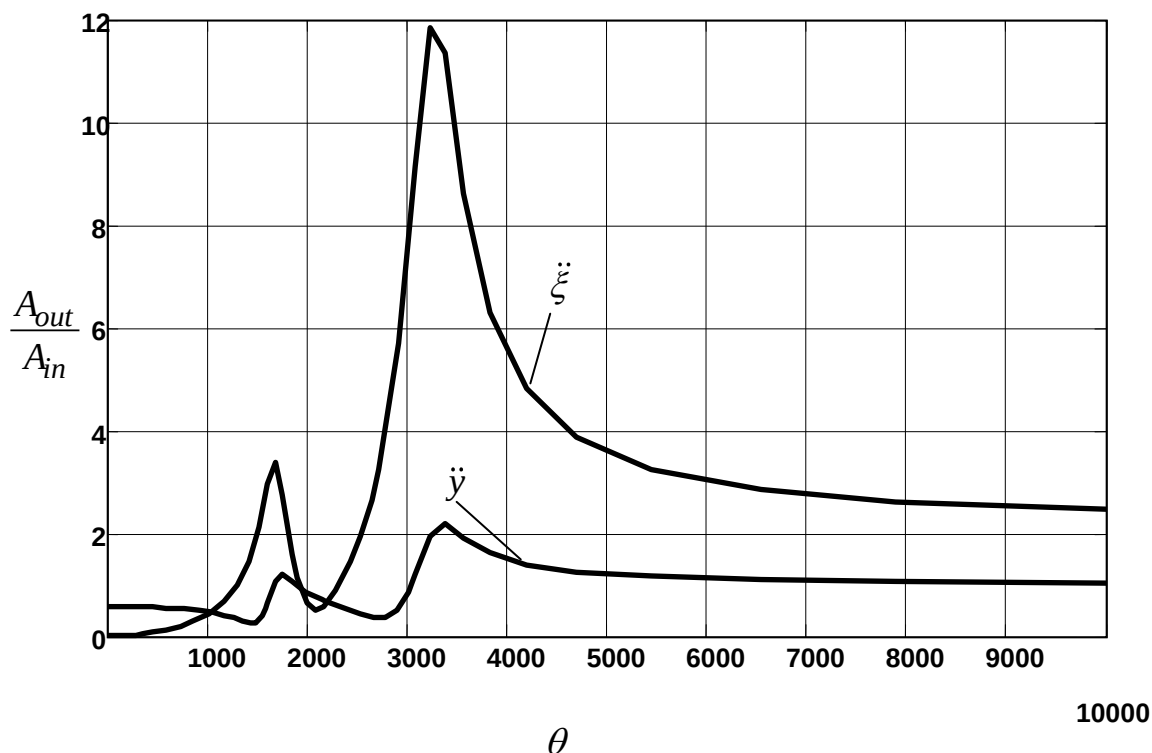


Рис. 4. Зависимости уровня ускорений от частоты для физического маятника взаимодействующей с осцилляторами; $\ddot{y}$ - в вертикальном направлении, $\ddot{\xi}$ - в поперечном направлении

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герман-Галкин С.Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК.- СПб.: КОРОНА – Век, 2008.
2. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления // М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004.
3. Добонравов В.В. Основы аналитической механики. Учебное пособие для вузов М., «Высшая школа», 1976. 264 с.
4. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. СПб.: Питер, 2001.
5. Черных И. В. SIMULINK- среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. к.т.н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ

Юрий Артемьевич Можжаев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. 89833095156, e-mail: yura82@mail.ru

В статье рассматривается задача об устойчивости положений динамического равновесия перевёрнутого физического маятника с двумя дополнительными внутренними степенями свободы.

Ключевые слова: вибрация, параметрическая неустойчивость, программное движение, устойчивость.

RESEARCH OF PARAMETRIC INSTABILITY OF MOTION PROGRAM

Yuriy A. Mozhaev

Siberian State Geodetic Academy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, senior teacher, department of special devices and technologies, tel. 89833095156, e-mail: yura6810@mail.ru

In this paper we consider the problem of the stability of the dynamic equilibrium of physical inverted pendulum with two additional internal degrees of freedom.

Key words: vibration, stability, parametric instability, program motion.

Для проведения вибрационных испытаний в настоящее время широко используются электродинамические вибрационные установки. Качество проводимых испытаний напрямую зависит от того, насколько будут малы динамические искажения задаваемых режимов вибрации. Для однокомпонентного вибростенда таковыми являются искажения следующего вида: появление дополнительных гармоник в возмущающей электродинамической силе, динамическое гашение колебаний в задаваемом направлении и появление «паразитных» поперечных колебаний, ортогональных программному. В нашей работе мы ограничимся исследованием третьего типа искажения в представлении как неустойчивость вертикального режима вибрации [2], то есть программное движение подвижной части электродинамического возбудителя, задаваемое в вертикальном направлении будет считаться неустойчивым при возникновении движения ортогональные программному. Искажения возникают по причине того, что при воспроизведении вибрации подвижная механическая система представляет собой сложную колебательную систему, так как отдельные конструктивные её части, масса которых намного меньше массы этой системы в целом, могут совершать относительные колебания [3].

При анализе причин искажения режимов вибрации, связанных с механическими взаимодействиями в механической подсистеме, её представим как открытую систему под действием следящей электродинамической силы $F_{\dot{y}}$ в виде перевёрнутого физического маятника с двумя осцилляторами (рис .1). Где c_{φ} - коэффициент, характеризующий демпфирование при угловом перемещении; $c_{x,y,z}$ - коэффициенты демпфирования при перемещении вдоль осей x, y и z ; k_{φ} - коэффициент угловой жёсткости пружины; $k_{x,y,z}$ - коэффициенты жёсткости при линейных перемещениях вдоль осей y и z ; M, m_1, m_2 массы маятника и осцилляторов; I_0 - момент инерции физического маятника относительно оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через точку O .

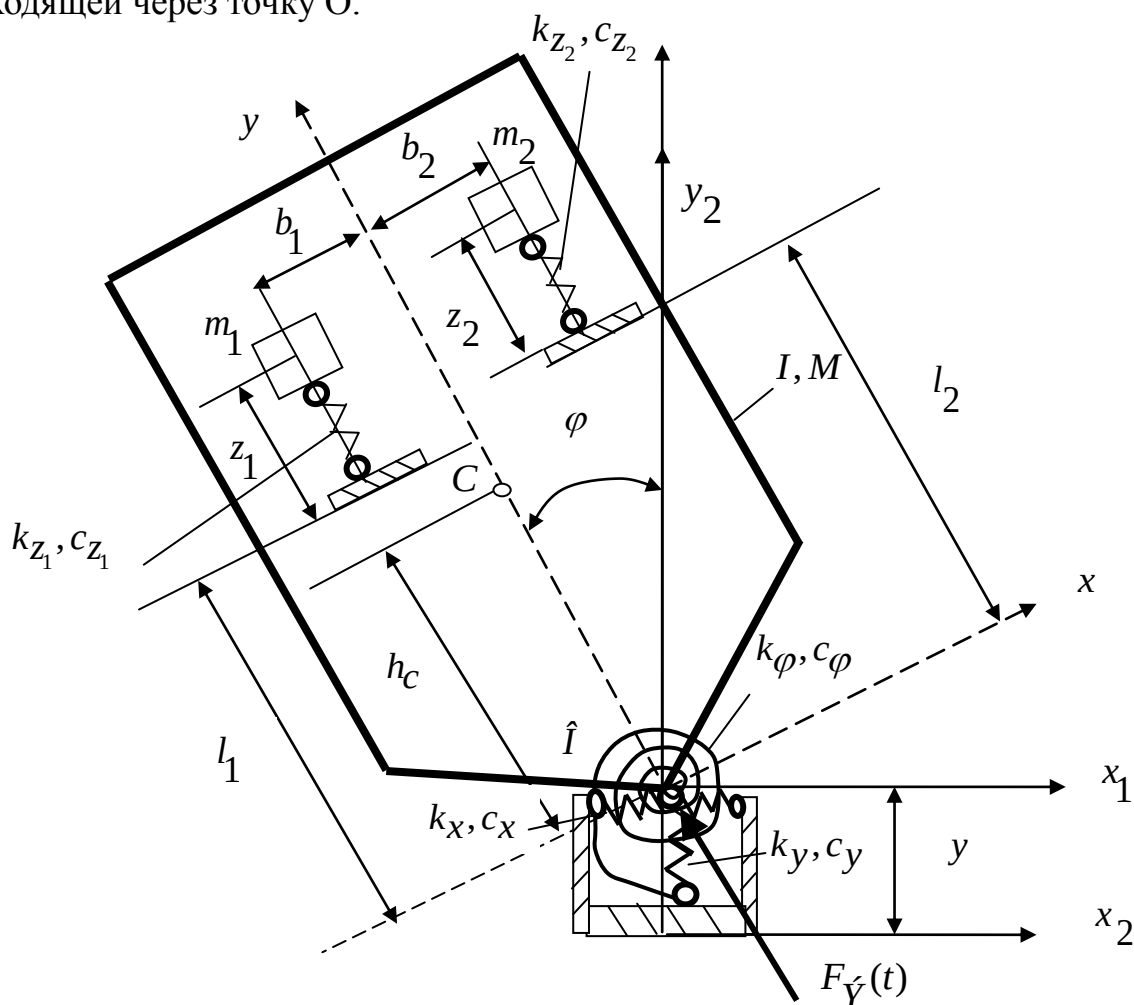


Рис. 1. Перевёрнутый физический маятник с осцилляторами

Уравнения описывающие невозмущённое движение запишем в виде

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = F(t) - m_1\ddot{z}_1 - m_2\ddot{z}_2; \\ m_1\ddot{z}_1 + c_{z_1}\dot{z}_1 + k_{z_1}z_1 = -m_1\ddot{y}; \\ m_2\ddot{z}_2 + c_{z_2}\dot{z}_2 + k_{z_2}z_2 = -m_2\ddot{y}. \end{cases} \quad (1)$$

Осцилляторы являются не только динамическими гасителями вертикального режима колебаний, но и являются одной из основных причин искажения исследуемого программного движения. Пусть автоматическое управляющее устройство обеспечивает режим вертикальных колебаний по закону

$$\ddot{y} = -\ddot{y}_0 \cos(\theta \cdot t) \quad (2)$$

Тогда осцилляторы будут совершать колебания согласно (2)

$$\begin{aligned} z_1(t) &= \frac{Y_1}{\sqrt{K(\gamma_1)}} \cos(\theta \cdot t + \delta_{z_1}); & z_2(t) &= \frac{Y_2}{\sqrt{K(\gamma_2)}} \cos(\theta \cdot t + \delta_{z_2}); \\ K_1(\gamma_1) &= (1 - \gamma_1^2)^2 + \left(\frac{\Delta_{z_1}}{\pi}\right)^2 \gamma_1^2; & K_2(\gamma_2) &= (1 - \gamma_2^2)^2 + \left(\frac{\Delta_{z_2}}{\pi}\right)^2 \gamma_2^2; \\ \Delta_{z_1} &= \frac{2\pi\varepsilon_{z_1}}{\omega_{z_1}}, & Y_1 &= \frac{\ddot{y}_0}{\omega_{z_1}^2}, & \Delta_{z_2} &= \frac{2\pi\varepsilon_{z_2}}{\omega_{z_2}}, & Y_2 &= \frac{\ddot{y}_0}{\omega_{z_2}^2}, \\ \gamma_1 &= \frac{\theta}{\omega_{z_1}}, & \gamma_2 &= \frac{\theta}{\omega_{z_2}}, & \omega_{z_1}^2 &= \frac{k_{z_1}}{m_1}, & \omega_{z_2}^2 &= \frac{k_{z_2}}{m_2} \\ \varepsilon_{z_1} &= \frac{c_{z_1}}{2m_1}, & \varepsilon_{z_2} &= \frac{c_{z_2}}{2m_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Пусть уравнения возмущённого движения системы имеют вид, учтём при этом что система не имеет возмущений по $\tilde{\theta}$

$$\tilde{\varphi} = 0 + \varphi\hat{a}, \quad \tilde{z}_1 = z_1 + z_{1\hat{a}}, \quad \tilde{z}_2 = z_2 + z_{2\hat{a}}, \quad \tilde{y} = y + y\hat{a}. \quad (4)$$

Автоматическое управляющее устройство компенсирует возмущение по y соответствующим изменением силы, тогда $y\hat{a} = 0$, тогда используя (4) уравнения в вариациях запишем в виде

$$\begin{aligned}
& \left(n^2 + 4 \frac{n^2 \chi_1^2}{\sqrt{K_1(n\chi_1)}} \mu \cos(2\tau - \delta_{z_1}) + 4 \frac{n^2 \chi_2^2}{\sqrt{K_2(n\chi_2)}} \mu \cos(2\tau - \delta_{z_2}) \right) \ddot{\xi}_{\hat{a}} + \\
& + \left(n \frac{\Delta\varphi}{\pi} - 8 \frac{n^2 \chi_1^2}{\sqrt{K_1(n\chi_1)}} \mu \sin(2\tau - \delta_{z_1}) - 8 \frac{n^2 \chi_2^2}{\sqrt{K_2(n\chi_2)}} \mu \sin(2\tau - \delta_{z_2}) \right) \dot{\xi}_{\hat{a}} + \\
& + \left(1 + 2 \left(1 + \frac{\varsigma}{\eta} \right) \cos(2\tau) \right) \xi_{\hat{a}} = 4h_2^2 n^2 \left(\ddot{z}_{1\hat{a}} - \frac{\nu}{\eta} \ddot{z}_{2\hat{a}} \right); \\
& n^2 \chi_1^2 \ddot{z}_{1\hat{a}} + n \chi_1 \frac{\Delta_{z_1}}{\pi} \dot{z}_{1\hat{a}} + z_{1\hat{a}} = n^2 \chi_1^2 \ddot{\xi}_{\hat{a}}; \\
& n^2 \chi_2^2 \ddot{z}_{2\hat{a}} + n \chi_2 \frac{\Delta_{z_2}}{\pi} \dot{z}_{2\hat{a}} + z_{2\hat{a}} = n^2 \chi_2^2 \nu \ddot{\xi}_{\hat{a}}. \\
& n = \frac{\theta}{2\omega\varphi}, \quad \chi_1 = \frac{\omega\varphi}{\omega_{z_1}}, \quad \chi_2 = \frac{\omega\varphi}{\omega_{z_2}}, \quad \varsigma = \frac{l_2}{l_1}, \quad \eta = \frac{m_1}{m_2}, \\
& \nu = \frac{b_2}{b_1}, \quad \xi_{\hat{a}} = b_1 \varphi_{\hat{a}}, \quad h_2 = \frac{b_1}{\rho_\varphi}, \quad 2\tau = \theta t.
\end{aligned} \tag{5}$$

Границам областей неустойчивости соответствуют решения с периодом π и 2π . Эти решения также будем искать в виде [1]

$$\begin{aligned}
\xi_{\hat{a}}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \sin(kt) + B_k \cos(kt)); \\
z_{1\hat{a}}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} (A_k' \sin(kt) + B_k' \cos(kt)); \\
z_{2\hat{a}}(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} (A_k'' \sin(kt) + B_k'' \cos(kt)).
\end{aligned} \tag{6}$$

Для исследования главной зоны неустойчивости ограничимся первыми членами рядов (6) и подставив в (5), получим уравнение критических частот.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{61} & a_{62} & \dots & a_{66} \end{bmatrix} = 0 \tag{7}$$

Коэффициенты (7) имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
a_{11} &= 1 - n^2 - \mu \left(\left(1 + \frac{\varepsilon}{\eta} \right) + 2 \frac{n\chi_1 \Delta_{z_1}}{\sqrt{K_1(n\chi_1)}} \cos(\delta_{z_1}) + 2 \frac{n\chi_2 \Delta_{z_2}}{\sqrt{K_2(n\chi_2)}} \cos(\delta_{z_2}) \right); \\
a_{12} &= -\frac{\Delta\varphi}{\pi} n + \mu \left(2 \frac{n^2 \chi_1^2}{\sqrt{K_1(n\chi_1)}} \sin(\delta_{z_1}) + 2 \frac{\varepsilon}{\eta} \frac{n^2 \chi_2^2}{\sqrt{K_2(n\chi_2)}} \sin(\delta_{z_2}) \right); \\
a_{13} &= 4h_2^2 n^2; \quad a_{14} = 0; \quad a_{15} = -4 \frac{\nu}{\eta} h_2^2 n^2; \quad a_{16} = 0; \\
a_{21} &= \frac{\Delta\varphi}{\pi} n + \mu \left(2 \frac{n^2 \chi_1^2}{\sqrt{K_1(n\chi_1)}} \sin(\delta_{z_1}) + 2 \frac{\varepsilon}{\eta} \frac{n^2 \chi_2^2}{\sqrt{K_2(n\chi_2)}} \sin(\delta_{z_2}) \right); \\
a_{22} &= 1 - n^2 + \mu \left(\left(1 + \frac{\varepsilon}{\eta} \right) + 2 \frac{n\chi_1 \Delta_{z_1}}{\pi} \cos(\delta_{z_1}) + 2 \frac{n\chi_2 \Delta_{z_2}}{\pi} \cos(\delta_{z_2}) \right); \\
a_{23} &= 0; \quad a_{24} = 4h_2^2 n; \quad a_{25} = 0; \quad a_{26} = -4 \frac{\nu}{\eta} h_2^2 n^2; \\
a_{31} &= 0; \quad a_{32} = -\nu n^2 \chi_2^2; \quad a_{33} = 0; \quad a_{34} = 0; \\
a_{35} &= n\chi_2 \frac{\Delta_{z_2}}{\pi}; \quad a_{36} = 1 - n^2 \chi_2^2; \quad a_{41} = n^2 \chi_1^2; \quad a_{42} = 0; \\
a_{43} &= 1 - n^2 \chi_1^2; \quad a_{44} = -n\chi_1 \frac{\Delta_{z_1}}{\pi}; \quad a_{45} = 0; \quad a_{46} = 0; \\
a_{51} &= \nu n^2 \chi_2^2; \quad a_{52} = 0; \quad a_{53} = 0; \quad a_{54} = 0; \\
a_{55} &= n^2 \chi_2^2 - 1; \quad a_{56} = n\chi_2 \frac{\Delta_{z_2}}{\pi}; \quad a_{61} = 0; \quad a_{62} = n^2 \chi_1^2; \\
a_{63} &= n\chi_1 \frac{\Delta_{z_1}}{\pi}; \quad a_{64} = 1 - n^2 \chi_1^2; \quad a_{65} = 0; \quad a_{66} = 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

Исследование зоны неустойчивости будем также проводить для исчезающе малого затухания при $\Delta\varphi \rightarrow 0, \Delta_{z_1} \rightarrow 0, \Delta_{z_2} \rightarrow 0$. В этом случае $\sin(\delta_{z_1}) = 0$, $\sin(\delta_{z_2}) = 0$, $\cos(\delta_{z_1}) = 0$, $\cos(\delta_{z_2}) = 0$, $K_1(n\chi_1) = (1 - 4\chi_1^2 n^2)^2$, $K_2(n\chi_2) = (1 - 4\chi_2^2 n^2)^2$. В этом случае вычисляя определитель (7), мы получим уравнение и разрешая его относительно μ , учитывая при этом только положительный корень, мы получим следующее выражение

$$\mu = \frac{(4n^2\chi_1^2 - 1)(4n^2\chi_2^2 - 1)A}{(n^2\chi_1^2 - 1)(n^2\chi_2^2 - 1)B}$$

$$A = (4\nu^2 h_2^2 \chi_1^2 \chi_2^2 + 4\eta h_2^2 \chi_1^2 \chi_2^2 - \eta \chi_1^2 \chi_2^2) n^6 +$$

$$+ (-4\nu^2 h_2^2 \chi_2^2 - 4\eta h_2^2 \chi_1^2 + \eta \chi_1^2 \chi_2^2 + \eta \chi_1^2 + \eta \chi_2^2) n^4 -$$

$$- (\eta \chi_1^2 + \eta \chi_2^2 + \eta) n^2 + \eta;$$

$$B = (8\varsigma \chi_1^2 \chi_2^2 + 8\eta \chi_1^2 \chi_2^2) n^4 - ((4\varsigma + 2\eta) \chi_1^2 + (4\eta + 2\varsigma) \chi_2^2) n^2 + n + \varsigma$$
(9)

Мы будем исследовать случай условия возникновения параметрических колебаний даже при малых значениях коэффициента возбуждения μ . Для удобства (3.33) преобразуем к виду

$$\mu = \frac{(4n^2\chi_1^2 - 1)(4n^2\chi_2^2 - 1)(n^2 - N_1^2)(n^2 - N_2^2)(n^2 - N_3^2)}{(n^2\chi_1^2 - 1)(n^2\chi_2^2 - 1)B}$$
(10)

где N_1 , N_2 , N_3 корни уравнения 6 степени, пропорциональные собственным частотам связанных колебаний МП по φ , z_1, z_2 .

Коэффициент $\mu \rightarrow 0$, когда числитель выражения (9) равен нулю. При $n = N_1$, $n = N_2$, $n = N_3$, $n = \frac{1}{2\chi_1}$, $n = \frac{1}{2\chi_2}$ мы имеем 5 интервалов параметрической неустойчивости в окрестности $\theta = \omega_{z_1}$, $\theta = \omega_{z_2}$ и $\theta = \Omega_1$, $\theta = \Omega_2$, $\theta = \Omega_3$. Где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ - собственные частоты МП.

Рассмотрим частный случай двух одинаковых осцилляторов равноудалённых от оси симметрии и точки подвеса возбудителя, а также имеющего одинаковые физические характеристики - $m_1 = m_2$, $\beta_{z_1} = \beta_{z_2}$, $\omega_{z_1} = \omega_{z_2}$. В этом случае $\nu = 1, \eta = 1, \varsigma = 1, \chi_1 = \chi_2$. Безразмерный параметр h_2 характеризует смещение осциллятора относительно оси симметрии. Удаление осциллятора от оси симметрии рис. 2 приводит к расширению зоны устойчивости.

Далее нами исследовалась система с пятью степенями свободы при добавлении колебаний по дополнительной степени свободы в направлении обобщённой координаты x . Так как выражение получилось довольно громоздким, то мы ограничимся итоговыми результатами. Мы будем уже иметь 6 интервалов параметрической неустойчивости. При исследовании маятника с 4 осцилляторами как систему с 6 степенями свободы мы будем иметь 7 интервалов неустойчивости. При добавлении колебаний в направлении x будем иметь 8 интервалов неустойчивости. Как видно из исследований — при

увеличении числа степеней свободы системы мы будем иметь большее число зон параметрической неустойчивости.

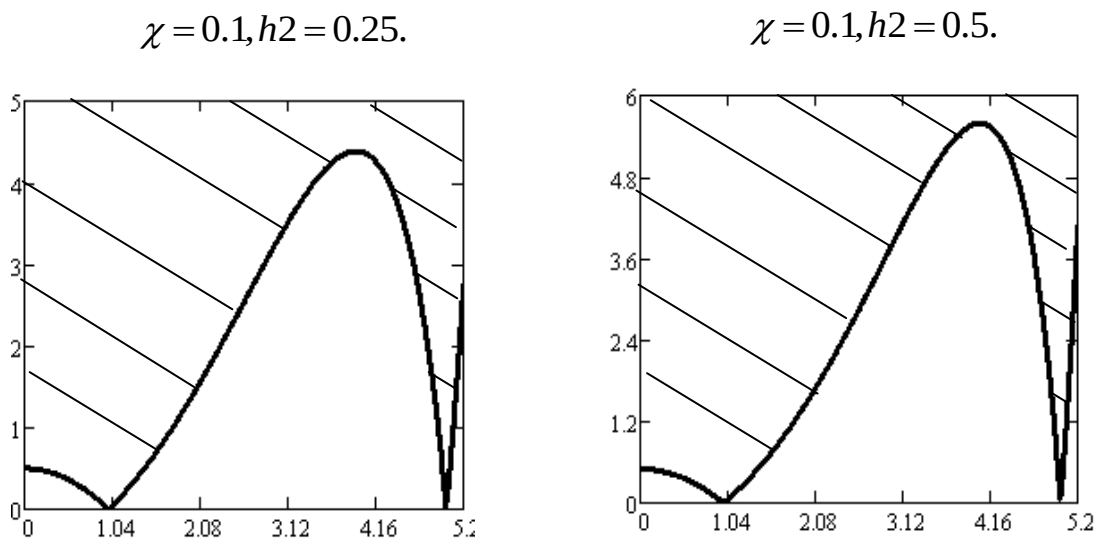


Рис. 2. Области параметрической неустойчивости для системы с двумя одинаковыми осцилляторами

Как видно из исследований - при увеличении числа степеней свободы появляется большее число интервалов неустойчивости в районе конструктивных резонансов ПЧ ЭДВ. Система становится неустойчивой по отношению к «паразитным» поперечным колебаниям не только в зоне основного параметрического резонанса [3], но и появляются новые зоны неустойчивости в зоне парциальных частот осцилляторов и в зоне собственных частот связанных боковых колебаний. Наличие осцилляторов приводит к расширению зоны основного параметрического резонанса в районе удвоенной парциальной частоты угловых колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. – М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – 603 с.
2. Ганиев Р.Ф., Кононенко В.О. Колебания твердых тел – М.: Наука, 1976. - 432 с.
3. Остроменский П.И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1992. - 173.

ОБЗОР МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СЛОЁВ ГРАФЕНА

Евгений Владимирович Лаптев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры наносистем и оптотехники, тел. +7(383) 913 060 2827, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

В статье рассмотрены существующие методы локализованного образования слоёв графена и графеновых плёнок, свойства данного материала, а также его возможное применение в тех или иных областях микро- и нанoeлектроники.

Ключевые слова: графен, локализованное образование слоёв графена, нанотехнологии.

THE REVIEW OF LOCAL GRAPHEN LAYERS FORMATION METHODS

Eugene V. Laptev

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), postgraduate of Nanosystems and optical engineering department, phone +7(383) 913 060 2827, e-mail: Genius-1188@yandex.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

The review of modern local graphen layers formation methods is presented.

Key words: local graphen layers formation.

В данной статье рассмотрены свойства и методы получения материала, который может стать будущей основой микро- и нанoeлектроники. Как известно, графен (англ. *graphene*) – слой атомов углерода толщиной в один атом, соединённых посредством sp^2 связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно представить как одну плоскость графита, отделённую от объёмного кристалла. По оценкам, графен обладает большой механической жёсткостью и хорошей теплопроводностью (1 ТПа и $5 \times 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, соответственно). Высокая подвижность носителей тока при комнатной температуре делает его перспективным материалом для использования в самых различных приложениях, в частности, как будущую основу нанoeлектроники и возможную замену кремния в интегральных микросхемах.

На рис. 1 показана кристаллическая структура графена: атомы углерода выстроены в решётку «пчелиные соты» [1].

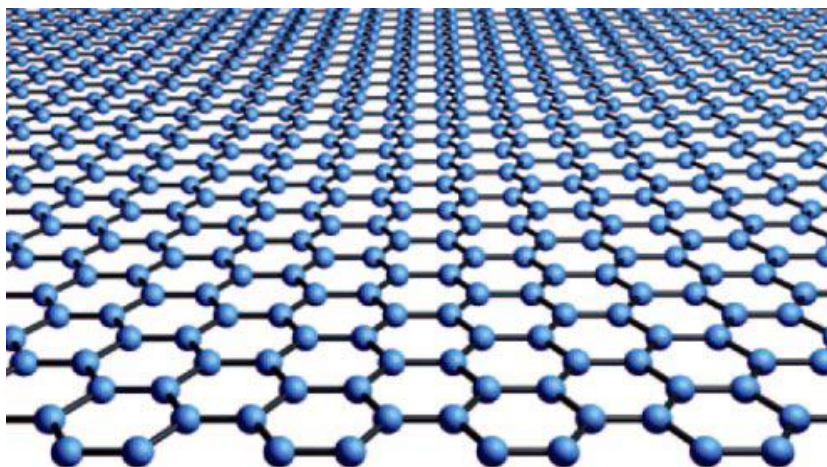


Рис. 1. Кристаллическая структура графена

Несмотря на то, что попытки изучения графена прослеживаются до 1859 года [2], его активное исследование началось не так давно, после нахождения довольно простого способа изготовления относительно больших и изолированных друг от друга образцов графена [3, 4].

Первоначальный метод микромеханического расслоения или его более известное название метод «клеякой ленты» [3,4], оказался весьма эффективным и простым и благодаря этому исследования графена стали очень быстро развиваться. Несмотря на столь удобный способ получения графена, на сегодняшний день, данный метод не позволяет получить однородные и равноразмерные слои графена. Поэтому метод микромеханического расслоения не может быть использован в качестве метода локализованного образования слоёв графена. В дальнейшем довольно будут подробно рассмотрены те методы, которые позволяют получить локализованные, однородные и равноразмерные слои графена. Однако для того чтобы понять для чего вообще нужны такие методы, необходимо проанализировать потенциальные области применения графена в виде локализованных слоёв.

В 2010 году два учёных Манчестерского университета (Великобритания), Новосёлов Константин Сергеевич и Гейм Андрей Константинович стали лауреатами Нобелевской премии 2010 года по физике, за открытие графена. Данная награда, служит признанием многообещающего будущего данного материала. Он может произвести революцию в индустрии электроники и позволит создавать легкие, крепче стали, материалы. И это одни из многих возможных применений данного материала. Гейм заявил, что он "видит параллели с ситуацией, которая сложилась около 100 лет назад, когда были открыты полимеры. Прошло некоторое время и полимеры вошли в нашу жизнь в виде пластмассы и стали играть важную роль в жизни людей" [5].

Постараемся осветить наиболее известные и полезные потенциальные области применения графена. И так потенциальные области применения

графена: замена углеродных волокон в композитных материалах, с целью создания более легковесных самолетов и спутников; замена кремния в транзисторах; датчики на основе графена могут обнаруживать опасные молекулы; использование графеновой пудры в электрических аккумуляторах, с целью увеличения их эффективности; оптоэлектроника; прозрачное токопроводящее покрытие для солнечных панелей и для мониторов; более крепкие ветряные двигатели; более устойчивые к механическому воздействию медицинские имплантаты; улучшение проводимости материалов; высокоомощные высокочастотные электронные устройства; искусственные мембраны для разделения двух жидкостей в резервуаре; производство графеновых нанолент позволит создать баллистические транзисторы [5]. Для того чтобы стало возможным применение графена в вышеуказанных областях, необходимо разрабатывать всё более эффективные методы локализованного образования слоёв графена, а также использовать существующие в качестве отправной точки. Наиболее эффективные и общепринятые методы образования слоёв графена: химический метод, эпитаксиальный метод, метод термического разложения подложки из углеродосодержащего материала, например карбида кремния (SiC). Рассмотрим более подробно каждый из методов.

Химический метод. Кусочки графена можно приготовить из графита, используя химические методы [6]. Для начала микрокристаллы графита подвергаются действию смеси серной и соляной кислот. Графит окисляется, и на краях образца появляются карбоксильные группы графена. Их превращают в хлориды при помощи тионилхлорида. Затем под действием октадециламина в растворах тетрагидрофурана, тетрахлорметана и дихлорэтана они переходят в графеновые слои толщиной 0,54 нм. Этот химический метод не единственный, и, меняя органические растворители и химикаты, можно получить нанометровые слои графена [7,8,9]. Несмотря на возможность получения данным методом нанометровых слоёв графена, он довольно сложен, трудоёмок и требует не малого количества химических веществ, поэтому автор статьи считает его не эффективным методом локализованного образования слоёв графена.

Эпитаксиальный метод. Сотрудники Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) продемонстрировали возможность создания пленок однослойного графена на различных диэлектрических подложках методом химического осаждения из паровой фазы.

На рис. 2 показаны стадии получения графеновой плёнки [10].

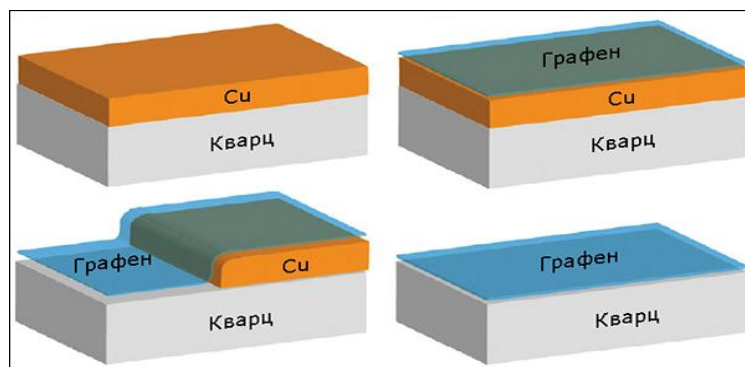


Рис. 2. Стадии получения графеновой плёнки

Подложками служили монокристаллы кварца, сапфир, кварцевое стекло и диоксид кремния. Сначала на них методом электронно-лучевого испарения наносился слой катализатора (меди) толщиной 100–450 нм. Затем при температуре в 1 000 °С начинался процесс парофазного химического осаждения в присутствии смеси H_2 и CH_4 , продолжавшийся от 15 минут до семи часов. В процессе выращивания пленки или сразу после его окончания медь собирается в капли и удаляется, оставляя однослойный графен на диэлектрической подложке [10].

Метод термического разложения подложки из углеродосодержащего материала (на примере SiC). Графитовая плёнка формируется при термическом разложении поверхности подложки SiC (этот метод получения графена очень близок к промышленному производству), причём качество выращенной плёнки зависит от того, какая стабилизация у кристалла: C-стабилизированная или Si-стабилизированная поверхность - в первом случае качество плёнок выше.

Закключение. Несмотря на значительное количество методов получения графена, ни один из вышеперечисленных не позволяет произвести локализованное образование островков графена. Однако на данный момент в лабораториях Сибирской Государственной Геодезической Академии (г. Новосибирск) исследуются два метода локализованного образования островков графена, которые в дальнейшем могут применяться при формировании базовых элементов в новейших приборах и устройствах. Первый способ предполагает формирование островков графена методом иницированного лазерным излучением парофазного химического осаждения (ЛПФХО, англ. LCVD) из паров элементоорганических соединений на монокристаллических поверхностях. Второй способ основывается на формировании островков графена в результате термостимулированной лазерным локальным импульсным облучением диффузии атомов углерода изнутри монокристаллических плёнок (карбида кремния, насыщенного углеродом никеля) на их поверхность, с дальнейшим многостадийным процессом переноса графеновых чешуек на рабочую поверхность. Два данных метода при соблюдении всех норм и правил технологического процесса, позволяют произвести локализованное образование островков графена, что непосредственно является серьёзным достижением в области нанотехнологий.

Многие учёные всего мира исследуют, усовершенствуют и разрабатывают методы получения графена для тех или иных областей науки. В зависимости от потребности в изготовлении материалов с новыми свойствами, а также разработки новейших приборов и устройств на основе графена, учёные ставят перед собой задачи по разработке метода, позволяющего сформировать максимально приближенную к идеальной равномерную, однородную, локализованную структуру графена.

И хотя на сегодняшний день существует немало недоработок и проблем при изучении графена, факт остаётся фактом, графен является материалом настоящей и будущей нанoeлектроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новосёлов, К.С. Графен: материалы Флатландии [Текст] / К.С. Новосёлов // Нобелевская лекция. – Стокгольм, 2010.
2. Brodie B C Phil. Trans. R. Soc. Lond. 149 249 (1859)
3. Novoselov K S et al. Science 306 666 (2004)
4. Novoselov K S et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 102 10451 (2005)
5. Графен изменит нашу жизнь: практическое применение графена в будущем (2010) [Electronic resource] / Статья – Англ. – Режим доступа: <http://globalscience.ru/article/read/18798/>
6. Solution Properties of Graphite and Graphene Sandip Niyogi, Elena Bekyarova, Mikhail E. Itkis, Jared L. McWilliams, Mark A. Hamon, and Robert C. Haddon J. Am. Chem. Soc.; 2006; 128
7. Bunch J. S. *et al.* Coulomb Oscillations and Hall Effect in Quasi-2D Graphite Quantum Dots Nano Lett. 5, 287 (2005)
8. Li X. *et. al.* Highly conducting graphene sheets and Langmuir-Blodgett films Nature Nanotechnology 3, 538 (2008)
9. Hernandez Y. *et. al.* High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite Nature Nanotech. 3, 563 (2008)
10. Direct Chemical Vapor Deposition of Graphene on Dielectric Surfaces (2010) [Electronic resource] / American Chemical Society – Англ. – Режим доступа: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl9037714>

© Е.В. Лантев, С.Л. Шергин, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МОНОАТОМНЫХ СЛОЕВ УГЛЕРОДА МЕТОДОМ LCVD

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Сергей Леонидович Шергин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

Проведён теоретический анализ процессов получения монокристаллических плёнок углерода на поверхности подложки лазерным пиролизом адсорбированного слоя молекул углеводородов. Показано, что для получения равномерных на большой площади подложки слоёв углерода при наносекундной длительности лазерных импульсов необходимо процесс вести при повышенных значениях парциального давления углеводорода.

Ключевые слова: ЛПФХО, графен.

THE INVESTIGATION OF MONOATOMIC CARBON LAYERS FORMATION PROCESSES BY LCVD METHOD

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Sergey L. Shergin

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: serkron@mail.ru

The theoretical analysis of processes to creation monoatomic carbon films on substrate surface by laser pyrolysis of adsorbed hydrocarbon molecules is presented. The condition of formation uniform carbon layers with big square is high partial pressure of hydrocarbon at nanosecond LCVD.

Key words: LCVD, grapheme.

В настоящей публикации представлены результаты исследований, выполненных в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 16.740.11.0660).

В настоящее время метод лазерного парофазного химического осаждения (Laser induced Chemical Vapor Deposition – LCVD) применяется для получения тонкоплёночных металлических и диэлектрических рисунков на подложках [1]. Этот метод при наносекундной длительности стимулирующих лазерных импульсов предполагает проведение процессов в адсорбированном мономолекулярном слое на поверхности твёрдого тела, что может соответствовать условиям образования плёнок графена. Проблемой является недостаточная исследованность лазерно-стимулированного получения совершенных одноатомных структур из атомов углерода.

Слой графена представляет собой слой атомов углерода толщиной в атом. Представляется, что наиболее экономичным способом получения такого слоя является его формирование из адсорбированного на поверхности твёрдого тела мономолекулярного слоя некоторого реагента, который при распаде своей молекулы высвобождает атом углерода.

Далее проводится анализ условий формирования и возможных параметров адсорбированного на поверхности подложки слоя реагента при формировании тонких плёнок методом LCVD из паров элементоорганических соединений. Стимулом для такого исследования являются известные из литературы сообщения о получении плёнок графена методом термостимулированного парофазного химического осаждения (CVD) [2-11].

Физическая картина формирования адсорбированного слоя на поверхности при лазерном импульсно-периодическом облучении подложки в атмосфере паров реагентов при общем давлении газовой среды, близком к атмосферному, выглядит следующим образом [1]. Газ – носитель доставляет пары реагентов к поверхности твёрдого тела. Молекулы диффундируют в потоке к поверхности и адсорбируются. Полярность молекул предполагает преимущественно химический характер их адсорбции в равновесном состоянии. Однако, переход в состояние хемосорбции происходит через стадию физической адсорбции молекулы; время её пребывания в состоянии физсорбции уменьшается при нагревании подложки. Адсорбция молекул происходит на активных центрах поверхности; в соответствии с теорией БЭТ физическая адсорбция имеет полимолекулярный характер – после установления равновесия слоя с газовой фазой часть поверхности свободна от молекул, часть покрыта мономолекулярным слоем, часть – бимолекулярным слоем, и т. д. [12,13].

В момент прихода лазерного импульса, обладающего энергией, достаточной для термоактивирования реакций пиролиза (поверхность в импульсе нагревается до 700–1000 К), адсорбированные молекулы распадаются с выделением атомов металла, осаждающихся на поверхности, и газообразных легколетучих продуктов пиролиза. Часть молекул адсорбата термодесорбируется без разложения; поверхность образующейся металлической плёнки после воздействия лазерного импульса некоторое время остаётся «атомарно-чистой», затем вновь адсорбирует вещество из газовой

фазы. В случае использования паров МОС, переносимых потоком газа – носителя, адсорбция имеет свои особенности.

Изотерма БЭТ, характеризующая состояние адсорбата в равновесии с газовой средой при давлении p пара, близком к давлению p_0 насыщенного пара, определяется выражением [13]:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_m} = \frac{C_a(p/p_0)}{(1-p/p_0)[1+(C_a-1)(p/p_0)]}; \quad C_a = L \exp\left(\frac{E_1 - E_{v1}}{kT}\right), \quad (1)$$

где Γ – количество молекул в адсорбированном слое; Γ_m – количество молекул в мономолекулярном слое; L – постоянный коэффициент; E_1 – энергия взаимодействия молекулы первого слоя с поверхностью; E_{v1} – теплота испарения молекулы из вышележащих слоёв.

Отношение Γ/Γ_m в типичных случаях может быть равно единице при $p/p_0 = 0,35$ и увеличиваться до 4 при увеличении p/p_0 до 0,8.

Наличие в потоке пара молекул нескольких сортов приводит при адсорбции к конкуренции между ними, состав получившегося адсорбированного слоя зависит от нескольких условий, в том числе, от энергии активации адсорбции молекул, температуры поверхности и от парциального состава газового потока. Частота столкновений молекул газа с поверхностью тела равна [12]:

$$v_0 = \frac{1}{4} n v_T = n \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}}, \quad (2)$$

где n – концентрация молекул в газе; v_T – скорость теплового движения молекулы; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная.

Концентрация молекул газа – носителя в струе парогазовой смеси в десятки тысяч раз больше, чем реагента, поэтому вероятность их преимущественной адсорбции сразу же после прекращения лазерного импульса очень высока. Однако физсорбция имеет динамический характер, поэтому результирующий состав адсорбированного слоя ко времени прихода следующего лазерного импульса (в нашем случае период следования импульсов 1–10 мс) зависит от эффективности прилипания молекул к поверхности при их ударе о поверхность и от времени жизни молекул в адсорбированном состоянии. Коэффициент прилипания в первом приближении можно принять равным единице для любых молекул, так как поверхность сразу после окончания лазерного импульса является атомарно-чистой. Время жизни молекул в адсорбированном состоянии можно оценить по формуле Френкеля:

$$\tau = \tau_0 \exp(E/RT), \quad (3)$$

где τ_0 – период молекулярных колебаний (порядка $(10^{-13} - 10^{-12})$ с); k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура поверхности.

Расчёт времени жизни молекул в соответствии с (3) для температуры 320 К для газов при (12–20) кДж/моль [12], даёт $\tau \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с, а для МОС при $E = 60$ кДж/моль – $\tau > (10^{-3} - 10^{-2})$ с. Следует отметить, что время жизни

молекул МОС в адсорбированном состоянии сравнимо с периодом следования лазерных импульсов в рассматриваемых процессах, из чего следует влияние значения энергии активации десорбции на кинетику выращивания плёнок; можно также сделать вывод, что молекулы МОС вытеснят более лёгкие молекулы газов с поверхности и адсорбируются за время порядка периода следования лазерных импульсов.

На единице поверхности в адсорбированном слое содержится

$$n_s = \theta n_0 \quad (4)$$

молекул. Здесь $n_0 = 1/S$ – концентрация молекул в мономолекулярном слое (при $\theta = 1$), S – площадь, занимаемая молекулой на поверхности. Сразу после лазерного импульса состояние поверхности нельзя считать равновесным, и соотношения между давлением газа и заполнением поверхности молекулами не соответствует изотерме. С течением времени поверхность заполняется адсорбированными молекулами, диффундирующими из газовой фазы, до уровня концентрации, соответствующего равновесному и определённом уравнении изотермы (1). Одновременно идут два процесса [12]:

1. Падение молекул на поверхность; при этом на уже заполненных участках поверхности молекулы не прилипают и скорость заполнения поверхности молекулами пропорциональна

$$v_0(1 - \theta); \quad (5)$$

2. Десорбция молекул с поверхности; скорость «опустошения» поверхности пропорциональна

$$\theta n_0 v \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad v \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = K_{DS}, \quad (6)$$

где K_{DS} – константа скорости десорбции; E – энергия активации десорбции из монослоя.

В выражении (6) $v \approx 10^{10} \text{ с}^{-1}$. Учитывая (5) и (6), получим:

$$\frac{dn_s}{dt} = v_0(1 - \theta) - \theta n_0 v \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (7)$$

Используя (7), получим неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dn_s}{dt} + \frac{n_s}{n_0} v_0 \left(1 + \frac{v n_0}{v_0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)\right) = v_0. \quad (8)$$

Обозначим

$$Z(E) = 1 + \frac{v n_0}{v_0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (9)$$

запишем решение дифференциального уравнения в виде:

$$\frac{n_s}{n_0} = \frac{1}{Z(E)} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0 t}{n_0} Z(E)\right)\right]. \quad (10)$$

Представим реакцию пиролиза в виде:



Каждая молекула исходного реагента до распада занимает площадку S ; после распада молекулы на поверхности остаются A атомов металла M , занимающих поверхность AS_M , где $S_M = d_M^2$ – площадка, занимаемая атомом при кубической упаковке атомов в веществе, а d_M – диаметр атома металла. Один монослой атомов металла на поверхности, при условии полного распада монослоя молекул исходного реагента за один лазерный импульс, образуется за N_1 лазерных импульсов:

$$N_1 = \frac{S}{Ad_M^2 \theta}, \quad (12)$$

толщина монослоя атомов металла равна диаметру атома. Толщина h плёнки металла, образующейся после воздействия N импульсов, равна

$$h = \frac{N}{N_1} d_M = NA\theta d_M^3 / S. \quad (13)$$

В случае использования импульсно-периодического лазерного излучения, в формуле (10), вместо t , необходимо подставить период следования импульсов t_f , и формулу (13) можно представить в виде:

$$h = NAd_M^3 \frac{1}{Z(E)} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0 t_f}{n_0} Z(E)\right) \right] / S, \quad (14)$$

и в нормализованной форме:

$$h' = \frac{hS}{NAd_M^3} = \frac{1}{Z(E)} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_0 t_f}{n_0} Z(E)\right) \right]. \quad (15)$$

Значения энергии физической адсорбции (12–20) кДж/моль являются типичными для инертных газов, азота, кислорода на вольфраме и пористом стекле [14]. В случае адсорбции МОС существенным фактором является неравноценность взаимодействий МОС с поверхностью, обусловленная сложностью молекул. Возможны на одной поверхности адсорбента-металла оба типа взаимодействий в виде и физической, и химической адсорбций. Значение энергии адсорбции определяется типом молекулы: – для углеводородов адсорбция физическая [15] с энергией адсорбции (8–12) кДж/моль на каждый атом углерода. Для физсорбции молекул CH_4 на пористом стекле и пористом угле и молекул C_2H_2 на пористом стекле в работе [14] приведены значения 3,0; 5,0 и 5,3 ккал/моль, соответственно.

В табл. 1 представлены результаты расчётов, выполненных с использованием (2), (9) и (15) для случая адсорбции ацетилена ($M = 0,026$ кг/моль, $M_{\text{Re}} = 0,654$ кг/моль, $T = 300\text{K}$, $S \approx 1,27 \cdot 10^{-20}$ м², $E_{\text{дес}} = 23,2$ кДж/моль)

Таблица 1. Рассчитанные значения нормализованной толщины h' в зависимости от парциального давления паров реагента p и периода следования лазерных импульсов t_f

p , Па	$t_f = 10^{-3}$ с	$t_f = 10^{-4}$ с
1000	0,38	0,38
100	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
10	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
1	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Из данных таблицы следует, что нормализованная толщина (она фактически является коэффициентом заполнения монослоя молекулами в изотерме адсорбции Ленгмюра) не зависит от частоты следования импульсов (в пределах диапазона расчётов), то есть, толщина получающейся в результате пиролиза плёнки углерода пропорциональна частоте импульсов (согласно (15)).

Эти факты свидетельствуют о том, что количество реагентов химических реакций при лазерном пиролизе ограничено «ёмкостью» равномерного по толщине адсорбционного слоя. Реакции во время длительности лазерного импульса сомоостанавливаются ранее прекращения импульса в результате исчерпания реагента.

Таким образом, периодичность лазерно-индуцированного пиролитического процесса и адсорбционно ограниченный подвод реагентов приводят к послойному выращиванию плёнки на подложке, причём толщина каждого слоя менее диаметра атома, толщины всех слоёв одинаковы между собой и равномерны в пределах нагреваемой излучением области подложки.

Процесс во многом похож на атомно-слоевое термохимическое осаждение плёнок (AL CVD), реализуемое в реакционных камерах с дискретной периодической подачей реагентов к поверхности подложки с промежуточной продувкой зоны реакции инертным газом [16].

Важной привлекательной особенностью лазерного атомно-слоевого процесса получения плёнок является локальность лазерного воздействия, что может позволить реализовать атомно-слоевую лазерографию.

Таким образом, получено аналитическое выражение для скорости выращивания тонких плёнок углерода в наносекундном LCVD с учётом параметров процесса и энергии адсорбции углеводородных молекул.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д. В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003.
2. Sutter P. W. et. al. Epitaxial graphene on ruthenium Nature Mat. 7, 406 (2008).
3. N'Diaye A. T. et. al. Structure of epitaxial graphene on Ir(111) New J. Phys. 10, 043033 (2008).
4. "A smarter way to grow graphene". PhysOrg.com. May 2008.
5. Kim, Kuen Soo; et al. (2009). "Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes". Nature 457 (7230): 706.

6. Li, Xuesong; et al. (2009). "Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils". *Science* 324: 1312.
7. Wei Wu^{a,b}, Zhihong Li^b, Luis A. Jaureguic^d, Qingkai Yu^{a,b,*}, Rajeev Pillai^a, Helin Cao^{c,e}, Jiming Bao^b, Yong P. Chen^{c,d,e}, Shin-Shem Pei^{a,b}. Wafer-scale synthesis of graphene by chemical vapor deposition and its application in hydrogen sensing. *Sensors and Actuators B* 150 (2010) 296–300.
8. Wei Liu^a, Choong-Heui Chung^a, Cong-Qin Miao^a, Yan-Jie Wang^b, Bi-Yun Li^a, Ling-Yan Ruan^a, Ketan Patel^b, Young-Ju Park^a, Jason Woo^b, Ya-Hong Xie^a, □ Chemical vapor deposition of large area few layer graphene on Si catalyzed with nickel films. *Thin Solid Films*, 518 (2010) S128–S132.
9. Keun Soo et al. Выращивание больших плёнок графена с топологическим рисунком для проводящих прозрачных электродов. *Nature Letters* (doi:10.1038/nature07719). 2009 Makmillan Publishers Limited.
10. Alfonso Reina,[†] Xiaoting Jia,[†] John Ho,[‡] Daniel Nezich,[§] Hyungbin Son,[‡] Vladimir Bulovic,[‡] Mildred S. Dresselhaus,^{‡,§} and Jing Kong^{*,‡} Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. *Nano Letters*, 2009. Vol. 9, No.1, 30-35.
11. Youngbin Lee,[†] Sukang Bae,[†] Houk Jang,[‡] Sukjae Jang,[†] Shou-En Zhu,[‡] Sung Hyun Sim,[§] Young Il Song, Byung Hee Hong,^{†,§,*} and Jong-Hyun Ahn^{†,‡,*} Wafer-Scale Synthesis and Transfer of Graphene Films DOI: 10.1021/nl903272n | *Nano Lett.* 2010, 10, 490-493.
12. Мелвин-Хьюз, Э. А. Физическая химия / Э.А. Мелвин-Хьюз. – М.: Изд. иностр. лит., 1962. – 1148 с.
13. Ролдугин, В. И. Физикохимия поверхности: учебник – монография / В.И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.
14. Черепнин, Н.В. Сорбционные явления в вакуумной технике / Н.В. Черепнин. – М.: Советское Радио, 1973. – 384 с.
15. Осаждение плёнок и покрытий разложением металлоорганических соединений / Б. Г. Грибов и др. – М.: Наука, 1981.
16. Киреев, В.Ю. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы / В.Ю. Киреев, А.А. Столяров. – М.: Техносфера, 2006. – 192 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, С.Л. Шергин, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУР МЕТОДОМ LCVD

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер кафедры физики, тел. (383)361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

Представлена предварительная двумерная модель формирования поверхностных и объёмных микроструктур методом LCVD, учитывающая индуцированную лазерным облучением миграцию осаждающегося вещества вдоль поверхности подложки. Этот процесс может происходить под действием атомного пара, сил поверхностного натяжения и под влиянием диффузионных поверхностных процессов в условиях поверхностного градиента температур.

Ключевые слова: ЛПФХО, микроструктура, атомный пар, силы поверхностного натяжения, поверхностная диффузия, градиент температур.

THE INVESTIGATION OF SURFACE TENSION FORCE INFLUENCE ON PROCESS OF MICROSTRUCTURE FORMATION BY LCVD METHOD

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), engineer of Physics department, (383) 361-08-36, e-mail: denlnsk@mail.ru

2D-model of planar and 3D microstructures formation by LCVD method is presented. The laser induced migration of deposited substance alongside of substrate is allowed in this model. Described process can be result of atomic fume and surface tension force influence or surface diffusion effect, induced by temperature surface gradient.

Key words: LCVD, microstructure, atomic fume, surface tension force, surface diffusion, temperature gradient.

Рассматриваемые в настоящей публикации результаты получены в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» (Код проекта: 2.1.2/13668). Уточняется модель образования на поверхности подложек плёночных топологических структур с использованием лазерно-пироли-тического осаждения слоёв металлов, предложенная в работе [1]. Ранее [1] авторами процессы, происходящие на поверхности подложки и в газовой фазе при термическом воздействии лазерного излучения, рассматривались в рамках одномерной модели: считалось, что размер облучаемой области велик в сравнении с толщиной приповерхностного слоя атмосферы, в которой происходят лазерно-индуцируемые процессы. В соответствии с моделью учитывались эффекты десорбции реагентов и газообразных продуктов лазерно-индуцированной пиролитической реакции с облучаемой поверхности в течение наносекундного времени облучения, нагревание приповерхностного слоя атмосферы и образование распространяющейся от подложки волны высокого давления, рассматривались условия образования ударных волн в атмосфере.

В настоящей работе представлены предварительные результаты по созданию двумерной модели лазерно-пиролитического получения плёночных осадков, в которой, в отличие от работы [1], дополнительно учитываются процессы распространения продуктов реакции, в том числе, по направлениям вдоль поверхности. Учитывается локальность воздействия излучения на поверхность: газовая волна на расстоянии от центра порядка нескольких радиусов области облучения имеет полусферическую форму, то есть, имеет составляющую вдоль поверхности, содержит пары реагента и атомный пар металла, образовавшегося при диссоциации молекул химического соединения в газовой фазе. При высокой интенсивности излучения имеется возможность плавления конденсированных слоёв. Образовавшаяся у поверхности волна давления распространяется от подложки и оказывает обратное действие на поверхность, выдавливая вдоль поверхности расплавленные продукты реакции от центра облучаемой области наружу в соответствии с двухфазной моделью [3-6]. Если процесс идёт при близком к атмосферному давлении газовой среды, то существенная часть продукта в виде атомного пара находится в атмосфере и уносится от места образования газовыми потоками. Другая доля образовавшихся атомов металла конденсируется на подложке и может нагреваться излучением при наносекундной длительности импульса до температуры, сравнимой или большей температуры плавления [1], поэтому при формировании структур необходимо учитывать возможность проявления сил поверхностного натяжения расплавленного металла. Действие сил поверхностного натяжения может быть двояким: - при формировании объёмных наноразмерных структур плавление металла приводит к возможной деформации структур; - плавление плёночных островковых образований на подложке может приводить к течению расплава по поверхности и, в зависимости от величин краевого угла между поверхностями расплава и

подложки, приводить к растеканию по поверхности или к собиранию расплава в капли и уменьшению размера их проекции на подложку, то есть, к увеличению разрешающей способности технологического процесса [2].

При формировании двумерной модели необходимо также рассматривать процессы движения пиролитически осаждённого на подложке вещества, вызванные поверхностными градиентами температуры, которые при лазерном воздействии сфокусированным лучом могут достигать в импульсе значений 10^{10} К/м.

В известной литературе приведены результаты исследований процессов абляции тонких плёнок металла, приводящих также к перемещению вещества вдоль поверхности подложки [3-6].

В работе [3] представлен анализ процесса абляции тонкой металлической плёнки локальным облучением лазерным импульсом; при этом по периметру облучаемой зоны образуется валик из вынесенного из средней области вещества. Движение вещества разрушающейся под действием лазерного облучения плёнки на подложке в фокальном пятне объясняется двухфазной моделью [4-6], которая позволяет оценивать эффекты выноса вещества из облучаемой зоны. Причиной движения расплава является давление отдачи его паров, равное половине давления насыщенного пара металла, определяемое уравнением Клаузиуса – Клапейрона:

$$p_T = p_a \frac{T}{T_0} \exp \left[\frac{L_E M}{RT_0} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right], \quad (1)$$

где T_0 – температура, при которой давление пара равно известной величине p_a ; L_E – теплота испарения материала; M – молярная масса вещества плёнки; R – универсальная газовая постоянная. Необходимо учитывать противодействие сил поверхностного натяжения расплава, создающих давление, определяемое формулой, получаемой из уравнения Лапласа [7, 8]:

$$p_\sigma = \sigma / h, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава, h – толщина плёнки расплава на границе зоны облучения, и давление насыщенного пара расплава.

Значение критического давления, при котором возникает выдавливание расплава из нагретой области, равно:

$$p_{st} = p_T / 2 = p_\sigma. \quad (3)$$

Численный расчёт [6] показал, что пока с ростом температуры давление p_{st} отдачи паров не станет превышать начальное поверхностное давление, обусловленное поверхностным натяжением в плёнке, вытеснение расплава не начинается; имеет место существенное запаздывание начала движения расплава от момента начала облучения.

Начальная скорость движения расплава при мощных коротких лазерных импульсах определяется уравнением [6]:

$$\omega_L \approx \frac{2 \langle p_{st} \rangle t}{\rho \ell_L} \quad (4)$$

где $\langle p_{st} \rangle$ – усреднённое за период времени t значение $p_{st} = p_T / 2$; $\langle h \rangle$ – усреднённое за период времени t значение h ; ρ – плотность расплава; ℓ_L – средняя по всем направлениям длина пути расплава (для пятна расплава в виде круга ℓ_L равна его радиусу r); ω_L – составляющая скорости движения расплава вдоль подложки.

В отличие от рассматриваемого в [3-6] случая локальной абляции металлической плёнки, при котором давление пара определяется испарением металла, при лазерно-пиролитическом получении плёнок давление в приповерхностном слое атмосферы определяется десорбцией с нагреваемой поверхности реагентов и продуктов реакции пиролиза, причём при пиролизе распад молекулы МОС приводит к появлению до 10 новых молекул и соответствующему увеличению давления в газе; давление увеличивается также вследствие увеличения температуры приповерхностного слоя атмосферы [1]. Увеличение температуры плёнки металла до его испарения дополнительно увеличит общее давление в приповерхностном слое.

Приращение давления в приповерхностном слое при лазерном облучении, обусловленное десорбцией молекул и нагреванием атмосферы, определяется формулой [1]:

$$\Delta p = p_0 \frac{\Delta T}{T_0} + \frac{qk\Delta T}{s_0 d} \quad (5)$$

где p_0 – начальное давление атмосферы; T_0 – начальная температура атмосферы; ΔT – приращение температуры, индуцированное лазерным импульсом; q – число образовавшихся при диссоциации молекулы реагента молекул газообразных продуктов; k – постоянная Больцмана; s_0 – площадь на поверхности, занимаемая молекулой реагента при их плотной упаковке в мономолекулярном адсорбированном слое; d – толщина приповерхностного слоя газа, определяемая как расстояние, на которое при диффузионном движении молекула отойдёт от поверхности за время лазерного импульса (примерно равная в нашем случае средней длине свободного пробега молекул в газе). В этом уравнении первый член правой части отражает давление окружающей атмосферы, температура которой определяется лазерным нагреванием подложки, второй член – давлением газообразных продуктов реакции в предположении, что реагенты адсорбированы в виде одного мономолекулярного слоя.

При температуре испарения металлического осадка выражение для давления включает давление насыщенного пара металла. С учётом (1) имеем:

$$p = \Delta p + p_T. \quad (6)$$

Давление p_{st} начала выдавливания расплава из области облучения определится, с учётом (3), уравнением:

$$p_{st} = p_{\sigma} = p / 2 \quad (7)$$

Последнее уравнение позволяет оценить интенсивность и роль процессов в газовой фазе, индуцированных лазерными импульсами.

Рассмотрим эффекты, возникающие при использовании излучения различного уровня интенсивности на примере получения платиновых микроструктур.

1. Импульсное излучение индуцирует температуру 700–1000 К на подложке, соответствующую интенсивному разложению паров исходного соединения платины $\text{Pt}(\text{ГФА})_2$; температура меньше температуры плавления платины.

При оптимальных парциальном давлении паров реагента и температуре подогрева подложки на ней образуется топологический рисунок из металла, и при продолжении облучения плёнка рисунка продолжает утолщаться, диссоциация молекул реагента в газовой фазе незначительна [1].

2. Импульсная температура на подложке в диапазоне 1100–1500 К. Увеличивается интенсивность процесса диссоциации молекул реагента в газовой фазе с образованием атомного пара; давление в приповерхностной области подложки в импульсе достигает 10 атм., возникает ударная волна, распространяющаяся со скоростью порядка 500–800 м/с, и газовый поток со скоростью до 400 м/с. Ударная волна и интенсивные газовые потоки затухают на расстоянии от границ облучаемой области порядка нескольких мкм [1]. Атомный пар газовыми потоками переносится вдоль поверхности подложки и может конденсироваться на её поверхности, в том числе, на соседних топологических структурах.

3. Импульсная температура на подложке индуцирует начало плавления образующейся плёнки платины ($\approx 1750^\circ\text{C}$).

В периоды времени между импульсами металл затвердевает. Плавление может приводить к грануляции металла под действием сил поверхностного натяжения. Перенос атомного пара газовыми потоками продолжается. Давление на расплав определяется без учёта давления паров металла, расчёт по уравнению (5) даёт значение давления $\Delta p = 4,6 \cdot 10^6$ Па.

Количественная оценка даёт для расплава платины толщиной 100 нм и поверхностным натяжением $\sigma = 1,8$ Н/м значение критического давления, при котором возникает выдавливание расплава из нагретой области, в соответствии с (2) и (3) равное $p_{st} = 1,8 \cdot 10^7$ Па; давления продуктов реакции недостаточно для выдавливания расплава.

4. Излучение индуцирует температуру на подложке, равную или превышающую температуру кипения конденсированных слоёв.

Можно найти, что давления продуктов реакции без учёта давления паров расплава недостаточно для выдавливания расплава при температуре, равной его температуре кипения, поэтому при этой температуре выносимый из облучаемой зоны материал содержит только атомный пар металла. В соответствии с расчётом, необходимое для выдавливания металла давление p_T насыщенного пара металла может быть получено из (1) при температуре расплава $T = 8600$ К, большей температуры кипения в 1,8 раза. Уменьшение толщины слоя расплава до 10 нм требует для его выдавливания паром нагревания до $T = 11000$ К, расплав выдавливается параллельно поверхности подложки. Скорость

выдавленного металла может быть определена по формуле (4). При диаметре фокального пятна излучения 1 мкм и температуре в нём, в 2 раза превышающей температуру кипения $T_{кип} = 4773$ К, и при длительности лазерного импульса 6 нс скорость может достигать значения $\omega_L \approx 70$ м/с.

На фотографии рис. 1 показана полученная Резниковой Е.Ф. методом наносекундного LCVD в условиях атмосферного давления структура в виде расположенного по краю облучаемого участка «частокола» из стоящих вертикально узких полосок металла платины высотой до 5–8 мкм [1].

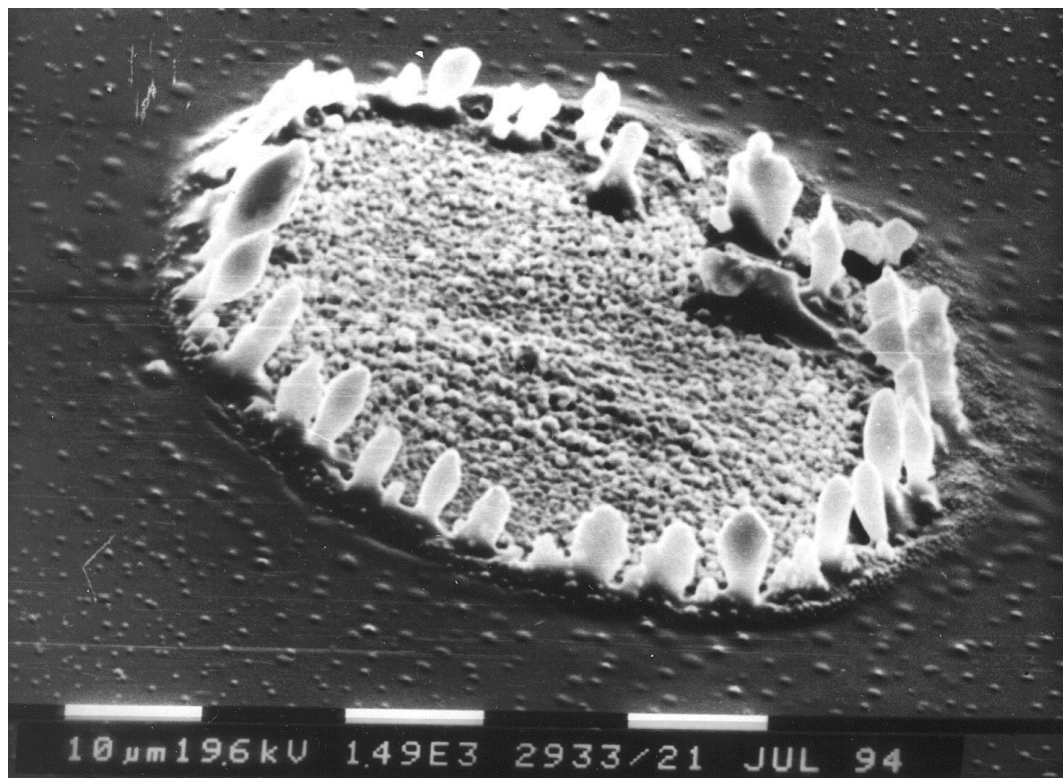


Рис. 1. СЭМ-фотография осадка платины, полученного в лазерно-пиролитическом процессе. Угол наблюдения 45°

Лазерно-индуцированная температура в центре облучаемого пятна на рис. 1 при плотности лазерной импульсной мощности $5 \cdot 10^7$ Вт/см² оценивается величиной, близкой температуре кипения платины, осаждение ведётся в парах соединения $Pt(ГФА)_2$. В этих условиях исключается влияние выдавливания конденсированного и затем испарённого металла на распределение осадка, высокие лепестки могут образоваться только в результате конденсации атомного пара металла, перенесённого из зоны пиролиза газовыми потоками и образовавшимся в атмосфере в газофазной реакции пиролиза, на каких либо зародышах на поверхности подложки. Фотография иллюстрирует процессы, соответствующие предполагаемым при нагревании осадка до температур, меньших температуры кипения.

Проведение лазерного осаждения топологических структур при температуре их плавления приводит к перераспределению осаждённого металла

в пределах области осаждения под влиянием поверхностного натяжения расплава. Поверхность осаждаемых структурных элементов при наличии адгезии металла к подложке принимает выпуклую форму, конфигурация элемента в плане, в основном, сохраняется. Образующаяся каплевидная структура может растекаться по подложке. Движущей силой растекания принято считать величину [9,10]:

$$\Delta\sigma = \sigma_{lv} (\cos \theta_0 - \cos \theta_d), \quad (8)$$

где σ_{lv} – поверхностная энергия границы «жидкость – воздух», θ_0 – равновесный краевой угол, θ_d – краевой угол в данный момент. Скорость движения края растекания связана с переносом молекул из объёма жидкости на твёрдую подложку и определяется выражением:

$$v_{кр} \propto \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (9)$$

где ΔE – энергия активации (энергия преодоления потенциального барьера при переходе молекул на подложку). Эта энергия по порядку величины равна 100 кДж/моль. Предполагается, что вслед за перемещением края наступает перемещение объёма жидкости; на первом этапе перемещения можно пренебречь потерями на вязкость и можно считать движение инерционным, величина радиуса круговой площади контакта зависит от времени t :

$$R_{sl}^2 \approx \left(\frac{\pi \Delta \sigma R_0}{\rho_l}\right)^{1/2} t, \quad (10)$$

где R_0 – радиус кривизны капли в начальный момент, ρ_l – плотность расплава.

В случае малой адгезии плёнки осаждающегося металла и подложки ($\theta_0 \approx 180^\circ$) поверхностное натяжение расплава превращает тонкоплёночный элемент структуры дисковой формы в шарик радиусом:

$$R = \left(\frac{3}{4} r^2 h\right)^{1/3}, \quad (11)$$

где r и h – радиус и толщина дискового элемента. При толщине плёнки 10 нм и радиусе 250 нм получим $R \approx 75$ нм.

В случае существования на поверхности подложки и в расплавленном слое градиента температур, вызванного локальным лазерным облучением подложки, возможно течение расплавленного слоя, направленное по градиенту температуры [9,11].

Рассмотрим тонкую плёнку на подложке, вдоль которой температура изменяется по линейному закону $T = T_0 + z \nabla_z T$, где градиент температуры поддерживается постоянным. Причиной является уменьшение поверхностного натяжения с ростом температуры, в результате на поверхности жидкости действуют нескомпенсированные напряжения

$$\Pi_T = \frac{\partial \sigma}{\partial z}, \quad (12)$$

которые вызовут движение поверхностного слоя жидкости в более холодную область. Средняя скорость движения слоя жидкости равна

$$\langle u(x) \rangle = \frac{1}{\eta_l} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \nabla_z T \frac{h}{2}, \quad (13)$$

где η_l – вязкость расплава, h – толщина слоя расплава.

В ходе настоящего исследования проведены эксперименты по абляции тонкой алюминиевой плёнки, нанесённой на стеклянную подложку, излучением азотного лазера с мощностью в импульсе 5 кВт, длительностью импульса 6 нс. Лазерный пучок фокусировался в пятно диаметром 10 мкм, в центре пятна плотность падающей мощности $5 \cdot 10^9$ Вт/см², толщина плёнки 0,1 мкм, расчётная температура $3,3 \cdot 10^5$ К. На рис. 2 показана фотография на сканирующем микроскопе участка плёнки, подвергнутого лазерному облучению.

На стеклянную подложку с плёнкой проецировалось уменьшенное изображение в лазерных лучах прозрачного трафарета с непрозрачными круглыми участками; изображения непрозрачных областей трафарета на снимке видны в виде двух кругов диаметром 6 мкм с кольцевыми валиками по периметрам. Окружающие эти круги области плёнки облучались; в указанных областях видны каплевидные образования диаметром 1–2 мкм и высотой до 1 мкм; ширина валиков порядка 0,5–1,0 мкм. Фотография подтверждает двухфазную модель абляции тонких плёнок при лазерном облучении.

На рис. 3 приведены электронные фотографии плёночных структур, так же полученных лазерной абляцией; трафарет имел форму непрозрачной полосы, её изображение имеет ширину 3 мкм. На рис. 3,б видны пересекающие полосу валики шириной до 0,3 мкм, являющиеся каплями металла. Снимки иллюстрируют влияние переноса вещества вдоль поверхности подложки на формирование структур и свидетельствуют о необходимости учёта в двумерной модели пиролитического формирования топологических структур этого эффекта.



Рис. 2. СЭМ снимок области алюминиевой плёнки, подвергнутой лазерному облучению

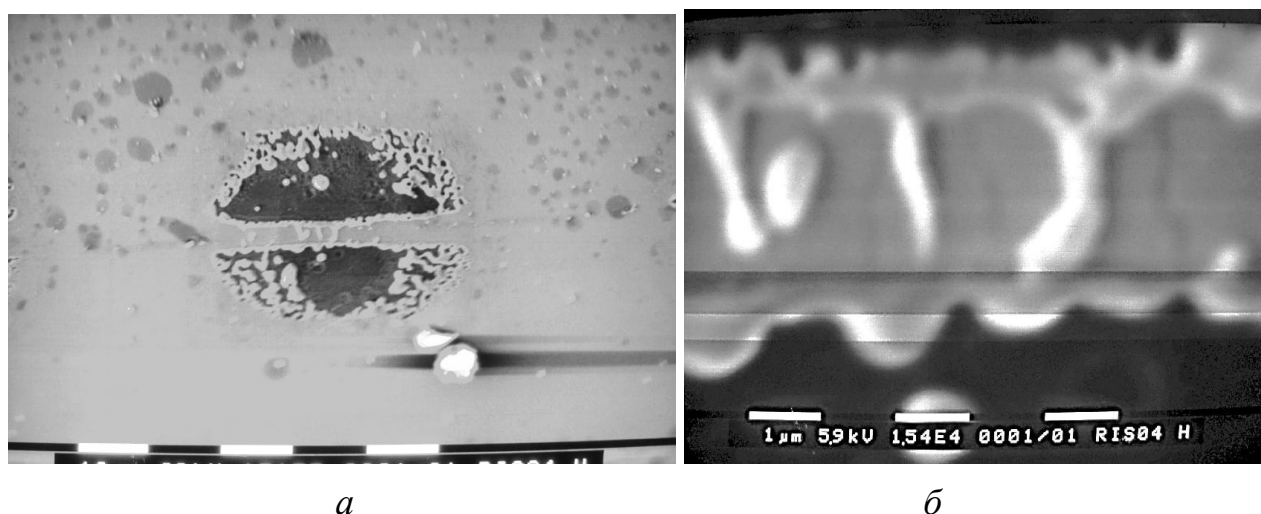


Рис. 3. СЭМ фотография облучённой области плёнки алюминия на стеклянной подложке через трафарет в виде непрозрачной полосы

Рассмотрены вопросы создания двумерной модели лазерно-пиролитического формирования топологических структур. Показано, что такая модель должна включать анализ двумерных процессов в газовой фазе, влияние возникающих давлений на течение в расплаве осаждаемой плёнки, определение распределения температуры на подложке и осаждаемых плёнках и градиентов температур, исследование влияния сил поверхностного натяжения и градиентов этих сил на распределение осаждаемого вещества, и др.

Актуальность создания двумерной модели лазерно-пиролитического формирования топологических структур на подложках определяется

возможностью создания технологии одностадийного получения микро- и наноструктур современных электронных приборов, решения задачи создания новых оптико-электронных приборов типа сверхбыстродействующих диодов Шоттки, структур типа квантовых точек, и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков, В.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / В.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова, Д.В. Чесноков; под общ. ред. Д. В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003.
2. Чесноков, Д.В. Лазерное формирование наноразмерных структур / Д.В. Чесноков, В.В. Чесноков // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т.52, № 6. – С.69-74.
3. Balandin V. Yu., Niedrig R., Bostanjoglo. // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 77, N 1. – Pp. 135 -142.
4. Вейко, В.П. Двухфазная модель разрушения поглощающих плёнок мощными световыми импульсами / В.П. Вейко, А.И. Кайданов, Е.Б. Яковлев // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 1. – С.34-41.
5. Вейко, В.П. Лазерная обработка плёночных элементов / В.П. Вейко. – Л.: Машиностроение, 1986.
6. Арутюнян, Р.В. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов. – М.: Наука, 1989.
7. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика: учеб. пособие для вузов / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1990. – 592 с.
8. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т.1. Механика: учеб. пособие для вузов / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1989. – 576 с.
9. Ролдугин, В. И. Физикохимия поверхности: учебник – монография / В.И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.
10. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976.
11. Чураев, Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. – М.: Химия, 1990.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Д.В. Кочкарев, 2012

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА СУБПИКСЕЛЬНОГО МИКРОСКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)-361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Приведены краткая теория и результаты расчёта микромеханического сканера субпиксельного микросканирования, представляющего собой одномерную матрицу управляемых электростатически микрозеркал.

Ключевые слова: микромеханика, субпиксельное микросканирование, микрозеркало.

MICROMECHANICAL SUBPIXEL MICROSCANNING DEVICES FOR IR SPECTRUM RANGE

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Micromechanical subpixel scanner to represent 1D matrix of electrostatically driving micromirrors. Brief theory and design calculation of one are presented.

Key words: micromechanic, subpixel microscanner, micromirror.

В настоящей публикации приводится описание конструкции и технологических принципов изготовления микромеханического устройства субпиксельного микросканирования ИК-диапазона спектра для систем тепловидения, способных работать в жёстких условиях окружающей среды. Микросканирование является известным [4] простым способом существенного улучшения параметров матричных приёмников излучения - повышает геометрическое разрешение приёмников без увеличения количества элементов в матрице и при сохранении формата матрицы приёмника и размера углового поля приёма изображения.

Отечественные существующие устройства такого же функционального назначения – однокоординатные оптические дефлекторы с пьезокерамическим

приводом – представляют собой собираемые из узлов и деталей механические конструкции, имеющие значительные массо-габаритные характеристики (НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань). В зарубежных микросканерах используется вращаемый специальным микродвигателем обтюратор (фирмы *BAE Systems Infra-Red Ltd.*, Великобритания, и *AEG Infracot-Module GmbH*, Германия).

Современное состояние разработок микромеханических устройств оптического назначения рассмотрено, например, в обзорной статье [3]. В данной публикации обсуждается микрозеркальный сканер, основанный на эффекте электростатического наката гибкой зеркальной обкладки конденсатора с клиновым зазором между обкладками на вторую обкладку [1]. На рис. 1 схематически показана конструкция микромеханического сканера.

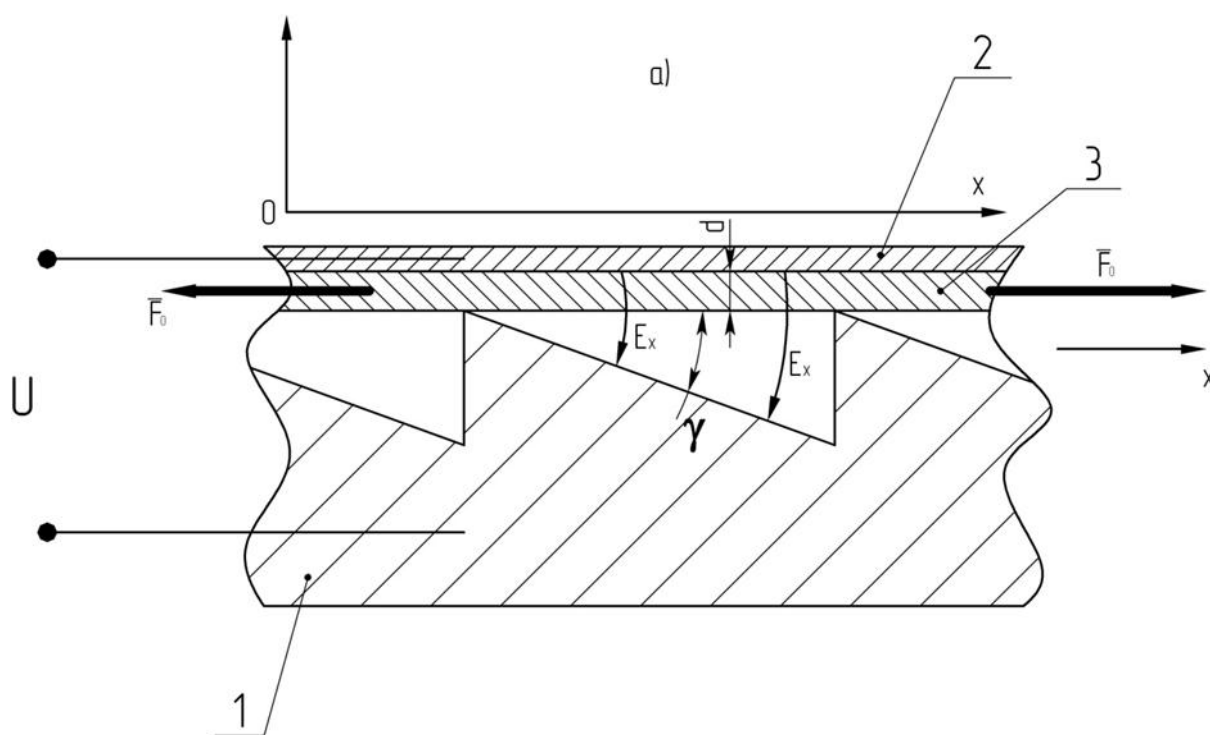


Рис. 1. Схема конструкции микромеханического сканера

На кремниевую профилированную подложку со стороны профилирования вплотную к вершинам выступов наложена тонкая металлизированная мембрана, являющаяся зеркалом дефлектора. При подаче разности потенциалов между подложкой и слоем металлизации на мембране её участки электростатическими силами втягиваются в углубления профиля и занимают место на плоских участках наклонной части рельефа (рис.2); плоское зеркало при этом разделяется на множество микрозеркал, имеющих одинаковые углы наклона относительно первоначального положения мембраны. Угол отражения света, падающего на сканер, при подаче напряжения изменяется на $\alpha = 2\gamma_0$, где γ_0 – угол наклона участков профиля.

При снятии напряжения плоскостность мембраны восстанавливается. При требуемом угле сканирования порядка 1 угл. мин. глубина рельефа при его периодичности 0,1–0,5 мм лежит в нанометровом диапазоне размеров и равна 30–150 нм. Получение подобного наноразмерного профиля по всей поверхности подложки площадью до десятков квадратных сантиметров решается с использованием технологии анизотропного травления монокристаллического кремния.

На рис. 2 показана диаграмма электрических полей и сил, приводящих мембрану в действие. На рисунке поперечного сечения структуры: 1 – профилированная кремниевая пластина, 2 – металлизация мембраны 3, γ_0 – угол профиля кремниевой пластины, E_x – силовые линии электрического поля, возникающего при включении электрического напряжения U между металлизацией мембраны и поверхностью профиля пластины, $\bar{F}_0$ – сила натяжения мембраны, Ox – координатная ось, d – толщина мембраны, $\bar{F}_e$ – электростатическая сила, прижимающая мембрану к подложке, $\bar{F}_p$ – проекция силы натяжения мембраны на направление силы $\bar{F}_e$.

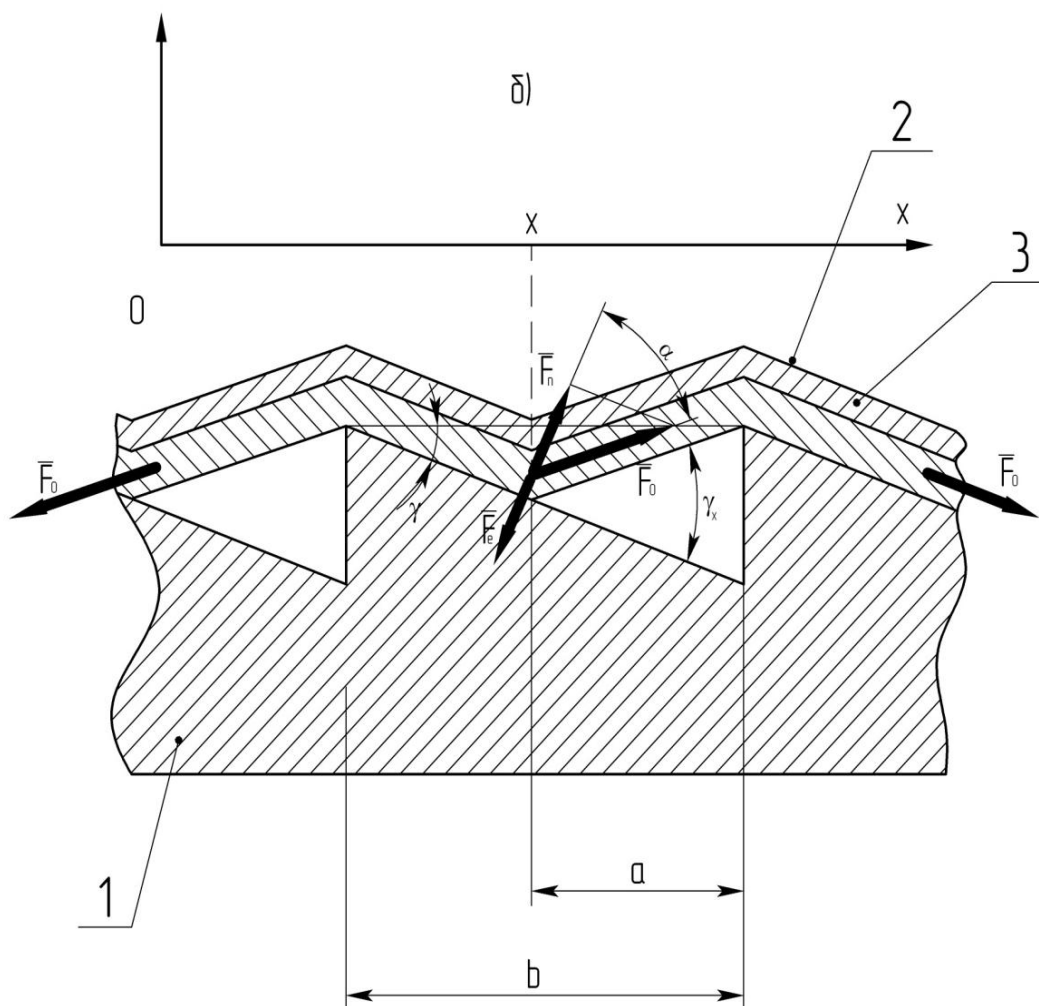


Рис. 2. Диаграмма электрических полей и сил, приводящих мембрану в действие

При выводе расчётных соотношений считаем мембрану гибкой, не имеющей механической жесткости, угол γ малым; принимаем форму силовой линии электрического поля между мембраной и наклонной плоскостью профиля частью окружности с центром в месте касания мембраны и наклонной плоскости; участок силовой линии в мембране считаем прямолинейным. При этих допущениях сила dF , действующая на бесконечно малый участок dx длины мембраны, имеющий единичную ширину, в точке координатой x , равна [2]:

$$dF = \frac{\varepsilon_0 E_x^2 dx}{2} = \frac{\varepsilon_0 U^2 dx}{2 \left(\frac{d}{\varepsilon} + \gamma_x x \right)^2}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость мембраны, E_x – напряжённость электрического поля на внутренней поверхности слоя металлизации мембраны; γ_x – угол между поверхностью наклонного участка подложки и мембраной в точке с координатой x ; остальные величины приведены в объяснениях к рис. 2. Интеграл уравнения (1) табличный, после преобразований получим:

$$F = \frac{\varepsilon_0 U^2}{2} \int_0^x \frac{dx}{\left(d / \varepsilon + \gamma_x x \right)^2} = \frac{\varepsilon_0 U^2}{2 \gamma_x} \left(\frac{1}{d / \varepsilon} - \frac{1}{d / \varepsilon + \gamma_x x} \right). \quad (2)$$

В полученном выражении первый член в скобке отражает силу притяжения мембраны к подложке на единицу ширины при бесконечной длине клинового зазора ($x \rightarrow \infty$), второй член – силу притяжения, начиная с координаты x и до бесконечности. Участок мембраны, лежащий на поверхности наклонной грани рельефа без зазора, прижимается к ней с силой на единицу ширины [2]

$$F_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U^2 s}{d^2}, \quad (3)$$

где s – длина участка.

При включении напряжения U точка начала клинового зазора под действием силы F смещается по наклонной поверхности вправо (рис. 2,б), величина силы для любых положений точки начала зазора вычисляется по уравнению (2). Натяжение мембраны силой $\bar{F}_0$, как видно из рис.2,б, препятствует смещению начальной точки; однако, в области клинового зазора сила притяжения мембраны к подложке направлена перпендикулярно натяжению мембраны и не может препятствовать действию силы натяжения. В первом приближении можно считать, что действие силы натяжения приложено в области перегиба мембраны к площадке наклонной поверхности подложки, длина которой $s = d / \sin \gamma_x$; в этой области сила $\bar{F}_e$ притяжения мембраны к подложке направлена к подложке и вычисляется по (3), проекция силы натяжения мембраны на указанное направление $F_p = F_0 \sin \gamma_x$, где $F_0 = \sigma d$, σ – механическое напряжение в мембране. Когда $\bar{F}_e = \bar{F}_p$, мембрана занимает равновесное положение, и можно записать:

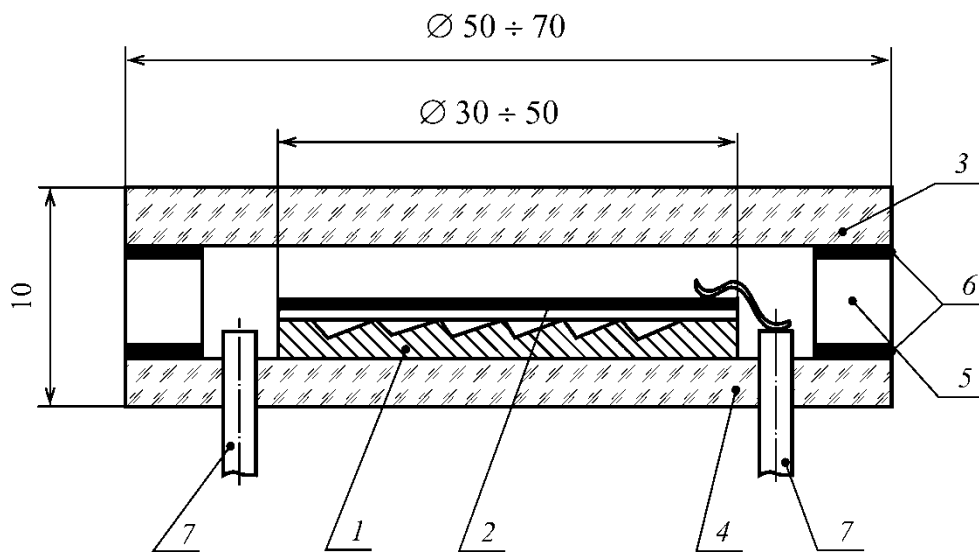
$$\sigma d \sin \gamma_x = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2d \sin \gamma_x} \Rightarrow U = d \sin \gamma_x \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}}. \quad (4)$$

Рассматривая на рис.2,а треугольники с углами при вершинах γ и γ_x и одним основанием, учитывая малость углов, можно написать приблизительное соотношение:

$$\gamma_x \approx \frac{b}{a} \gamma \quad (5)$$

Преобразуем правую часть (4):

$$U = d \sin \left(\frac{b}{a} \gamma \right) \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}}. \quad (6)$$



1 – профилированная кремниевая подложка; 2 – металлизированная мембрана; 3 – входное оптическое окно; 4 – стеклянная пластина; 5 – распорное кольцо корпуса; 6 – индиевое уплотнение; 7 – выводы электрические

Рис. 3. Оптический микросканер в корпусе

Полагая в уравнении (6) $b/a = 10$, $\gamma = 3 \cdot 10^{-4}$, $d = 0,25$ мкм, $\sigma = 10^6$ Па, $\varepsilon = 3$, получим: $U \approx 0,15$ В.

На рис. 3 схематически показан оптический микросканер в корпусе, представляющем собой две параллельные соединённые вакуумплотно по периметру прозрачные для излучения пластины. Вакуумирование корпуса необходимо для исключения влияния упругости атмосферы на перемещение мембраны.

На рис. 4 показана оптическая схема тепловизионного приёмника изображения с зеркально-линзовой оптической системой, где в качестве зеркала схемы применён субпиксельный микросканер. На рисунке: 1 – микросканер, 2 – матрица приёмника, h – сдвиг изображения в плоскости матрицы при срабатывании микросканера и повороте его зеркал на угол $\gamma = \Delta\alpha / 2$.

Пластина микромеханического сканера устанавливается в качестве зеркала 1 на расстоянии a от плоскости формирования изображения сферическим или параболическим зеркалом L_1 . Линза L_2 формирует вторичное изображение в плоскости теплоприёмной матрицы 2. При работе сканера изображение в плоскости теплоприёмной матрицы периодически смещается на величину h . Чувствительный элемент пиксела матрицы занимает часть площади пиксела, и при смещении изображения на чувствительный элемент попадает то одна, то другая часть изображения. Если значение h равно половине размера пиксела, то разрешение матрицы по направлению отклонения изображения увеличивается вдвое.

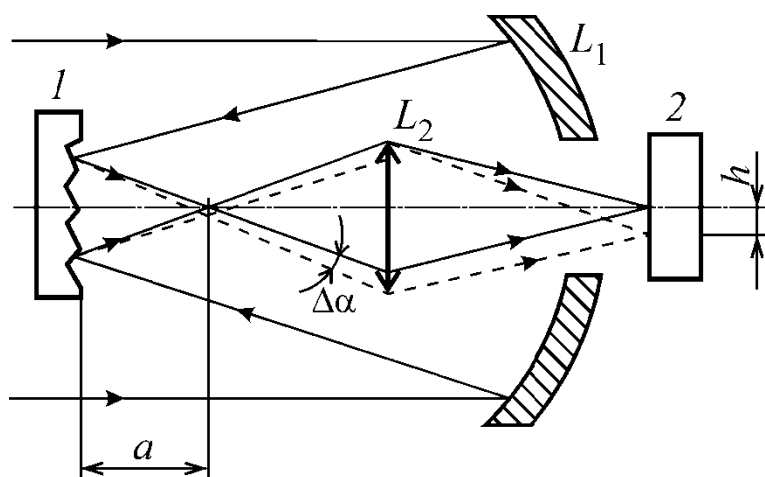


Рис. 4. Оптическая схема зеркально-линзового тепловизионного приемника изображения со встроенным микросканером субпиксельного сканирования

Расчёты показывают возможность создания микросканера с диаметром активной области до 30–50 мм, временем переключения до десятков микросекунд при фиксированном угле сканирования порядка 1–10 угловых минут, управляющем напряжении доли – единицы вольт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В.В. Электростатическое реле // А.с. 314304 СССР, МКИ Н 03 К 17/52.- № 1395318; Заяв. 2.02.70; Оpubл. 7.09.71, Бюл. № 27.- 2с.: ил.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Электричество: учеб. пособие / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1983. – 688 с.
3. Косцов, Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики / Э.Г. Косцов // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 3. – С.3–52.
4. Резник А.Л. Повышение пространственного разрешения цифровых изображений сигналов с помощью регулируемого субпиксельного сканирования / А.Л. Резник, В.М. Ефимов // Микросистемная техника. – 2003, №8. – С.20-25.

РАЗРАБОТКА МОЭМС В СГГА

Владимир Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, тел. (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Дмитрий Владимирович Чесноков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой наносистем и оплотехники, тел. (383)-361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Приведены краткая история и особенности разработки микро-опто-электро-механических систем (МОЭМС) в Лаборатории физических и образовательных проблем микротехнологий (ФОПМ) Сибирской государственной геодезической академии (СГГА).

Ключевые слова: микромеханика, МОЭМС.

MOEMS DEVELOPMENT IN SSGA

Vladimir V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Physics department, (383)-361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

Dmitry V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Nanosystems and optical engineering department, (383) 361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

Brief history and features of Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems (MOEMS) development in Laboratory of Physical and Educational Problems of Microtechnologies of Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) is presented.

Key words: micromechanics, MOEMS.

В данном сообщении рассмотрены физические модели и основы теории функционирования микромеханических оптоэлектронных преобразователей. Теоретически и экспериментально исследовались тонкоплёночные устройства с бегущими в микроволноводах упругими волнами, выполняющие функции перестраиваемых дифракционных решёток (в случае изгибных волн) или оптических дефлекторов и сканеров (в случае крутильных волн). Представлены также тонкоплёночные микрозеркальные устройства субпиксельного микросканирования; тонкоплёночные оптические затворы с субнаносекундным быстродействием, предназначенные для защиты от повреждающего лазерного излучения; технологии получения наноразмерных регулируемых воздушных промежутков между поверхностями площадью до единиц квадратных

сантиметров и оптические интерференционные электрически перестраиваемые фильтры на их основе.

Исследования по созданию микросистем интенсивно развиваются в различных странах. Первой отечественной работой, видимо, являлись разработки Дятлова В.Л. с сотрудниками в 60-70-х годах прошлого века в области плёночной электромеханики [1]. Современное состояние разработок микромеханических устройств оптического назначения рассмотрено, например, в обзорной статье [3].

Наши работы велись в области исследования плёночных микроэлектромеханических устройств оптического применения, начиная с 1970 г., среди полученных тогда результатов можно указать формулирование принципа электростатического наката плёночных электродов [2], разработку физической модели мембранных тонкоплёночных модуляторов света [4]; позже выполнены разработки физической модели и лабораторной технологии микрозеркальных магнитоуправляемых дефлекторов света [5], и др. В последние годы разработан плёночный оптический затвор с субнаносекундным быстродействием для защиты от повреждающих импульсов лазерного излучения [6], исследуются технологии получения наноразмерных (до 50–300 нм) регулируемых воздушных промежутков между поверхностями площадью до единиц см^2 и оптические интерференционные электрически перестраиваемые фильтры на их основе [7].

В настоящее время изучаются возможности использования взаимодействия медленных упругих волн в тонкоплёночных мембранах со световыми потоками для создания функциональных элементов оптики и оптоэлектроники [8].

Основным элементом тонкоплёночных устройств на медленных упругих волнах являются акустические микроволноводы (проводники упругих волн) в виде тонкоплёночных одиночных микробалок, закреплённых концами, или массивов таких микробалок, расположенных над поверхностью подложек с зазором порядка доли длины световой волны. Размеры микробалок характеризуются площадью их сечения 1–10 мкм^2 . Акустические волны могут возбуждаться модулированным световым лучом, падающим на плёночную структуру, или возбуждаются одним из электрофизических методов (электростатическим, пьезоэлектрическим), и вносят фазовые сдвиги в отражённое или проходящее световое излучение, искажая тем самым фронт световой волны. Упругая бегущая изгибаемая волна в микроволноводе может распространяться с фазовой скоростью десятки – сотни метров в секунду, в десятки раз медленнее поверхностной акустической волны; длина упругой волны (10–100) мкм , что позволяет ей взаимодействовать с оптическим излучением в диапазонах от видимого до дальнего ИК.

Для разрабатываемых микромеханических устройств, использующих бегущие или стоячие упругие волны в волноводах, может оказаться приемлемой единая базовая акустоактивная среда в виде массива установленных на плоской подложке параллельно ей тонкоплёночных полосковых микромеханических акустических волноводов (рис. 1).

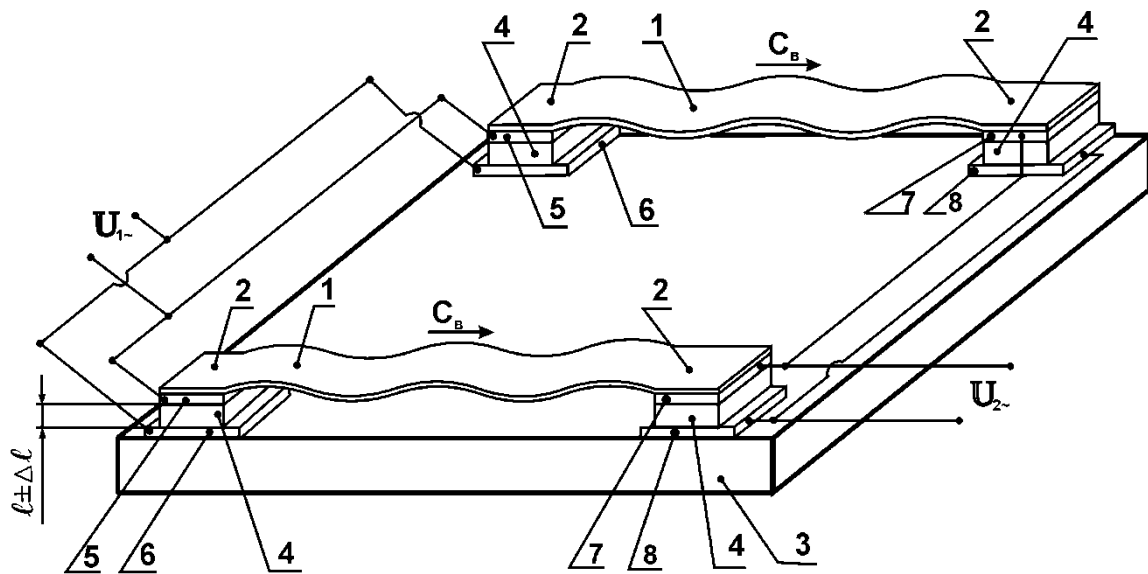


Рис. 1. Линейка микромеханических акустических волноводов

Ширина волновода меньше длины упругой волны. В этом случае его колебания одномерные и скорость изгибной волны [9] равна:

$$c_{nl} = \alpha_{nl} \sqrt{\omega E}; \quad \alpha_{nl}^4 = \frac{E_{ю} h^2}{12\rho(1-\sigma^2)}, \quad (1)$$

где h – толщина пластины, σ – коэффициент Пуассона материала пластины.

Для волновода из плёнки кремния $E_{ю} = 3 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 3 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,3$; при толщине $h = 10^{-6}$ м:

$$\alpha^4 = \frac{3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-12}}{12 \cdot 3 \cdot 10^3 (1 - 0,3^2)} = 9,16 \cdot 10^{-6};$$

На частоте $f = 1$ МГц, $\omega = 2\pi \cdot 10^6$ получим:

$$C_{nl} = \alpha \sqrt{\omega} = 0,055 \sqrt{2\pi \cdot 10^6} = 137,86 \text{ м/с}.$$

Для стержня в виде тонкой пластинки фазовая скорость крутильной волны при $h \ll d$ [9]:

$$c_{фкр} = \frac{2h}{d} \sqrt{\frac{G}{\rho_0}}. \quad (2)$$

Режим бегущей волны даёт возможность плавного изменения длины волны в полоске путём непрерывного и плавного изменения частоты переменного напряжения, чему способствует также пьезовозбуждение упругой волны непосредственно на конце полоски,

Матрица микромеханических волноводов образует собой динамический транспарант. Оптическое считывание информации при облучении транспаранта на отражение монохроматическим излучением возможно по интерференционной схеме, если установить параллельно матрице волновода полупрозрачное зеркало.

В сочетании с соответствующей оптической схемой транспарант также может осуществлять оптическое преобразование Фурье, если информация вносится в динамическом режиме индивидуально в каждый волновод матрицы волноводов в виде последовательностей гармонических цугов с частотой колебаний, модулированной исследуемым процессом; матрица волноводов может осуществлять функцию дифракционной решётки с перестраиваемой постоянной при возбуждении всех волноводов электрическим сигналом одной перестраиваемой частоты.

Прогнозируемые параметры приборов на медленных упругих волнах существенно превышают параметры близких по принципам действия акустооптических устройств на поверхностных акустических волнах (на ПАВ).

Развитием концепции использования упругих волн для обработки информации являются устройства на упругих крутильных волнах. Преимуществом крутильных волн является независимость скорости их распространения от частоты колебаний и простота реализации эффективного взаимодействия со световыми потоками.

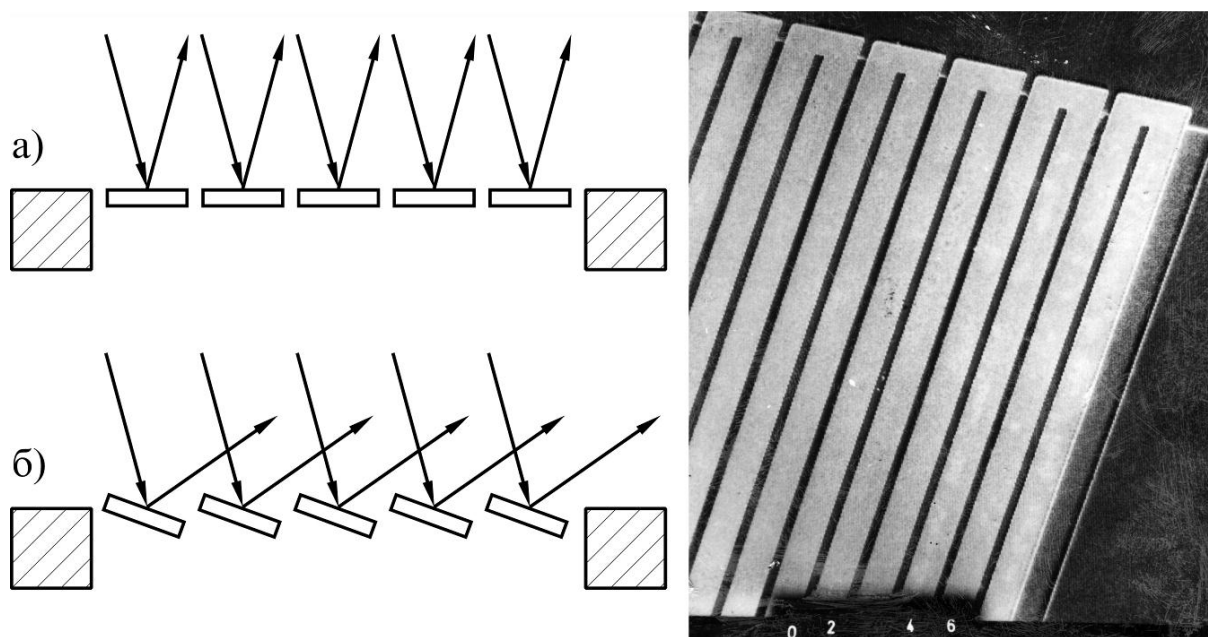


Рис. 2. Схема взаимодействия светового потока с упругиммикроволноводом, в котором возбуждена крутильная волна,и микрофотография соответствующей структуры

Разработан быстродействующий микромеханический дефлектор [10,11], содержащий одномерную матрицу кремниевых узких зеркальных полосок, совершающих крутильные колебания вокруг своей продольной оси. При этом матрица должна быть помещена в магнитное поле.

Полоски образуют составное зеркало; каждый сегмент зеркала имеет индивидуальный «движитель» – фотолитографически сформированный проволоочный виток, через который пропускается переменный ток, или напылённый микромагнит. В последнем случае переменным должно быть

внешнее магнитное поле. На рис. 2 показана принципиальная схема работы дефлектора и микрофотография соответствующей структуры.

Для изготовления дефлекторов может быть использована кремниевая планарная технология. Свободные полосы заданной толщины получают с помощью известной методики химического травления кремниевой пластины, легированной в поверхностном слое бором до концентрации 10^{22} см^{-3} , что предотвращает растворение легированного слоя в избирательных травителях кремния. Рамка с током изготавливается гальваническим наращиванием золота по рисунку, заданному фотолитографически. Плёночные микромагниты напыляют в вакууме через маску испарением соответствующего магнитотвердого сплава.

Крутящий момент, вынуждающий полосу микрозеркала поворачиваться, возникает вследствие взаимодействия магнитного момента витка или микромагнита с внешним магнитным полем:

$$M_{\text{кр}} = P_m B \cos(\alpha \cos \omega t), \quad (3)$$

где P_m – магнитный момент, равный $P_{m,1} = iS$ в случае витка и $P_{m,2} = I_r V$ – в случае микромагнита (i – ток по витку, S – площадь витка с током, I_r – намагниченность, V – объем микромагнита); B – индукция внешнего магнитного поля; α – угол между направлением магнитного момента P_m и направлением внешнего магнитного поля; ω – частота крутильного момента; t – текущее время.

Наибольшая скорость поворота микрозеркала достигается в случае формирования в его полоске упругой стоячей волны; при этом вдоль полосы располагается половина длины упругой крутильной волны $\lambda / 2$.

Разрабатывается микрозеркальный сканер, использующий гибкие свойства тонкоплёночной зеркальной мембраны, основанный на эффекте электростатического наката гибкой зеркальной обкладки конденсатора с клиновым зазором между обкладками на вторую обкладку [2]. На рис. 3 схематически показана конструкция микромеханического сканера. На кремниевую профилированную подложку со стороны профилирования вплотную к вершинам выступов наложена тонкая металлизированная мембрана, являющаяся зеркалом дефлектора.

При подаче разности потенциалов между подложкой и слоем металлизации на мембране её участки электростатическими силами втягиваются в углубления профиля и занимают место на плоских участках наклонной части рельефа, плоское зеркало при этом разделяется на множество микрозеркал, имеющих одинаковые углы наклона относительно первоначального положения мембраны. Угол отражения света, падающего на сканер, при подаче напряжения изменяется на $\alpha = 2\gamma_0$, где γ_0 – угол наклона участков профиля.

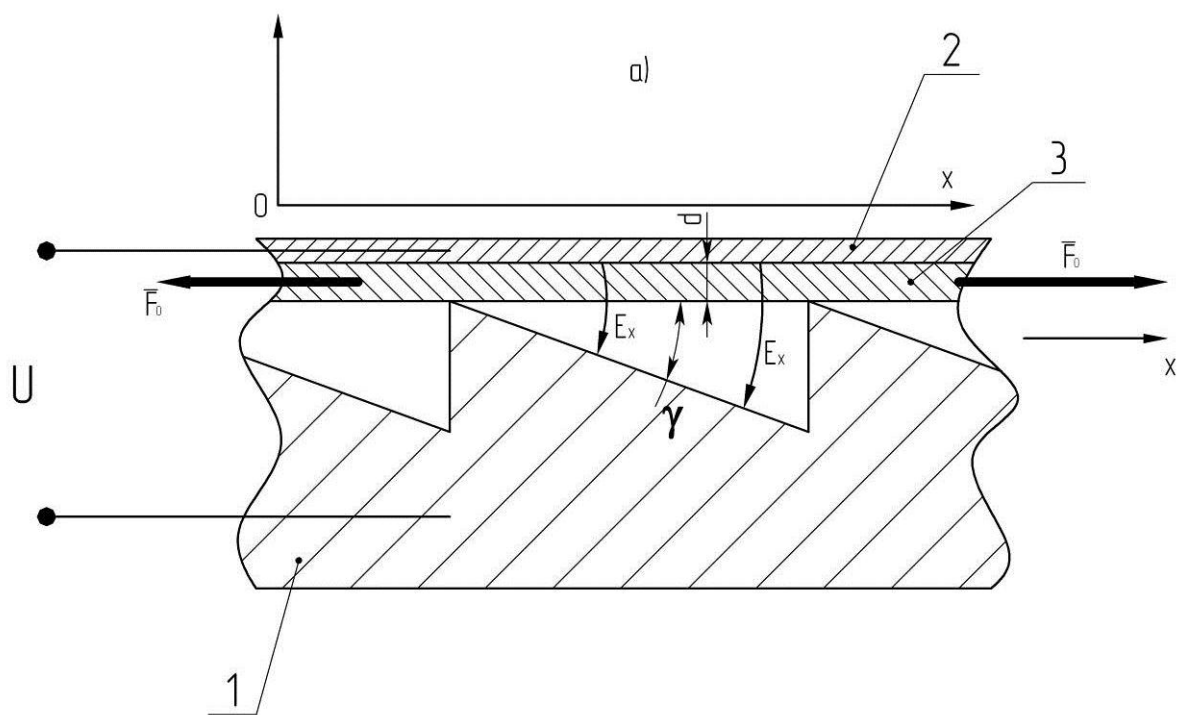


Рис. 3. Схема конструкции микромеханического оптического сканера

При снятии напряжения плоскостность мембраны восстанавливается. При требуемом угле сканирования порядка 1 угл. мин. глубина рельефа при его периодичности 0,1–0,5 мм лежит в нанометровом диапазоне размеров и примерно равна 30–150 нм. Получение подобного наноразмерного рельефа по всей поверхности подложки площадью до десятков квадратных сантиметров решается с использованием технологии анизотропного травления монокристаллического кремния.

При выводе расчётных соотношений считаем мембрану гибкой, не имеющей механической жёсткости, угол γ малым; принимаем форму силовой линии электрического поля между мембраной и наклонной плоскостью профиля частью окружности с центром в месте касания мембраны и наклонной плоскости; участок силовой линии в мембране считаем прямолинейным. При этих допущениях сила dF , действующая на бесконечно малый участок dx длины мембраны, имеющий единичную ширину, в точке координатой x , равна [2]:

$$dF = \frac{\varepsilon_0 E_x^2 dx}{2} = \frac{\varepsilon_0 U^2 dx}{2 \left(\frac{d}{\varepsilon} + \gamma_x x \right)^2}, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость мембраны, E_x и γ_x – напряжённость электрического поля на внутренней поверхности слоя металлизации мембраны и угол между поверхностью наклонного участка подложки и мембраной в точке с координатой x .

Базируясь на (4), можно получить уравнение для расчёта управляющего напряжения:

$$U = d \sin\left(\frac{b}{a} \gamma\right) \sqrt{\frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}}. \quad (5)$$

Полагая в уравнении (5) отношение длин рабочего и вспомогательного участков микрозеркала $b/a = 10$, $\gamma = 3 \cdot 10^{-4}$, $d = 0,25$ мкм, механическое напряжение мембраны $\sigma = 10^6$ Па, $\varepsilon = 3$, получим: $U \approx 0,15$ В.

Рассмотренное устройство может быть применено в качестве субпиксельного микросканера для увеличения разрешающей способности матричных приёмников изображений и обладает существенно лучшими параметрами в сравнении с известными из литературы [13]. На рис. 4 показана оптическая схема тепловизионного приёмника изображения с зеркально-линзовой оптической системой, где в качестве зеркала применён субпиксельный микросканер. На рисунке: 1 – микросканер, 2 – матрица приёмника, h – сдвиг изображения в плоскости матрицы при срабатывании микросканера и повороте его зеркал на угол $\gamma = \alpha / 2$.

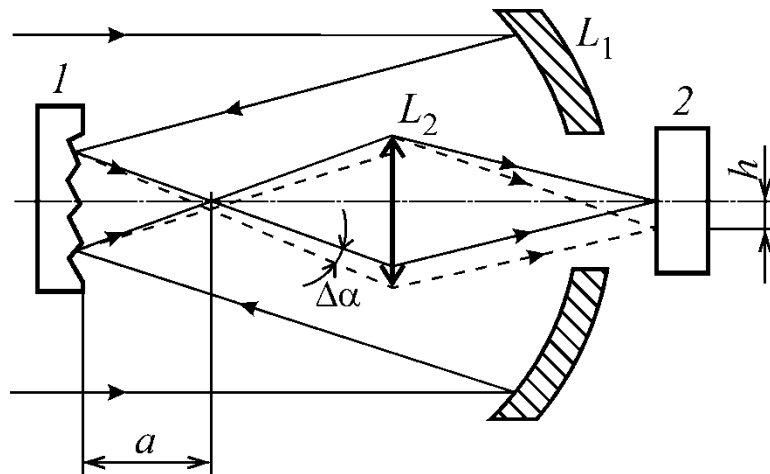


Рис. 4. Оптическая схема зеркально-линзового тепловизионного приёмника изображения со встроенным микросканером субпиксельного сканирования

Пластина микромеханического сканера устанавливается в качестве зеркала 1 на расстоянии a от плоскости формирования изображения сферическим или параболическим зеркалом L_1 . Линза L_2 формирует вторичное изображение в плоскости теплоприёмной матрицы 2. При работе сканера изображение в плоскости матрицы периодически смещается на величину h . Чувствительный элемент пиксела матрицы занимает часть площади пиксела, и при смещении изображения на чувствительный элемент попадает то одна, то другая часть изображения. Если значение h равно половине размера пиксела, то разрешение матрицы по направлению отклонения изображения увеличивается вдвое.

В течение нескольких лет нами проводились исследования уникальных свойств металлопленочных оптических зеркал, проявляющих нелинейно-оптические свойства под действием мощного лазерного излучения. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволили создать на их основе

оптические затворы с субнаносекундным быстродействием, не имеющие физических ограничений для работы от УФ до дальнего ИК диапазона спектра [6]. При использовании нелинейных зеркал в качестве затворов - ограничителей оптических излучений выявилось существенное превосходство таких ограничителей по оптическим параметрам над известными, например, фуллереновыми [12].

В связи с появлением в развитых странах мощного лазерного вооружения, в том числе, лазерных противоспутниковых и противоракетных систем, средств ослепления боеголовок самонаведения, и др, интенсивно разрабатываются средства оптической защиты наиболее уязвимых в условиях лазерного облучения элементов этих систем – фотоприёмных устройств. Подобные средства оптической защиты находят также и гражданское применение – в промышленности, при научных исследованиях.

Проблемами фуллереновых ограничителей при работе против мощного импульсного облучения являются, как показывают наши расчёты, а) недостаточная стойкость в связи с тем, что по принципу действия такие ограничители должны поглощать падающее излучение полностью и рассеивать его в своей среде, и б) недостаточно низкий порог срабатывания, что вызвано необходимостью поглощения падающего излучения в значительном объёме поглощающей среды.

Нелинейные зеркала размещаются в области действительного промежуточного изображения оптико-электронной системы прибора наблюдения (рис. 5).

В момент прихода ослепляющего импульса от лазерного излучателя зеркало, нагреваясь и плавясь локально в точке изображения излучателя, уменьшает свою отражательную способность практически до нуля, что ускоряет ввод тепловой энергии в вещество и является фактором, обеспечивающим быстродействие затвора менее наносекунды; при дальнейшем действии излучения металл испаряется, в месте падения излучения образуется отверстие в плёнке, и отражение от данного участка зеркальной поверхности затвора практически прекращается.

Отражённое всем зеркалом излучение объективом продолжает фокусироваться в область приёмника излучения, создавая там изображение сцены наблюдения, на котором точкой отображается место расположения ослепляющего излучателя. Порог срабатывания нелинейного зеркала наступает, как показывают наши расчёты и подтверждают эксперименты, при плотности энергии импульса падающего излучения на поверхности зеркала $0,01 \text{ Дж/см}^2$, меньшей, в сравнении с фуллереновыми ограничителями, в 60–100 раз; зеркало сохраняло работоспособность защищаемой фотоприёмной матрицы при многократном облучении импульсами излучения с плотностью энергии 10^4 Дж/см^2 , оставаясь и после этого воздействия рабочим (эксперименты проведены на длине волны $1,06 \text{ мкм}$). Наличие возникающих в зеркале малых отверстий не ухудшает ни его механических свойств, ни оптических. Зеркало в целом остаётся работоспособным, пригодным для выполнения защитных функций, его расчётный ресурс 10^5 попаданий ослепляющих импульсов.

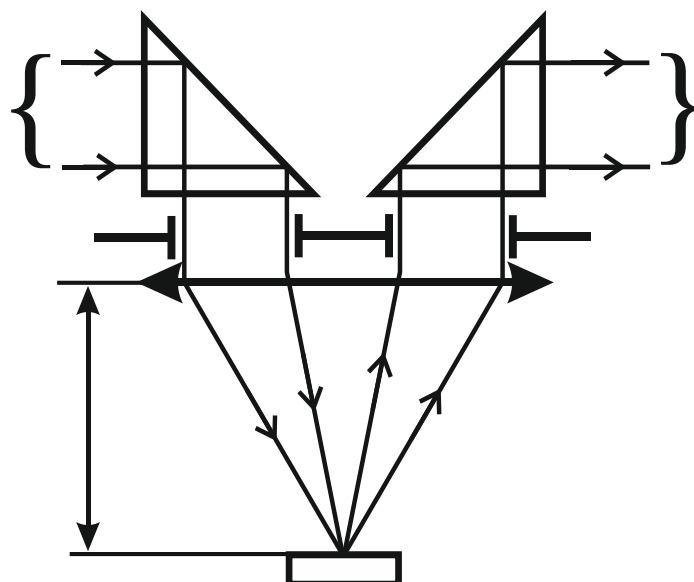


Рис. 5. Оптическая схема ограничителя энергии лазерного импульса с помощью нелинейного оптического зеркала в виде зеркальной плёнки

График на рис. 6 показывает зависимости температуры нагревания нелинейного зеркала от длительности лазерного импульса с интенсивностью падающего излучения $I_0 = 5 \cdot 10^{11}$ Вт/м².

Основные технические характеристики разработанного затвора-ограничителя. Затвор является пассивным, срабатывающим от энергии падающего излучения устройством, обеспечивает защиту от лазерного ослепления.

– Время срабатывания, нс	1,0
– Световой диаметр, мм	11,5
– Энергия срабатывания, Дж	$(5-10) \cdot 10^{-6}$
– Рабочий диапазон длин волн, мкм	0,9–1, 2
– Коэффициент защиты (доля энергии ослепляющего лазерного импульса, проходящая к защищаемому оптоэлектронному устройству, зависит от длительности импульса ослепления)	$(3-300) \cdot 10^{-5}$
– Технический ресурс, импульсов ослепления	10^4-10^5
– Максимальная энергия ослепляющего импульса	не лимитируется

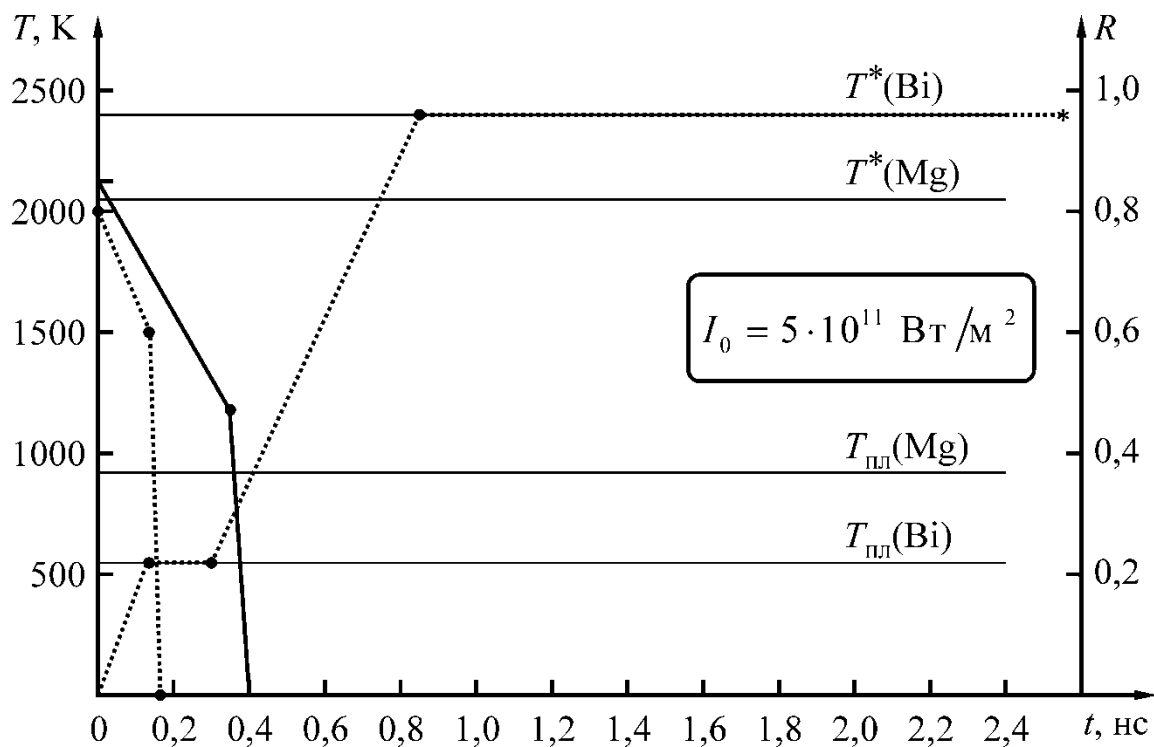


Рис. 6. График зависимости температуры T плёнок магния и висмута толщиной 100 нм и их показателя отражения R от времени облучения для интенсивности падающего излучения $I_0 = 5 \cdot 10^{11} \text{ Вт/м}^2$

Актуальность исследования обусловлена как высокими характеристиками создаваемого устройства, так и влиянием появления нелинейных зеркал на рынке на направления разработок лучевого лазерного оружия. По нашему мнению, при защите фотоприёмных устройств космических аппаратов нелинейными зеркалами способность сенсоров противостоять поражающему действию мощного лазерного облучения сравнивается с устойчивостью корпусных элементов аппаратов.

Ряд задач в области микро- и нанoeлектроники и наносистем решается при создании технологии получения наноразмерных (величиной 1–100 нм) воздушных или вакуумных промежутков между электродами или поверхностями тел. Получение таких промежутков является проблемой при разработках оптических электроуправляемых спектральных фильтров. Задача получения воздушного промежутка существенно усложняется при необходимости его выдерживания плоским или эквидистантным при большой – до см^2 – площади поверхностей, обычные способы получения с использованием жертвенных слоёв требуют значительного времени на удаление этих слоёв из нанометровых промежутков.

На рис. 7 приведена схема устройства, при изготовлении которого получение плоского или эквидистантного промежутка между зеркальными покрытиями не требует применения жертвенного слоя. Между поверхностями зеркал, как в капилляре, вводится летучая жидкость, она растекается слоем толщиной до единиц – десятков нанометра, капиллярные силы прижимают

поверхности друг к другу. После закрепления поверхностей жидкость испаряется.

Способ иллюстрируется на рис. 7.

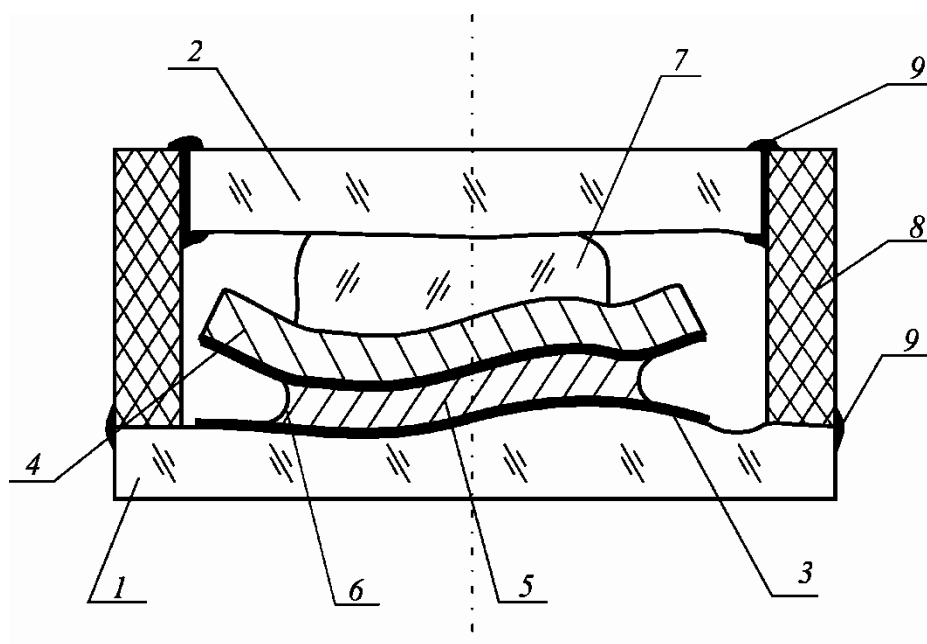


Рис. 7. Способ получения плоского или эквидистантного промежутка между зеркальными покрытиями не требует применения жертвенного слоя

На рисунке: 1 и 2 – вторая и первая прозрачные пластины, 3 – зеркальный слой на поверхности второй пластины, 4 – гибкая плёнка, 5 – смачивающая жидкость, 6 – мениск на боковой поверхности слоя жидкости, вызванный капиллярными силами в жидкости, 7 – твердеющая среда, 8 – корпус, скрепляющий пластины 1 и 2 как в процессе затвердевания среды 7, так и после удаления слоя жидкости 5, 9 – клей, соединяющий корпус и пластины.

Давление внутри слоя жидкости между смоченными поверхностями относительно давления во внешней среде можно определить в соответствии с уравнением Лапласа – Юнга как для мениска с цилиндрической симметрией:

$$\Delta p = \sigma / R, \quad (6)$$

где Δp – разница давлений внутри жидкости и снаружи, σ – поверхностное натяжение жидкости на границе с воздухом, R – радиус закругления поверхности мениска. При полном смачивании $R = d / 2$. Используем воду ($\sigma = 0,073$ Н/м); при $d = 0,1$ мкм получим для отрицательного давления в капиллярном слое значение $\Delta p = 1,46$ МПа (14,6 атм), что подтверждает предположение о достаточности капиллярного давления для прижима гибкой плёнки.

При сближении поверхностей и перекрытии граничных слоёв возникает давление, которое имеет характер расклинивающего. В работе [14] приведён обзор современных представлений о составляющих расклинивающего

давления, в числе которых наличие двойного электрического слоя, изменение структуры жидкости, адсорбция низкомолекулярных веществ, и др.

Сравнение составляющих расклинивающего давления с капиллярным в жидкой прослойке показывает существенно большую величину капиллярного вплоть до величины зазора между поверхностями порядка единиц нанометра. Для молекулярно гладких поверхностей наименьшая физически достижимая величина зазора равна удвоенной толщине адсорбированного поверхностями мономолекулярного слоя.

Для получения воздушной среды в капиллярном промежутке жидкость должна быть из него удалена, например, нагреванием и испарением. Малая величина воздушного зазора может приводить к слипанию поверхностей под действием межмолекулярных дисперсионных сил [14, 15].

В системе «металл – воздух – металл» при величине промежутка 0,5 нм, расчётное притяжение поверхностей, обеспечиваемое дисперсионными силами, может достигать значений, при которых поверхности монолитно сцепляются. Для реальных структур оптических устройств в большей степени подходит система «силикат – воздух – силикат», в которой притяжение поверхностей существенно меньше и недостаточно для их срачивания.

Силы поверхностного притяжения при наноразмерных величинах воздушных промежутков между плоскими поверхностями деталей конструкции могут вызывать в конструкциях значительные упругие силы и деформации.

Разработка лабораторной технологии получения наноразмерных промежутков между поверхностями позволила создать макетные образцы микромеханических электрически перестраиваемых многолучевых интерферометров с шириной спектральной области перестройки порядка октавы.

За счёт использования двух интерферометров – низкого и высокого порядков – можно выделять из спектра источника излучение более монохроматическое при сохранении величины перестраиваемого диапазона – достижима полоса пропускания менее нанометра.

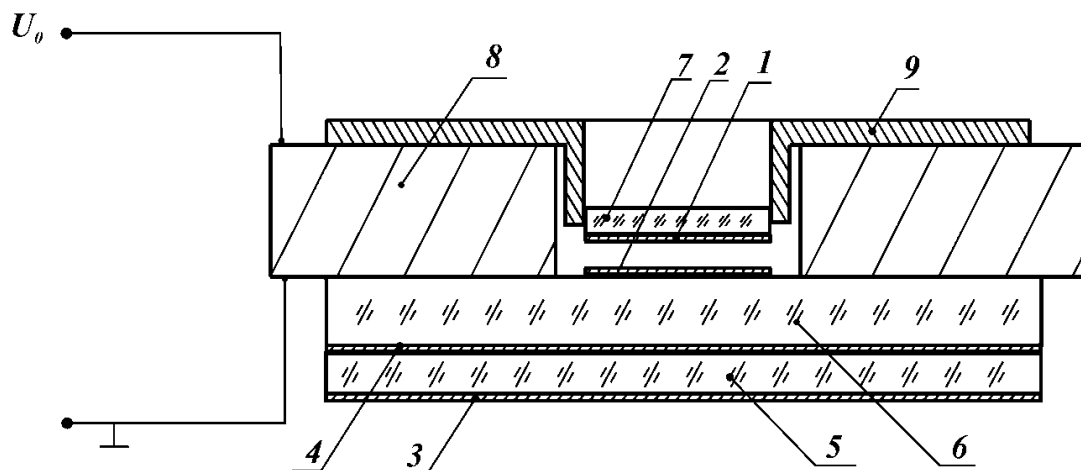


Рис. 8. Упрощённая схема электрически перестраиваемого мультиплекс-интерферометра

Упрощённая схема такого светофильтра показана на рис. 8. Светофильтр первого порядка образован зеркалами 1 и 2 и воздушным зазором между ними. Светофильтр высокого порядка образован зеркалами 3 и 10 и прозрачной пластиной 5 между ними. Зеркало 1 нанесено на прозрачную пластину 7; пьезокерамическая шайба 8 поддерживает между зеркалами 1 и 2 воздушный зазор величиной 0,2–0,4 мкм. Управление величиной воздушного зазора пьезоэлектрическое: управляющее напряжение U_0 подаётся между электродами на пьезоэлементе.

Определим возможные параметры рассматриваемого микромеханического мультиплекс-светофильтра. В мультиплекс-интерферометре при отношении оптических толщин интерферометров, кратном целому числу, область дисперсии определяется областью дисперсии тонкого интерферометра, а разрешение – толстым интерферометром.

Прозрачность мультиплекс-светофильтра аналогична прозрачности 4-х зеркального интерферометра и определяется формулой [16]:

$$T_M = \frac{T^4}{(1+R)^2 \left[(1-R)^2 + 4R \sin^2 \frac{\delta_2}{2} \right]}, \quad (7)$$

где $\frac{\delta_2}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} nL_2$ (без учёта скачков фаз на отражающих поверхностях), T и

R – энергетические прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала. Порядок спектра определяется выражением:

$$q = \frac{2Ln}{\lambda_{cp}}, \quad (8)$$

где Ln – оптическая ширина расстояния между зеркалами; λ_{cp} – средняя длина волны области дисперсии интерферометра.

Область дисперсии мультиплекс-светофильтра примерно равна области дисперсии тонкого светофильтра [16]:

$$\Delta\lambda_M = \frac{\lambda_{cp}}{q_1}, \quad (9)$$

где q_1 – порядок спектра тонкого светофильтра.

Разрешаемая разность длин волн в мультиплекс-светофильтре определяется выражением [16]:

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda}{q_2} \cdot \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}. \quad (10)$$

Аппаратная функция мультиплекс-светофильтра равна произведению аппаратных функций его составных частей, светофильтр пропускает излучение с длинами волн, одновременно присутствующими в полосах пропускания обеих составляющих его светофильтров.

При перестройке (путём изменения зазора между зеркалами) светофильтра с первым порядком интерференции его полоса пропускания смещается по спектру, происходит выделение одной полосы дисперсии, затем другой полосы

второго светофильтра, то есть, «переключение» диапазонов $\Delta\lambda_2$. Необходимо обеспечить равенство полосы пропускания светофильтра с меньшим зазором δ_{λ_1} полосе дисперсии $\Delta\lambda_2$ второго: $\delta_{\lambda_1} \approx \Delta\lambda_2$.

Число M «переключаемых» полос дисперсии равно:

$$M = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_2}. \quad (11)$$

Найдём полосу дисперсии второго интерферометра:

$$\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda}{q_2}. \quad (12)$$

Соответствующее этой полосе расстояние L_2 между зеркалами второго интерферометра найдём по выражению:

$$nL_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot q_2. \quad (13)$$

Здесь n – показатель преломления среды.

Количественная оценка показывает возможность работы интерферометра в первом порядке спектра и диапазоне перестройки 0,4 – 0,8 мкм.

На рис. 9 приведён расчётный график зависимости (по формуле (4)) коэффициента пропускания мультиплекс-светофильтра в видимом диапазоне спектра от величины регулируемого зазора тонкого светофильтра, которая плавно изменяется от 0,2 до 0,4 мкм. Толщина зазора толстого светофильтра $n_2L_2 = 5,8$ мкм, энергетическая прозрачность и коэффициент отражения каждого зеркала соответственно равны: $T = 0,1$ и $R = 0,85$.

Управление величиной воздушного промежутка между зеркалами осуществляется изменением управляющего напряжения, приложенного между обкладками пьезокерамической шайбы 8. Зависимость изменения её толщины от величины напряжения определяется выражением:

$$\Delta l = \ell d_{33} E = d_{33} U_0, \quad (14)$$

где d_{33} – пьезокерамический модуль материала пьезоэлемента, Δl – деформация по толщине пьезоэлемента, E – напряжённость электрического поля в пьезоэлементе, U_0 – напряжение, подаваемое на обкладки пьезокерамической шайбы.

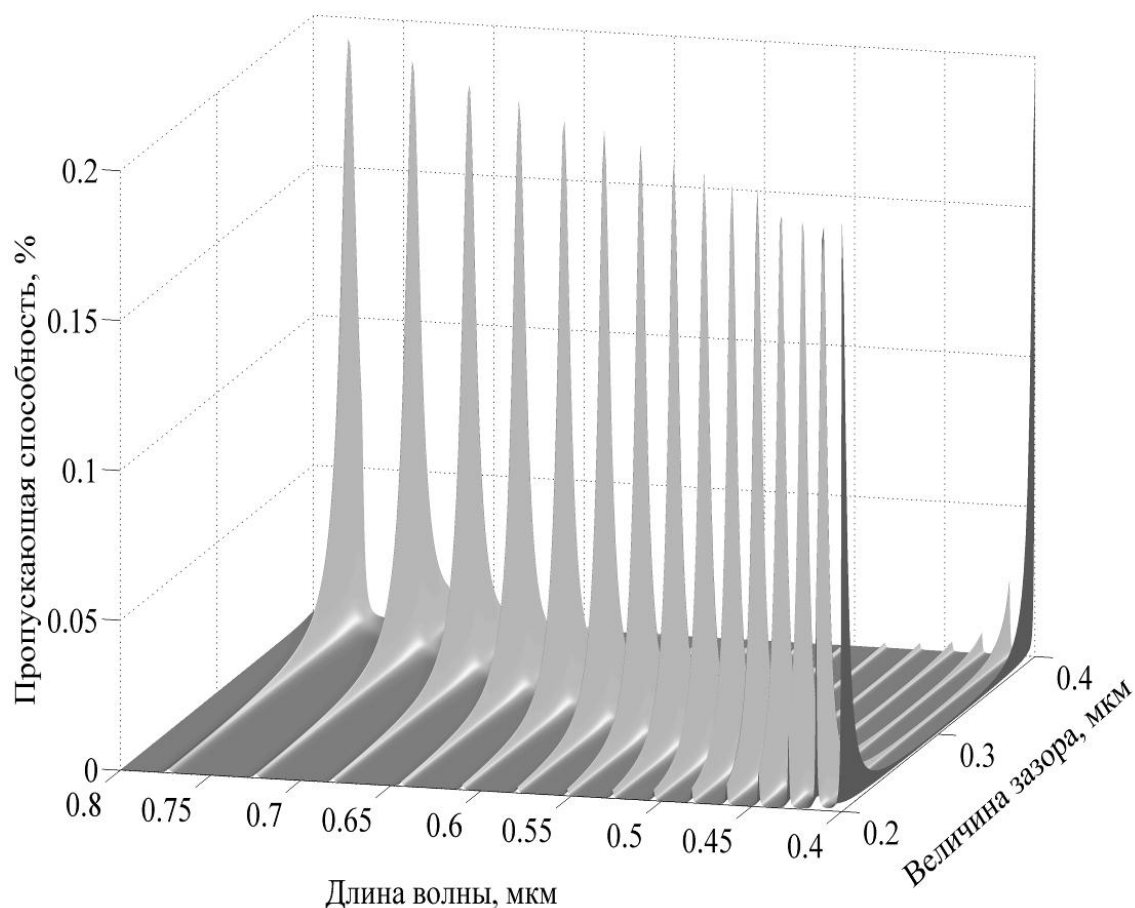


Рис. 9. Расчётный график зависимости коэффициента пропускания мультиплекс-светофильтра от длины волны излучения и от расстояния между зеркалами интерферометра первого порядка интерференции

Подобный светофильтр, по нашему мнению, может найти применение в системах экспресс-анализа химических веществ и различных промышленных жидкостей и газов, при исследованиях содержания вредных веществ в окружающей среде. Светофильтр может иметь модификации, работающие в различных участках инфракрасного диапазона спектра.

Подведены некоторые итоги работы нашего научного коллектива в области исследования плёночных микроэлектромеханических устройств оптического применения. Полученные результаты являются оригинальными, не имеют аналогов; работы продолжаются как в направлении дальнейшего исследования физических и технологических основ приборов, так и в направлении применения разработанных устройств в народном хозяйстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дятлов В.Л. Плёночная электромеханика. Новосибирск: Наука, 1991. – 248 с.
2. А.с. 314304 СССР, МКИ Н 03 К 17/52. Электростатическое реле / В.В. Чесноков – № 1395318; заявл. 02.02.70; опубл. 07.09.71, Бюл. № 27.
3. Косцов, Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектромеханики / Э.Г. Косцов // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 3. – С.3–52.
4. А.с. 363398 СССР, МКИ G 02 F 1/18. Мембранный модулятор света / В.В. Чесноков – № 1420256; заяв. 7.04.70; не опубл.

5. А.с. 1569783 СССР, МКИ G 02 В 26/10. Сканирующее магнитоэлектрическое устройство / В.В. Чесноков – № 4325366; заявл. 9.11.87; опубл. 07.06.90, Бюл. № 21.
6. Чесноков, В.В. Плёночные пассивные оптические затворы для защиты приёмников изображения от ослепления / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, В.Б. Шлишевский // Оптический журнал. – 2011. – Т.78, № 6. – С.39–46.
7. Nikulin D.M., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Tunable interference colour filter in micromechanical performance // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – P.412–415.
8. Nikulin D.M., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. The Control of Elastic Traveling Waves in Thin-film Free Structures // International School and Seminar on Modern Problems of Nanoelectronics, Micro- and Nanosystem Technologies INTERNANO'2009 (Russia, Novosibirsk, 2009, Oct. 28–31): Proc. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.119–121.
9. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971.
10. Чесноков В.В. Микромеханический модулятор света // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1990. – № 6. – С.82.
11. Чесноков Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков // Оптический журнал. – 2007. – № 4. – С.51–54.
12. Каманина Н.В. Фотофизика фуллеренсодержащих сред // Нанотехника. – 2006, – № 1. – С.86–98.
13. Резник А.Л. Повышение пространственного разрешения цифровых изображений и сигналов с помощью регулируемого субпиксельного сканирования / А.Л. Резник, В.М. Ефимов // Микросистемная техника. – 2003, №8. – С.20-25.
14. Ролдугин, В. И. Физикохимия поверхности: учебник – монография / В.И. Ролдугин. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.
15. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 431 с.
16. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

© В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНОГО LCVD

Максим Викторович Кузнецов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер НИС, тел. +7-952-923-40-99, e-mail: say1945@mail.ru

Денис Вячеславович Кочкарев

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, инженер НИС, тел. +7-913-913-55-91, e-mail: denlnsk@mail.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования лазерно-пиролитического осаждения металлических плёнок на стеклянных и стеклянных хромированных подложках.

Ключевые слова: наносекундное LCVD, образование и рост топологических микро- и наноструктур.

EXPERIMENTAL STUDY OF THIN FILM DEPOSITION METALS BY NANOSECOND LCVD

Maksim V. Kuznetsov

Siberian State Geodesic Academy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk 630108 Novosibirsk, engineer, tel. (952) 923-40-99, e-mail: say1945@mail.ru

Denis V. Kochkarev

Siberian State Geodesic Academy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk 630108 Novosibirsk, engineer, tel. (952) 923-40-99, e-mail: denlnsk@mail.ru

The results of experimental studies of laser pyrolytic deposition of metal films on glass and chrome-plated glass substrates are presented.

Key words: nanosecond LCVD, the formation and growth of topological micro- and nanostructures.

Целью выполнения представленных в настоящей публикации экспериментальных исследований является получение данных о параметрах осаждения тонких плёнок металлов методом наносекундного LCVD в условиях атмосферного давления газовой среды.

Результаты исследований методов наносекундного LCVD представлены в работах [1-5]. Значительным преимуществом лазерной технологии является одностадийный характер создания топологических структур, возможность получения наноразмерных формируемых элементов, самосовмещение структурных элементов последовательно формируемых структур.

Как показано в упомянутых работах и ряде других работ, воздействие наносекундного сфокусированного лазерного излучения на поверхность подложки, расположенной в парах летучих элементоорганических соединений,

приводит к образованию на поверхности островка металла. Процесс термохимический, имеет характер пиролиза, но на размеры островка практически не влияет тепловое расплывание нагреваемой излучением зоны в связи с малой длительностью облучения. С учётом экспоненциальной зависимости скорости пиролиза от температуры наносекундное LCVD позволяет достигать при формировании структур разрешения, не ограничиваемого длиной волны излучения.

В условиях открытой атмосферы разложение МОС ведётся на облучаемой поверхности в адсорбированном (или конденсированном) на поверхности слое молекул и в пристеночном (толщиной порядка единиц мкм) слое атмосферы.

В качестве реагентов в технологии LCVD использовались МОС различных металлов; в данном исследовании проводится анализ процессов получения плёнок рения разложением декакарбонила дирения $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$. Карбонил представляет собой при комнатных условиях порошок; давление насыщенных паров $p_{\text{нас}} \approx 2$ Па при температуре 60°C , температура кипения 180°C , температура интенсивного разложения примерно равна 400°C , молярный вес $M = 0,652$ кг/моль [6].

Для получения на подложке плёночных микрорисунков использовались проекционная и контурно-проекционная оптические схемы формирования.

При лазерном воздействии на поверхность подложки за время импульса облучения нагревается облучаемая поверхность и подложка на некоторую глубину. Максимальное значение изменения температуры поверхности в середине облучаемой зоны при гауссовском распределении интенсивности излучения в пучке определяется формулой [7]:

$$\Delta T = \frac{(1-R)P_0\tau^{1/2}}{(\sqrt{2}k_T\rho c)^{1/2}} \quad (1)$$

где R – коэффициент отражения поверхности, P_0 – плотность падающей мощности излучения, τ – длительность лазерного импульса, k_T – коэффициент теплопроводности подложки, ρ – плотность подложки, c – удельная теплоёмкость подложки.

Если на подложке располагается тонкая металлическая плёнка, полученная ею при лазерном воздействии тепловая энергия может распространяться в подложку за счёт теплопроводности. Если лазерные импульсы короче 100 нс, и удельная теплоёмкость плёнки много больше теплоёмкости прогретого за время импульса слоя подложки, то приращение температуры плёнки за время импульса можно вычислить по формуле [8]:

$$\Delta T = \frac{(1-R_1)P_0\tau}{\rho_1 c_1 h}, \quad (2)$$

где индексом «1» обозначены величины, относящиеся к плёнке, h – толщина плёнки.

Глубина проникновения тепла внутрь подложки за время импульса определяется длиной тепловой волны

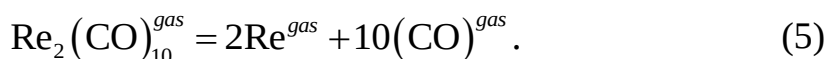
$$\ell_T = \sqrt{a_T \tau}, \quad (3)$$

где $a_T = \frac{k_T}{\rho c}$ – коэффициент температуропроводности.

Плѐнка металла на подложке растѐт при термической диссоциации молекул реагента, находящихся в адсорбированном состоянии на поверхности или в газовой фазе. В случае адсорбированных молекул результирующая реакция пиролиза декакарбонила дирения следующая:



Результирующая реакция пиролиза в газовой фазе с образованием атомного пара металла может быть записана в виде:



Скорость роста плѐнки определяется количеством молекул карбонила, диссоциированных на поверхности за импульс лазерного облучения, умноженным на частоту следования импульсов [5]. При распаде молекулы декакарбонила дирения образуется два атома рения, поэтому в уравнении появляется множитель 2:

$$v(\text{м} / \text{с}) = \frac{2s_a m_a}{s_0 \rho} \theta f = \frac{2s_a M_a}{s_0 \rho N_A} \theta f \quad (6)$$

Здесь s_a – площадь, занимаемая атомом металла поверхности, m_a – масса атома, s_0 – площадь, занимаемая молекулой МОС на поверхности в мономолекулярном слое, ρ – плотность металла, θ – доля молекул мономолекулярного слоя МОС, подвергшихся распаду при облучении, f – частота лазерных импульсов, M_a – атомная масса металла, N_A – число Авогадро. При получении плѐнки рения $s_a = 5,9 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, $s_0 = 6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, $M_a = 0,186 \text{ кг/моль}$, $\rho = 21 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. В уравнении не учтены молекулы, диссоциирующие в газовой фазе.

Лазерная установка, используемая для наносекундного LCVD в условиях открытой атмосферы, описана в [5]. Используется излучение азотного лазера с длительностью импульса 6 нс и частотой следования импульсов до 1 кГц, объектив с фокусным расстоянием 6 мм проецирует изображение трафарета на поверхность подложки с уменьшением; газ-носитель, содержащий пары МОС, омывает подложку в области формируемого изображения. Плѐнки наносились непосредственно на стеклянную подложку и на стеклянную подложку с нанесѐнным слоем хрома толщиной $\sim 0,1 \text{ мкм}$.

Был проведен ряд экспериментов с целью выявить зависимость толщины полученных пленок от температуры T_s (то есть, от парциального давления реагента) в реакционной зоне, длительность облучения 60 с.

Интенсивность лазерного пучка в зоне реакции изменялась с помощью устанавливаемых на пути излучения светофильтров с коэффициентом пропускания k . В таблице 1 приведена зависимость расчѐтного значения лазерно-индуцированной температуры подложки от коэффициента ослабления светофильтра; при расчѐте использованы теплофизические характеристики

плёнки рения, то есть, эти данные справедливы для стадии процесса, когда на подложке уже образовалась плёнка металла.

Таблица 1. Зависимость плотности мощности P_s от коэффициента k светофильтров

$P_s, 10^7 \text{ Вт/см}^2$	7,60	5,60	3,40	1,70	1,14	0,82	0,60	0,58	0,48	0,31
k	100	74	45	22	15	11	9	8	6	4

На рис. 1 наглядно видно как происходит осаждение рения. В начальный момент облучения подложки толщина пленки была равна нулю следовательно температуру в центре мишени следует рассчитывать по формуле (1) $\Delta T_1 = 850 \text{ K}$. Коэффициент отражения поверхности R следует брать рения т.к. до начала облучения на поверхности подложки формируется монослой карбонила. Температуру в центре зоны облучения а конце осаждения можно рассчитать по формуле (2) $\Delta T_2 = 1115 \text{ K}$.

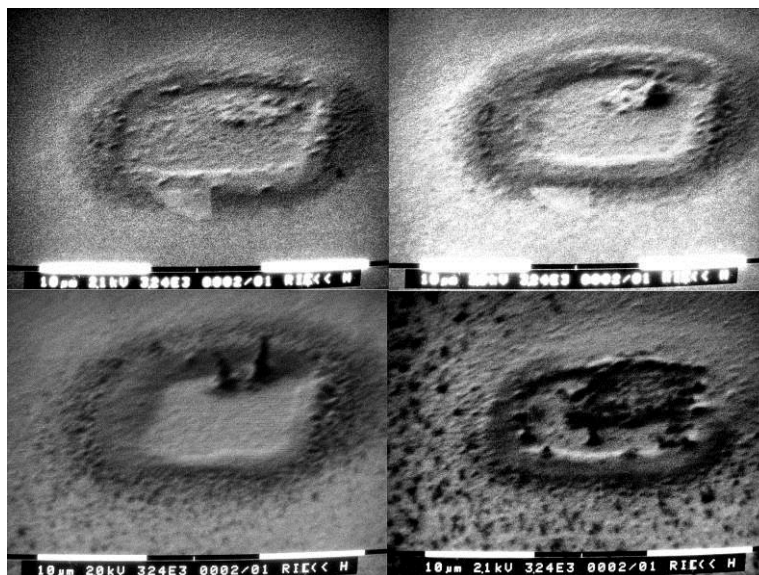


Рис. 1. Пленки полученные с использованием светофильтра с пропусканием 29%, осаждения велось в течении 20, 30, 40 и 50 секунд

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее качественные пленки рения получаются при индуцированной облучением температуре в центре зоны реакции, равной 450–550 K, и нагревании подложки и газораспределительной пластины до 307–317 K. Плотность мощности излучения была равна $(0,6–0,3) \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ (рис. 2);

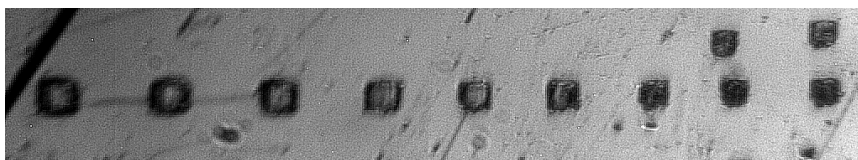


Рис. 2. Пленки полученные при температуре подложки T_{sub} равной 317К. Слева направо светофильтры 74, 45, 22, 15, 11, 9, 8, 6, 4

2. В случае увеличения температуры подложки осаждаются рений из газовой фазы, имеет слабую адгезию с подложкой;

3. При увеличении мощности лазерного излучения и сохранении температуры подложки 307–317 К пленка не осаждается в центре пятна, однако по периметру зоны облучения появляется осадок (рис. 3);

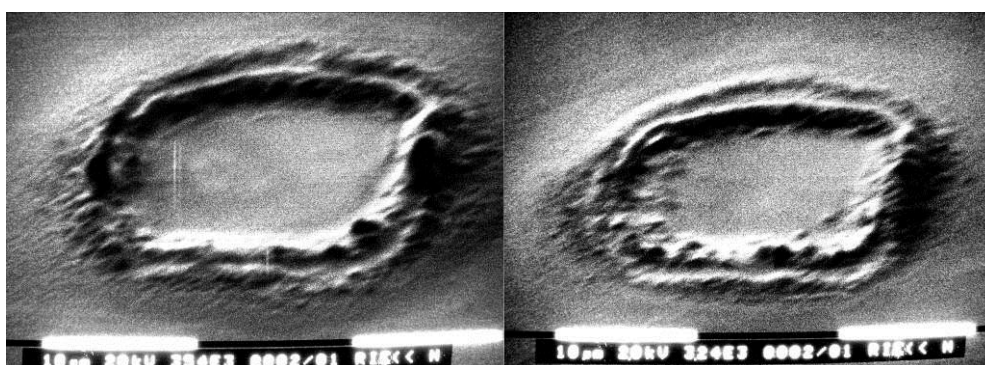


Рис. 3. Температура подложки 312 К

4. При температуре подложки выше 317 К начинается процесс активного осаждения из газовой фазы (рис. 4);

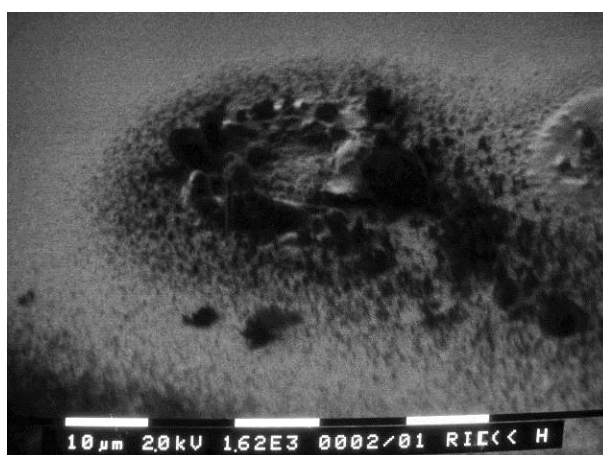


Рис. 4. Температура подложки 322 К $P_s = 3,4 \cdot 10^7$ Вт/см²

5. При температуре подложки ниже 297 К рений не осаждается.

6. За 60 секунд облучения зоны реакции импульсным лазерным излучением с частотой 1 КГц осаждается 0,3 мкм, следовательно учитывая то, что пленка

росла только в момент падения импульса можно рассчитать скорость роста пленки по формуле:

$$v = h / \tau t v, \quad (7)$$

где t – время осаждения; v - частота лазерного излучения.

В работе представлены результаты экспериментального исследования лазерно-пиролитического осаждения металлических плёнок на стеклянных и стеклянных хромированных подложках. Показано, что при повышенной температуре подложки, чему соответствует повышенное парциальное давление паров реагента, увеличивается роль процессов диссоциации молекул в газовой фазе, осадки становятся рыхлыми и обладают слабой адгезией к подложке. При увеличении плотности лазерной мощности выше оптимального значения толщина осадка уменьшается вплоть до полного его исчезновения, что объясняется, вероятно, испарением осадка. Оптимальное значение лазерно-индуцированной температуры слоя на подложке, при которой происходит наращивание слоя, находится в пределах 450 – 550 К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чесноков В.В., Земсков С.В., Игуменов И.Г. Лазерно-химическое осаждение пленок металлов // Тез. докл. 5 отрасл. научно-техн. конф. "Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем". – Нальчик, 1983.
2. Чесноков В.В., С.В. Земсков, И.К. Игуменов Способ локального нанесения покрытия на подложку // А.с. 1331369 СССР, МКИ Н 01 L 21/312, G 03 F 1/00.- № 3936434; Заяв. 6.06.85; Оpubл. Бюл. № 30.// Открытия. Изобретения.- 1987.- С.260.
3. Резникова Е.Ф.. Химическое осаждение металлических плёночных структур из паров летучих соединений металлов с помощью мощного высокочастотного наносекундного импульсного УФ лазера. Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. хим. наук / ИНХ СО РАН, Новосибирск, 1998.
4. Чесноков Д. В. Разработка и исследование наносекундной лазерной микротехнологии формирования оптоэлектронных структур: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / СГГА. — Новосибирск, 2000.
5. Чесноков В.В., Резникова Е.Ф., Чесноков Д.В.. Лазерные наносекундные микротехнологии / – под общ. ред. Д.В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003.
6. Сыркин В.Г. Карбонилы металлов.– М.: Химия, 1983
7. Лазнева Э.Ф. Лазерная десорбция. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990.
8. Вейко, В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. – Л.: Машиностроение, 1986.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ВЕКТОРА ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ

Александр Анатольевич Коллер

Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер отдела «Масса. Сила», тел. (383)210-12-06, e-mail: koller@sniim.nsk.ru

Анатолий Иванович Каленицкий

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры «Астрономии и гравиметрии», тел. (383)361-07-31

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

В статье рассмотрено влияние векторного характера измеряемой величины на результаты измерений силы и массы, а также методы подтверждения метрологических характеристик силоизмерительных устройств при различных векторах приложения испытательной нагрузки.

Ключевые слова: измерения массы и силы, поверочная схема, силовопроизводящие установки, тензорезисторные датчики.

METHODS OF DEFINITION OF DEPENDENCE OF INDICATIONS FORCE MEASURING DEVICES FROM THE VECTOR OF THE LOADING APPENDIX

Alexander A. Koller

Siberian State Scientific Research Institute of Metrology (FSUE "SNIIM"), 630004, Russia, Novosibirsk, pr. Dimitrova, 4, engineer of department «mass and force measuring», tel. (383)210-12-06, e-mail: koller@sniim.nsk.ru

Anatoliy I. Kalenickiy

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, doctor of engineering science, professor of chair «Astronomies and gravimetri», tel. (383)361-07-31

Viktor Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, doctor of engineering science, professor of chair «Metrology, standardization and certification», tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The article describes vector character of the measured size on results of measurements of force and weight, and methods of acknowledgement of metrological characteristics force measuring devices at various vectors of the appendix of test loading.

Key words: mass and force measuring, verification schedule, force measuring installations, load cells.

Принцип действия большинства современных средств измерений силы и массы основан на преобразовании деформации упругих элементов, возникающей под действием силы тяжести взвешиваемого груза, в аналоговый или цифровой электрический сигнал, изменяющийся пропорционально нагрузке. Как правило, в качестве измерительных элементов в таких средствах измерения применяются серийно выпускаемые силоизмерительные устройства (тензорезисторные датчики).

Измерительная часть таких устройств представляет собой цилиндрический упругий элемент с наклеенными на него тензорезисторами. Так, например, в составе большегрузных (автомобильных и железнодорожных) весов, промышленных дозаторов и силоизмерительных систем, чаще всего применяются осе симметричные тензорезисторные датчики с наибольшими пределами измерений 5–100 тонн. Такие датчики градуируются, испытываются и поверяются с применением силозадающих машин типа ОСМ 2-200-10, МЭС 500У, а также иных силовоспроизводящих систем в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений силы [1]. Силовоспроизводящие системы могут представлять собой установки непосредственного нагружения, силоумножающие (рычажные) установки, а также системы со встроенным эталонным датчиком (датчиками), показания которых сличаются с показаниями испытываемого силоизмерительного устройства. При этом рабочие пространства всех типов силозадающих машин не имеют существенных различий. На рисунке 1 представлен реверс силозадающей машины, предназначенный для работы с переносными силоизмерительными устройствами, работающими по принципу сжатия. Реверс составляют две тяги, верхняя и нижняя, каждая из которых, в свою очередь, состоит из двух балок (траверс) и двух колонн. Испытываемый датчик или динамометр устанавливается на поверхность нижней балки верхней тяги и затем на него накладывается верхняя балка нижней тяги.

Таким образом, выстраивается силопередающая цепь системы. На указанных рабочих поверхностях нанесена концентрическая разметка, позволяющая максимально точно совместить ось испытываемого силоизмерительного устройства с осью нагрузки в силовоспроизводящей системе. Однако, точность совмещения вектора приложения нагрузки с осью симметрии датчика или динамометра на данный момент является одной из проблем передачи единицы силы. Задачей устройства для измерений силы (прилагаемой нагрузки) является преобразование векторной величины (силы) в скалярную величину, то есть такую, которая однозначно описывается одним параметром. Измерения силы, строго говоря, представляют собой измерения суммарных значений полей механических напряжений.

При воспроизведении нагрузок в силозадающих машинах мы сталкиваемся с двумя аспектами векторного характера измеряемой (воспроизводимой) величины. Во-первых, отклонение опорной плоскости балки (траверсы) силозадающей машины, на которой установлен датчик, от горизонтального положения на угол α приводит к появлению эксцентриситета e , зависящего от геометрических параметров силопередающего узла и угла α , и поперечной

составляющей нагрузки $P \sin \alpha$, направленной в сторону наклона опорной плоскости. Это приводит к изменению характеристики преобразования тензорезисторного датчика, кроме того, приложенная нагрузка P , действующая на датчик, уменьшается на величину $P(1 - \cos \alpha)$. Описанное явление можно было бы значительно уменьшить при использовании тяг, состоящих из трех колонн, закрепленных в балках с поверхностью в форме многогранника или круга. Однако такая конструкция крайне усложнила бы установку испытываемых силоизмерительных устройств в рабочее пространство.

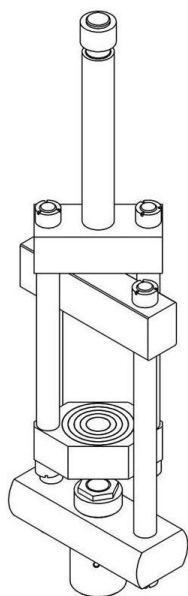


Рис. 1. Конструкция реверса силовоспроизводящей установки



Рис. 2. Эталонный силоизмерительный блок установки МЭС 5000УЗ

Во-вторых, остается открытым вопрос о проверке сохранности метрологических характеристик силоизмерительных устройств при невертикальном вводе вектора нагрузки. В ходе эксплуатации узлы встройки датчика могут изменять свое положение друг относительно друга из-за изменения линейных размеров элементов конструкции (например, вследствие влияния температуры), движения грунта и смещения фундамента, боковых ударов. Изготовители датчиков и других силоизмерительных устройств часто указывают предельные значения углов отклонения производимых ими устройств от вертикальной оси, при которых погрешность данных устройств остается в заданных пределах. Однако, при стандартной конструкции реверса силовоспроизводящих систем объективного и соответствующего действующим поверочным схемам метода проверки такой характеристики не существует.

Специалистами ФГУП «СНИИМ» было предложено использовать метод, аналогичный методу сличения измеряемой силы с группой параллельно установленных динамометров (чаще всего в количестве трех штук), применяемый для поверки и калибровки средств измерений, а также при изготовлении силозадающих установок.

Схема из трех параллельно установленных динамометров (тензорезисторных датчиков) является классической и теория такой схемы подробно описана, в частности в [2], [3]. Однако результатов экспериментальных исследований в технической литературе немного, что объясняется небольшим количеством средств измерений, изготавливаемых с использованием этой схемы, «штучностью» таких разработок.

При использовании метода измерения силы группой параллельно установленных динамометров (датчиков) возникает методическая погрешность вызываемая следующими факторами: несовпадением направления действия вектора силы с осью чувствительности динамометра (датчика), неодинаковой жесткостью, неровностями и деформацией опорных и промежуточных плит; несимметричностью установки динамометров относительно оси действия нагружающего устройства.

Способы оценки точности метода включают:

- На малых нагрузках сравнивают погрешность передачи силы с помощью группы динамометров (датчиков) некоторым образцовым средствам воспроизведения силы. Полученный результат экстраполируется на большие нагрузки,

- Для одних и тех же измерений используются группы динамометров различного принципа действия с последующим сравнением результатов,

- Сравниваются результаты при различных условиях передачи силы (перестановка динамометров в группе, изменение высоты динамометров с помощью прокладок и т. п.)

- Создаются условия для применения динамометров, тождественных условиям их градуировки на образцовых машинах (исследуются и исключаются факторы, отличающие использование динамометров в группе и отдельно). Производится контроль составляющих деформации упругих элементов динамометров с целью определения отклонения векторов сил от осей динамометров.

Приведенные специалистами ФГУП «СНИИМ» исследования подтверждают выводы [2] и [4], о возможности исключения всех факторов, отличающих метод измерений силы с помощью трех параллельно установленных динамометров (датчиков) от измерения силы одним динамометром (датчиком) [5]. В ФГУП «СНИИМ» разрабатываются и изготавливаются силозадающие машины типа МЭС–5000, МЭС-500, предназначенные для поверки, калибровки и исследования метрологических характеристик динамометров и силоизмерительных датчиков, а так же крановых весов. Для измерения силы в некоторых диапазонах используется схема из трех параллельно установленных тензорезисторных датчиков. Силоизмерительный блок такой установки представлен на рис. 2.

Аналогично предлагается исследовать метрологические характеристики силоизмерительных устройств при несовпадении вектора приложения нагрузки с осью устройства. Группа из трех (либо шести) устройств устанавливается параллельно в рабочем пространстве силовоспроизводящей системы. На

рабочую поверхность нижней балки верхней тяги накладывается силовводящий блок, включающий в себя узлы встройки датчиков, расположенные на равном друг от друга расстоянии в вершинах равностороннего треугольника. Датчики устанавливаются в узлы встройки и затем на них накладывается аналогичный верхний силовводящий блок, на который, в свою очередь, накладывается верхняя балка нижней тяги. Используя блоки с различными расстояниями между узлами встройки датчиков, либо блоки, позволяющие изменять это расстояние в процессе испытаний, можно задавать различные углы наклона испытываемых датчиков. Задаваемый угол рассчитывается из геометрических размеров силовводящих блоков и испытываемых силоизмерительных устройств. Таким образом, будут воспроизводиться различные условия работы датчика в реальных сило- и весоизмерительных системах с использованием средств передачи единицы величины в соответствии с поверочными схемами и описаниями типа на данные силоизмерительные устройства. Данный метод позволит при испытаниях в целях утверждения типа проверить задаваемые изготовителем предельные углы отклонения вектора прилагаемой нагрузки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.663-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений силы
2. Чаленко Н.С. Методы и средства измерений силы. – М.: Изд-во стандартов. – 1991. – С. 172.
3. Вишенков А.С. Методы и средства аттестации, поверки и испытаний силоизмерительных приборов. – М.: Изд-во стандартов. – 1985. – С. 181.
4. Талаев Г.А. Методическая погрешность измерения силы группой параллельно нагруженных датчиков // Измерительная техника. – 1980. – № 4. – С. 26 – 29.
5. Цибин И.Г. Передача единицы силы методом сличения с группой параллельно установленных динамометров / И.Г. Цибин, В.Л. Макурин, С. И. Пискунов, А.С. Ивлев, А.А. Коллер // Материалы 4-ой международной конференции «Информационные технологии, системы и приборы в АПК. АГРОИНФО-2009». – Новосибирск, 2009.

© А.А. Коллер, А.И. Каленицкий, В.Я. Черепанов, 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Антон Анатольевич Горбылев

Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА), 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант, тел. (923)149-63-42, e-mail: anton.gorbylev@mail.ru

В статье приводятся результаты исследования влияния вертикального градиента температуры на границу раздела фаз внутри ампул реперных точек температуры затвердевания металлов на примере реперной точки затвердевания индия.

Ключевые слова: эталон температуры, ампулы реперных точек затвердевания металлов.

RESEARCH VERTICAL TEMPERATURE GRADIENT INFLUENCE AT REPRODUCIBILITY OF TEMPERATURE OF FIXED POINTS OF METAL FREEZING

Anton A. Gorbylev

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA) 10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108. Russian Federation, graduate student, tel. +7(923)149-63-42, e-mail: anton.gorbylev@mail.ru

This article is about results of the research vertical temperature gradient influence at liquid-solid interface inside fixed point cells of freezing metal for example fixed point of freezing indium.

Key words: temperature standard, fixed point cells of metal freezing.

На базе ФГУП «СНИИМ» функционирует вторичный эталон единицы температуры ВЭТ 34-27-99, модернизация которого продолжается с 2009 года. В рамках модернизации был разработан программно-аппаратный комплекс ПТК-РТ, предназначенный для управления эталонами тепловых величин, в том числе для воспроизведения реперных точек затвердевания металлов.

В этом комплексе реализован новый алгоритм, который управляет нагревателями печи с учетом градиента температуры по высоте ампулы. На всех этапах реализации алгоритм работает таким образом, чтобы градиент стремился к нулю. В данной статье приводятся результаты исследований влияния разных величин вертикального градиента температуры по высоте ампулы на границу раздела фаз при воспроизведении реперных точек температуры затвердевания металлов.

В печи комплекса ПТК-РТ градиент температуры по высоте ампулы постоянно измеряется двумя датчиками, расположенными вблизи нижнего и верхнего торцов ампулы. Эти датчики были добавлены в систему после того, как было выяснено, что одинаковая температура нагревателей не гарантирует отсутствия температурного градиента внутри жаровой трубы. Как правило, в районе нижнего нагревателя температура всегда выше, т.к. снизу нет отвода

тепла. Поведение градиента температуры по высоте при одинаковой температуре нагревателей проиллюстрировано на рис. 1.

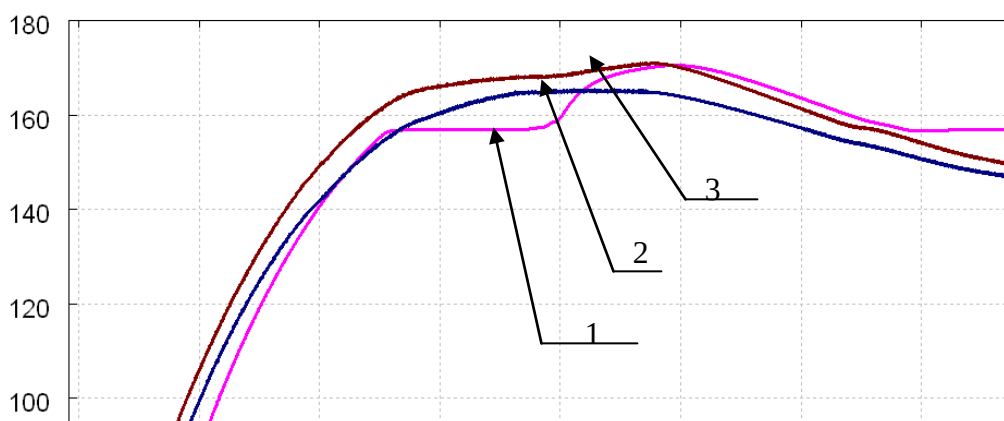


Рис. 1. Показания градиентных и контрольного датчиков при реализации реперной точки затвердевания индия в режиме одинаковой температуры нагревателей

Здесь цифра 1 обозначает график контрольного датчика температуры, цифра 2 – график датчика верхнего градиента и цифра 3 – график датчика нижнего градиента.

По рисунку видно, что в процессе плавления градиент температуры постепенно растет вместе с увеличением температуры внутри печи. В процессе плавления градиент постепенно выравнивается, в процессе перегрева снова растет и на площадке затвердевания опять уменьшается. На рисунке четко видно, что нижний конец ампулы всегда горячее верхнего. На практике величина градиента во многом зависит от конфигурации нагревателей, положения ампулы относительно них и тепловой изоляции.

Согласно документу Supplementary Information for ITS-90, в процессе реализации реперных точек затвердевания металлов, также как и в процессе реализации тройной точки воды, необходимо наличие двух границ раздела фаз – внешней и внутренней. Внешняя граница формируется за счет понижения температуры нагревателей ниже температуры затвердевания. Внутренняя граница формируется, например, за счет охлаждения канала ампулы погруженным термометром, за счет теплоотвода по подводящим проводам и за счет конвекции внутри измерительного канала.

Наличие обеих границ обязательно для стабильной площадки затвердевания. В процессе воспроизведения реперной точки движение внутренней границы обуславливается постоянным теплоотводом по поверяемому или контрольному термометру. Кроме того, в процессе проверки внутрь канала опускаются термометры с температурой ниже площадки затвердевания, что ускоряет движение внутренней границы. Чтобы увеличить длительность площадки затвердевания, необходимо максимально снизить скорость движения внешней границы раздела фаз. Это достигается за счет

поддержания температуры нагревателей, максимально близкой к температуре затвердевания.

Наличие градиента может спровоцировать смещение внешней границы раздела фаз таким образом, что металл с одного конца ампулы уже затвердеет полностью, в то время как с другого конца будет находиться в расплавленном состоянии. Такое смещение приведет к возникновению существенного градиента температуры внутри измерительного канала, что может привести к погрешности при поверке платиновых термометров сопротивления, у которых есть требование к минимальной глубине погружения.

Смещение границ влияет также и на повторяемость площадки затвердевания, т.к. со временем поведение нагревателей и теплоизоляции меняется, что приводит к изменению градиента температуры по высоте ампулы в процессе реализации.

Важным моментом является то, что ампулы чистых металлов получают размер единицы на оборудовании ВНИИМ, т. е. в отрыве от оборудования для реализации, в котором используются эти ампулы. Ампула может пройти поверку, но при неверном алгоритме реализации температура реперной точки может не соответствовать той, что указана в свидетельстве на ампулу.

В любом случае, использование алгоритма управления по градиенту температуры по высоте ампулы существенно увеличивает длительность площадки затвердевания за счет того, что границы раздела фаз двигаются параллельно друг другу.

Чтобы проследить влияние градиента на площадку затвердевания, необходимо непрерывно измерять температуру внутри измерительного канала на разной высоте. Для этого были использованы четыре малогабаритных платиновых термометра Pt100 Heraeus M220 Class B, предназначенные для измерения температуры в диапазоне от -70 до $+500$ °C. Для измерения сопротивления и преобразования сопротивления в температуру использовался специализированный многоканальный измеритель температуры ТМ-4.

Перед началом исследований термометры вместе с прибором были отградуированы сначала в тройной точке воды, потом в точке затвердевания индия, после этого еще раз в тройной точке воды, для проверки стабильности.

В процессе градуировки было выяснено, что датчики обладают отличной стабильностью. Прибор ТМ-4 имеет постоянное смещение измеряемой температуры между каналами в диапазоне от $-0,1$ °C до $+0,1$ °C. Однако это смещение постоянно для каждого из датчиков, а значит оно не может повлиять на результаты исследования.

Так как в процессе измерения датчики в любом случае проходят через этап площадки затвердевания, мы всегда можем в реальном времени оценить погрешность измерения температуры каждым датчиком. В любом случае, в данном исследовании наибольшую ценность представляет не абсолютное значение температуры, измеряемое каждым датчиком, а градиент температуры внутри измерительного канала, т.е. смещение температуры относительно контрольного датчика.

Датчики были помещены в стеклянную пробирку, засыпанную мелкодисперсным порошком оксида алюминия (имитатор термометра). Датчики были расположены на расстоянии 5,5 см друг от друга так, как показано на рис. 2.

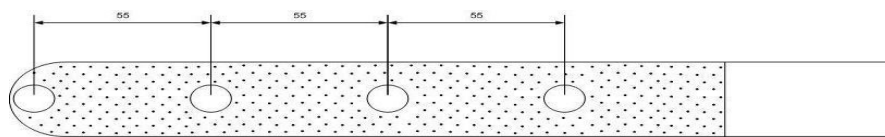


Рис. 2. Положение датчиков температуры внутри пробирки

Высота измерительного канала в ампуле индия составляет 200 мм, расстояние между крайними датчиками – 165 мм. Благодаря такому расположению возможно получить информацию о поведении границы раздела фаз в процессе фазового перехода.

В процессе исследования было выполнено 4 эксперимента – 2 с минимальным градиентом температуры, 1 с градиентом 7 градусов при горячем нижнем конце ампулы и 1 с градиентом 7 градусов при горячем верхнем конце ампулы. Во всех экспериментах средняя температура градиентных датчиков поддерживалась одинаковой.

Ниже представлены графики экспериментов. На всех графиках цифра 1 – это самый нижний датчик, цифра 2 – на расстоянии 55 мм от первого, цифра 3 – на расстоянии 55 мм от второго и цифра 4 – на расстоянии 55 мм от третьего, который расположен ближе всех к концу измерительного канала.

По оси X отложена ось времени, по оси Y – температура.

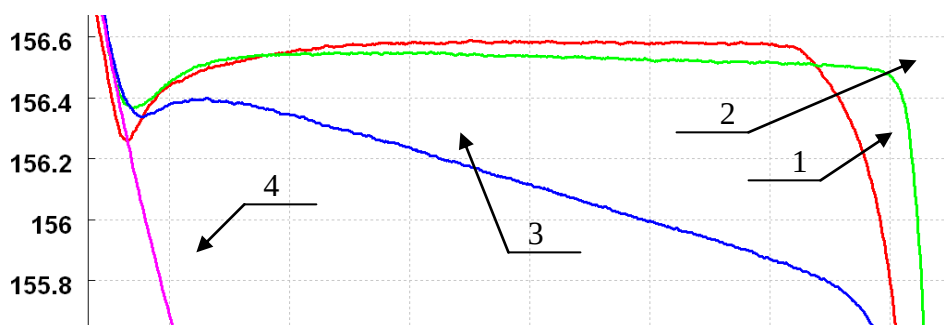


Рис. 3. Эксперимент 1 с минимальным градиентом (28.02.2012)

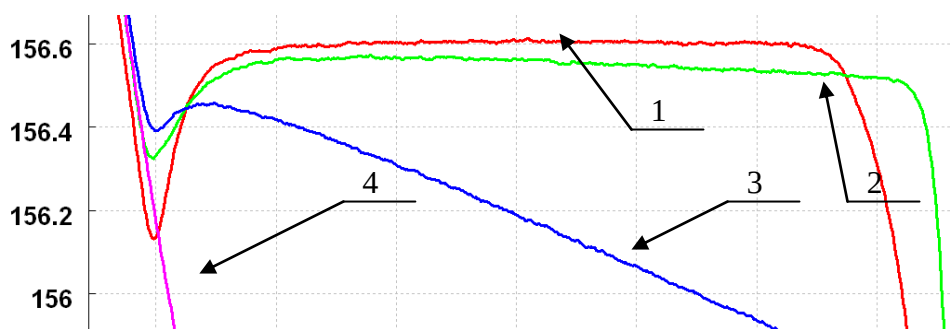


Рис. 4. Эксперимент 2 с минимальным градиентом (05.03.2012)

По рис. 3 и 4 видно, что площадка затвердевания держится стабильно по всей длительности площадки на расстоянии как минимум 60 мм от дна измерительного канала.

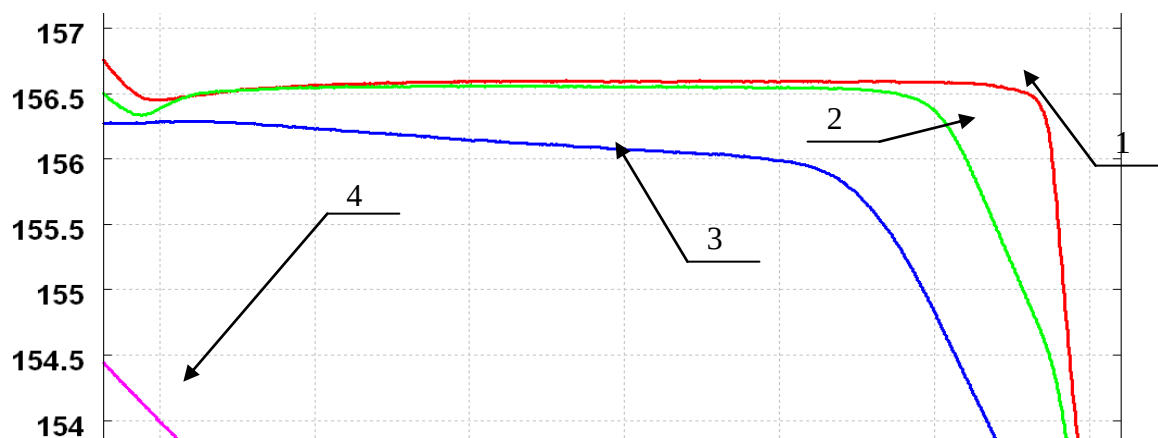


Рис. 5. Эксперимент 3 с градиентом 7 градусов с более горячей нижней частью (29.02.2012)

На рис. 5 видно, что уже к началу площадки затвердевания датчик 4 имеет температуру на 2 градуса ниже температуры площадки. Кажется, что площадка затвердевания на этом графике длится дольше (если судить по датчику 1), но на самом деле это не так – длительность площадки меньше на 1-1,5 часа. Кроме того, если поместить один и тот же ПТС 1-го разряда в начале и в конце площадки, он покажет разные значения температуры из-за того, что затвердевание в верхнем конце ампулы закончится раньше.

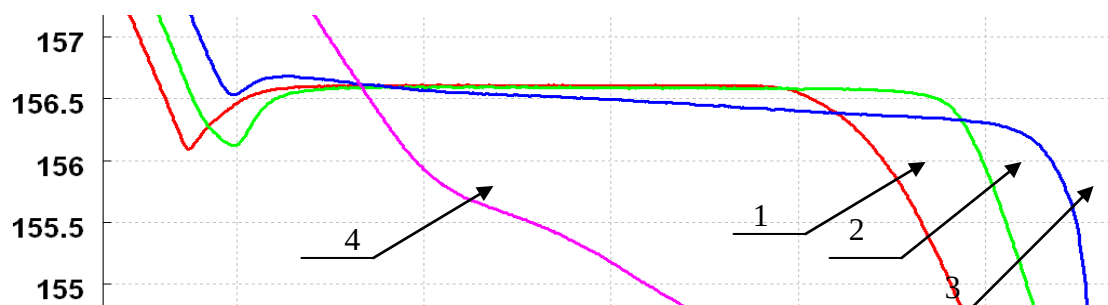


Рис. 6. Эксперимент 4 с градиентом в 7 градусов с более горячей верхней частью (01.03.2012)

На рис. 6 видно, что площадка затвердевания на дне измерительного канала кончается значительно раньше, чем в верхней его части, к началу площадки затвердевания температура датчика 4 выше температуры площадки на 2 градуса.

Представленные графики подтверждают существенное влияние градиента температуры по высоте ампулы на границу раздела фаз и, как следствие, на градиент температуры внутри измерительного канала. Существенное влияние оказывается и на длительность площадки затвердевания.

Данные эксперименты проводились при градиенте 7 градусов, т.к. такой градиент был зафиксирован в печи при работе «классического» алгоритма – поддержании одинаковой температуры на всех нагревателях. В другой печи при этих же условиях градиент может быть значительно выше, особенно при высоких температурах. В дальнейшем эти исследования будут продолжены на реперных точках затвердевания металлов олова, цинка и алюминия.

КОРРЕЛЯЦИИ В ДВИЖЕНИИ ЗЕМНЫХ ПОЛЮСОВ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРИРОДНЫМИ ФАКТОРАМИ

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, ул. Димитрова 4, кандидат технических наук, тел. (383) 229-75-30

В статье показаны взаимосвязи, имеющие место в сложной динамике вращения Земли в космическом пространстве и различными физическими процессами, происходящими на Земле и в Солнечной системе. Рассмотрены вопросы о возможном влиянии природных катаклизмов, наблюдающихся в последние десятилетия на изменение некоторых геофизических и космических параметров. Наряду, с обзором имеющихся в литературе материалов, приводятся результаты исследований, полученные автором.

Ключевые слова: Земля, вращение, корреляция, координаты полюса.

CORRELATION IN THE MOVEMENT OF THE EARTH'S POLES AND EARTH ROTATION SPEED WITH NATURAL FACTORS

Viktor M. Tissen

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, Siberian Scientific-Research Institute of Metrology, 630004, Novosibirsk, 4 Dimitrova Ul., c.t.s., tel. (383) 229-75-30

The article tries to show the breadth and depth of relationships occurring in complex dynamics of rotation of the Earth in outer space and various physical processes on Earth and in the solar system. Questions about the possible impact of natural disasters in the past decade to some applications of geophysical and space options. Together with a review of the literature in materials, research results obtained by the author.

Key words: Earth, rotation, correlation, the coordinates of the pole.

Земля в своем бесконечном вращении в космическом пространстве совершает множество колебательных движений различной амплитуды и частоты. Ось вращения Земли постоянно изменяет свое положение в пространстве, совершая так называемые прецессионные и нутационные движения. На рис. 1 показана схема перемещения полюса мира Р (точки пересечения оси вращения с небесной сферой) по неподвижной небесной сфере. Полюс мира обращается вокруг полюса эклиптики П против часовой стрелки с периодом 25 700 лет, который называют периодом прецессии. На это движение накладываются небольшие нутационные колебания с периодами от 18.6 года до 4 суток [1].

Причина, порождающая явление прецессии и нутации возникает из-за того, что фигура Земли не является идеальным шаром, а близка к эллипсоиду

вращения. Это приводит к тому, что когда Луна и Солнце не лежат в плоскости земного экватора, то их силы притяжения стремятся развернуть Землю так, чтобы экваториальные вздутия фигуры располагались по линии, соединяющей центры масс Земли, Луны и Солнца. Действие этих сил на вращение Земли и приводит возникновению прецессии земной оси.

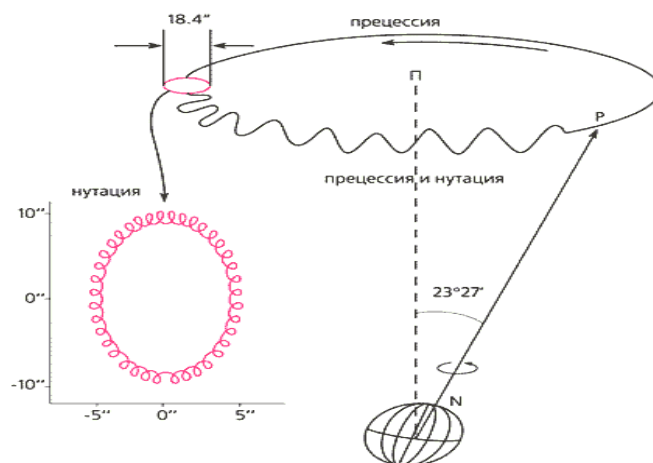


Рис. 1. Схема движения оси вращения Земли в пространстве

Вследствие колебаний моментов сил тяготения наблюдаются нутации оси вращения Земли, которые складываются из ряда небольших периодических колебаний, главный из которых имеет период 18.6 года. Далее по порядку убывания амплитуды следуют гармонические компоненты с периодом 0.5 года, 13.7 суток, 9.3 года, 1 год, 27.6 суток и т. д. Из-за них траектория движения полюса мира имеет вид “тонких кружев” (показано на увеличенном фрагменте в левой части рисунок 1). Таким образом, ось вращения Земли описывает на небесной сфере сложную волнообразную траекторию, точки которой находятся на угловом расстоянии в среднем около $23^{\circ}27'$ от полюса эклиптики.

Кроме прецессионных и нутационных колебаний, земная ось перемещается по спирали относительно средних географических полюсов. В левой части рис. 2, точками показано движение полюса Земли в 1996–2000 гг.; сплошная линия отображает траекторию среднего полюса с 1890 по 2000 гг. [2], а в правой части (программный график) с 2006 по 2012 г.

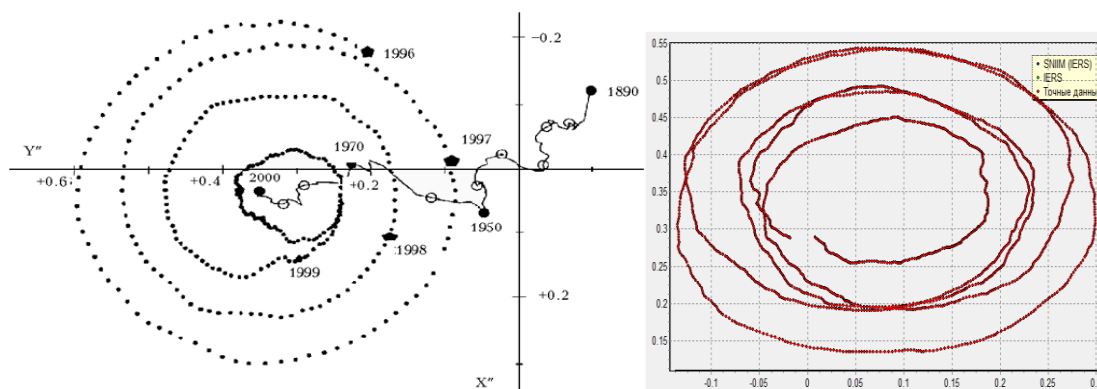


Рис. 2. Движение северного полюса Земли

Анализируя данные на рис. 2, можно отметить, что в течение всего периода наблюдений средний полюс смещался со скоростью около 10 см/год по сложной зигзагообразной кривой с преобладающим направлением в сторону Северной Америки (меридиан 290° в.д.) [1]. Главными из периодических движений северного полюса являются свободное чандлеровское колебание с периодом около 1,2 года и вынужденное годовое, возникающее вследствие орбитального вращения Земли вокруг Солнца. Сложение этих двух периодических движений и определяет в основном вид спирали, по которой происходит движение северного полюса.

Скорость вращения Земли также не остается постоянной. Вследствие этого Земля вращается неравномерно и длительность суток все время изменяется. Для оценки неравномерностей вращения определяют уход неравномерной шкалы времени всемирного времени относительно шкалы координированного равномерного времени, который называют поправкой часов $dUT1$. В прежние века поправка часов в системе неравномерного всемирного времени $UT1$ вычислялась относительно более равномерной системы TE . Ошибки наблюдений и неточности принятых теории движения Луны и планет искажали равномерность шкалы TE . Тем не менее, благодаря сохранившимся с середины семнадцатого века астрономическим наблюдениям, мы имеем сегодня возможность хотя бы приблизительно воссоздать картину вращения Земли за последние 350 лет.

На рис. 3 приведен график, изменений параметра $dUT1$ с 1656 г. по настоящее время в системе равномерного земного динамического времени TT [2].

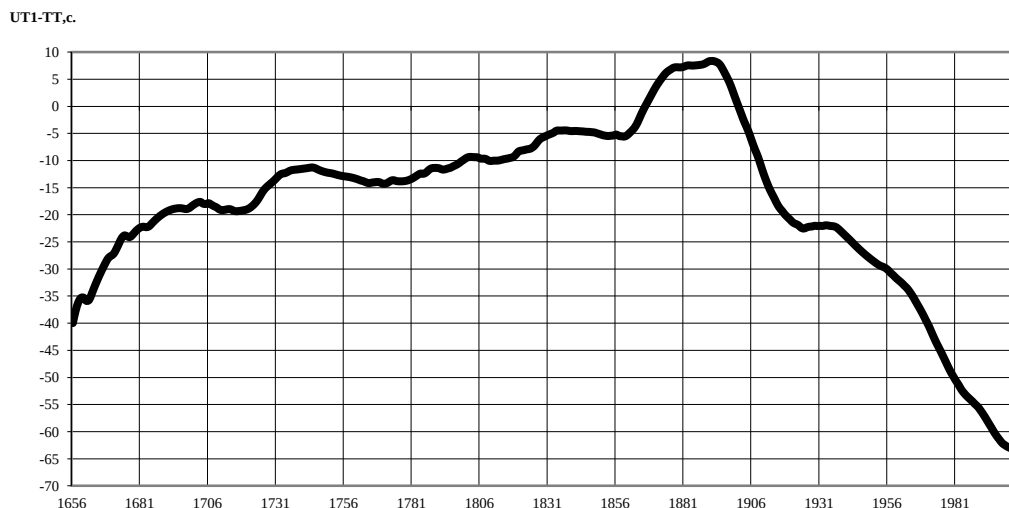


Рис. 3. Неравномерности вращения Земли за период 1650-2010 гг.

Из данных графика на рис. 3 следует, что в прошлые века скорость вращения Земли изменялась относительно равномерно и незначительно вплоть до конца девятнадцатого века, когда произошло ее резкое замедление. За последние 100 лет прослеживаются периоды замедления и ускорения скорости вращения Земли с характерными временами порядка 20-30 лет. В настоящее время Земля замедляет свое вращение, которое вероятно будет продолжаться еще от 15 до 20 лет. Причинами неравномерностей вращения Земли многие авторы связывают с такими природными процессами как изменение в распределении воздушных масс в атмосфере, снежного и ледяного покровов, осадков и растительности на земной поверхности, вариации уровня Мирового океана, взаимодействие ядра и мантии Земли, извержения вулканов, землетрясения, воздействия внешних сил и других природных факторов [3].

На рис. 4 приведены графики изменений ПВЗ за 6 летний период (сверху вниз всемирное время, координаты полюса X и Y соответственно) относительно сглаженных кривых.

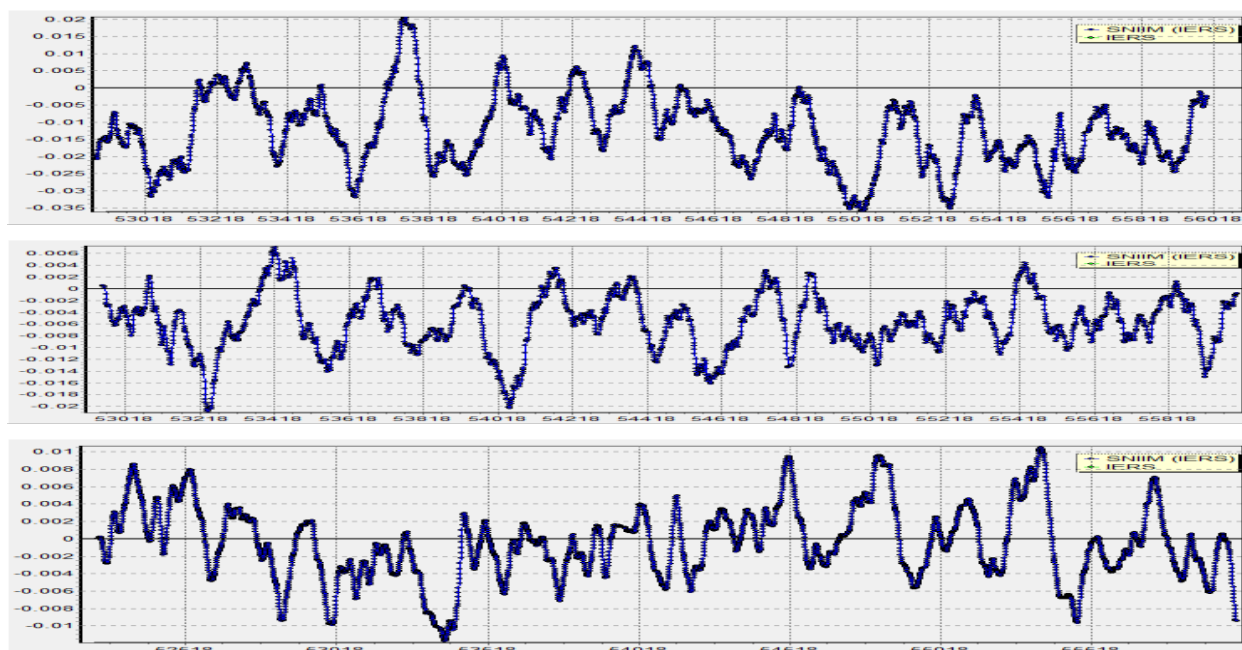


Рис. 4. Изменения ПВЗ с 2006 по 2012 г.

Из анализа графиков следует отметить, что изменения координат полюса по обоим компонентам имеют схожую структуру, наполненную высокочастотными составляющими, в то время как изменения параметра $dUT1$ имеют более сглаженный вид, что можно объяснить доминированием в их составе низкочастотных изменений.

На рис. 5 и 6 приведены графики возбуждающей функции углового момента атмосферной циркуляции за период с декабря 2011 по март 2012 г.

Приведенные графические данные представлены, также в текстовых файлах, на сайте: <ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/ig/ops>. Статистическая обработка этих данных совместно с данными изменений ПВЗ показала присутствие между ними корреляционных связей. Аналогичные связи наблюдаются, также и другими природными факторами, в частности: океанической и гидрологической циркуляции, массовыми переносами тепла и др. Более подробный качественный и количественный анализ этих связей в предусмотренных объемах данной статьи выполнить не представляется возможным. Поэтому автор привести результаты этой работы в следующих статьях.

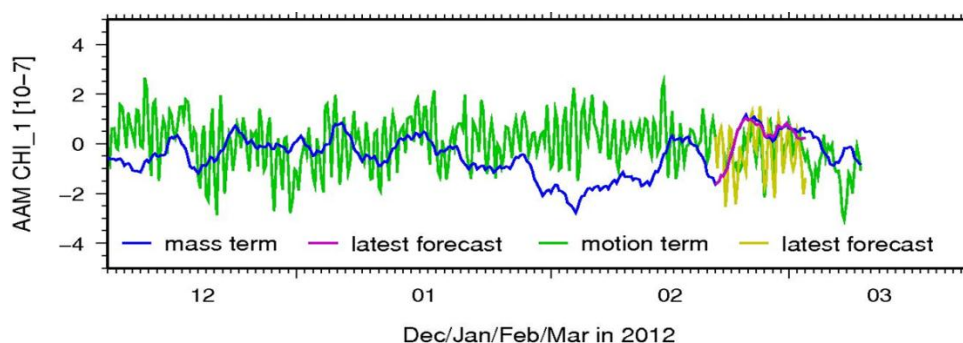


Рис. 5. Изменения углового момента атмосферной циркуляции по поверхности Земли

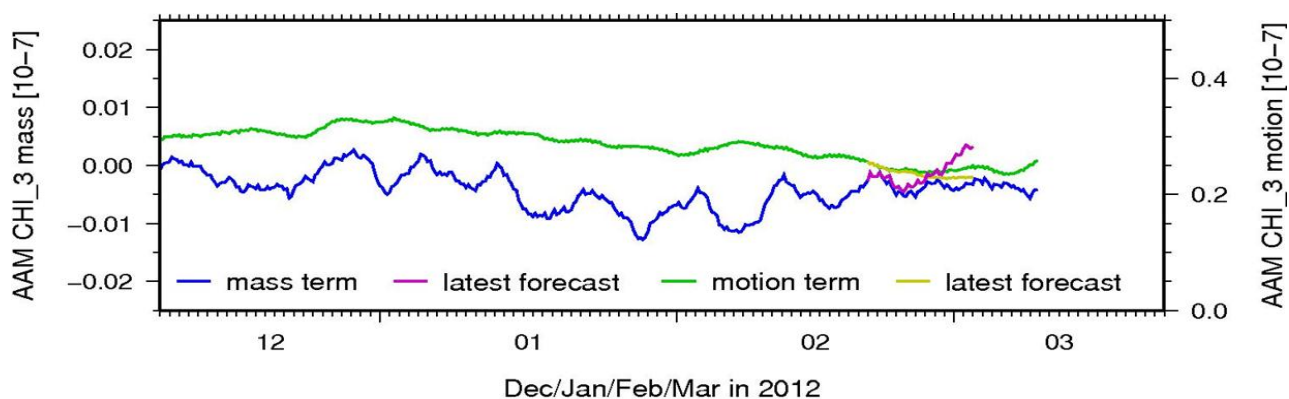


Рис. 6. Изменения углового момента атмосферной циркуляции по высоте

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. – М.: Наука, 2002. – 320 с.
2. McCarthy, D. (2003). Earth Orientation Parameters Prediction Research / D. D. McCarthy, G. Petit // IERS Conventions (2003). – Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. p. 144-148, IERS Technical Note No. 32.
3. Шулейкин В.В. Взаимодействие звеньев в системе «Океан–Атмосфера–Материки». – Природа, № 10/71.
4. Dill, R., Dobslaw, H. (2010), Short-term Polar Motion Forecasts from Earth System Modeling Data, J. Geodesy, 84, 9, 529 - 536, doi:10.1007/s00190-010-0391-5.
5. Тиссен В. М., Толстиков А. С., Малкин З. М. Опыт краткосрочного и долгосрочного прогнозирования параметров вращения Земли // Сб. материалов III Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007 г. Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 2. – С. 92-95.

© В.М. Тиссен, 2012

ПРИНЦИП РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Бронислав Сергеевич Могильницкий

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, ФГАОУ АСМС, Новосибирский филиал, Новосибирск, ул. Революции, 36., кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, тел. 212-51-09, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru

В статье рассмотрен принцип регистрации информационных сверхкоротких лазерных импульсов нано-, пико-, фемтосекундного диапазона длительностей оптическими методами.

Ключевые слова: сверхкороткие лазерные импульсы, интерферометр Фабри – Перо, частотный и пространственный спектр импульса, интерференционная картина, голограмма.

PRINCIPLE OF REGISTRATION OF SUPERSHORT LASER PULSES

Bronislav S. Mogilnitsky

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, Academy of standardization, metrology, certification, Novosibirsk branch, Revolution street, 36, 630004, the candidate of physical and mathematical Sciences, head of the Department, tel. 212-51-09, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru; Siberian State Academy of Geodesy (SGGA), 10 Plakhot-nogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

In article the principle of registration of information supershort laser impulses nano- piko- a range of femtosecond duration is considered by optical method.

Key words: ultrashort laser pulses, Fabry-Perot interferometer, the frequency and spatial spectrum of the pulse, the interference pattern, a hologram.

Одной из главных задач на пути широкого использования лазерных сверхкоротких импульсов (СКИ) света является разработка принципиально новых методов и устройств для исследования формы импульсов лазерного излучения с пикосекундным и фемтосекундным разрешением.

Согласно современным представлениям временная форма сверхкороткого импульса формируется из частотного спектра импульса с помощью преобразований Фурье [2].

В области пико- и фемтосекундных длительностей из-за фазовой модуляции частоты генерации вследствие дисперсии лазерного кристалла (чирп) частотные интервалы продольных мод лазера не являются эквидистантными. Возможность формирования эквидистантной решетки частот спектра импульсов представлена в [3].

Для регистрации и анализа формы СКИ интенсивно разрабатываются оптические методы. Так в работе [4] изложен метод разложения формы СКИ в пространственный спектр дискретных компонент эквивалентных частотному

спектру СКИ. Возникающая при этом интерференционная картина пространственных компонент и представляет временную форму СКИ.

Разложение оптического импульса на монохроматические компоненты, существующие одновременно и независимо, связано с разделением их в пространстве. Это осуществляется с помощью оптического спектрального прибора (призма, дифракционная решетка, ИФП) [5]. На рис. 1 представлен принцип разложения СКИ в спектр пространственных компонент.

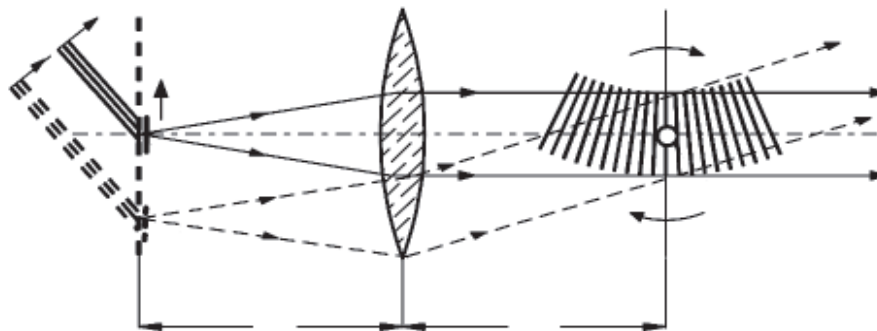
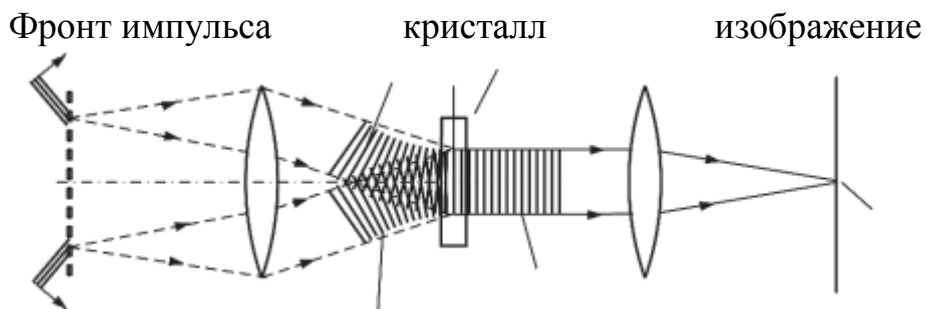


Рис. 1. Схема разложения СКИ в пространственный спектр

Плоский фронт СКИ направлен под некоторым углом к плоскости дифракционной решетки. В результате дифракции на соседних щелях формируются световые когерентные потоки, сфокусированные линзой в излучение с плоскими волновыми фронтами, которые интерферируя, создают пространственную интерференционную картину. При распространении фронт импульса «пробегают» щели решетки снизу вверх по направлению стрелки, вращая дифракционную волну вокруг точки заднего фокуса линзы. При симметричном направлении фронта СКИ относительно оси линзы интерференционная волна вращается в противоположном направлении. Одновременное попадание фронтов СКИ на плоскость решетки под противоположными равными углами создает плоскопараллельную дифракционную волну регистрируемую на информационном носителе: фотопленка, фотоматрица, кристалл и др. (рис. 2).



2-ая гармоника

Рис. 2. Сверхбыстрое время-пространственное преобразование

При прохождении скомпенсированных дисперсий световых потоков через нелинейный кристалл возникает третий плоскопараллельный поток на удвоенной частоте (вторая гармоника излучения) [4].

Вся информация о временной (частотной) форме импульса содержится в интерференционной картине, которую необходимо расшифровать. Для этого может быть использован метод спектральной голографии [6] (рис. 3).

Первый этап – регистрация спектральной голограммы.

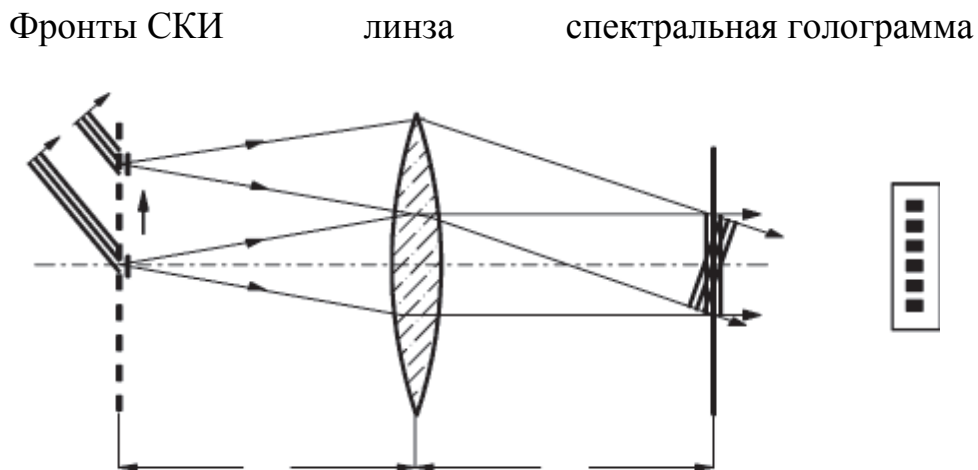


Рис. 3. Регистрация спектральной голограммы

В этом случае на вход дифракционной решетки падают два одинаковых СКИ, разделенных временным интервалом T (период следования синхронизированных импульсов), который должен быть меньше времени пробега фронта импульса щелей решетки. Один из них (первый) информационный, а второй – опорный, не участвующий в акте отражения от исследуемой поверхности. Спектр голограммы содержит запись Фурье-спектра информационного импульса относительно спектра опорного импульса.

Когда оба импульса имеют одинаковую дельтообразную форму, спектральная голограмма представляет собой последовательность равноотстоящих полос (рис. 3, справа). Если форма информационного импульса отличается от формы опорного, то это отразится на виде последовательности интерференционных полос – расстояние между ними изменится.

В работе [7] показано, что при математической обработке спектральной голограммы определяется форма СКИ. Спектральная голограмма – двухступенчатый процесс, включающий запись СКИ и его оптическое восстановление в виде реальной копии [8]. Использование интерферометра Фабри-Перо (ИФП) для регистрации и восстановления наносекундных СКИ представлено в [9].

Расшифровка формы импульса осуществляется разработанными математическими методиками обработки интерференционных изображений, например [10].

Различие в форме и длительности опорного и информационного импульсов – результат акта взаимодействия СКИ с исследуемой средой. Точное измерение длительности сверхкоротких лазерных импульсов изложено в [11,12].

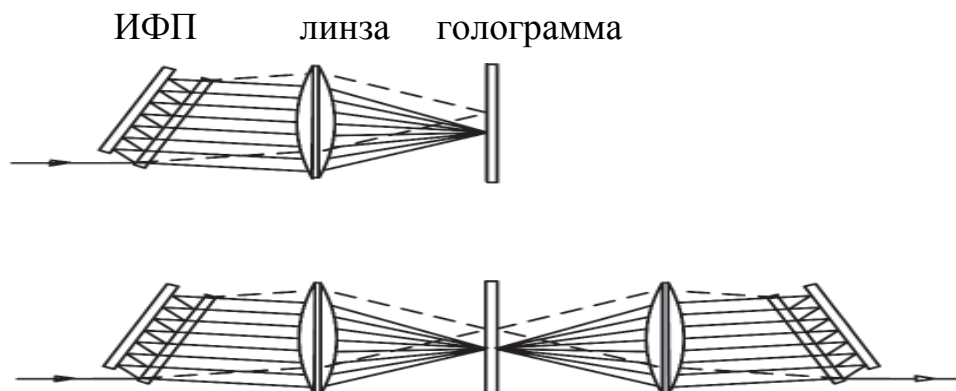


Рис. 4. Спектральный прибор для записи голограммы (вверху): ИФП с боковым входом, Фурье-линза, голограмма; спектральный прибор для восстановления голограммы (внизу рисунка): здесь два ИФП, две линзы и голограмма

Итак, основная информация о взаимодействии когерентного излучения сверхкороткой длительности с исследуемой средой определяется изменением временной формы отраженного СКИ. Разработанные к настоящему времени оптические методы анализа формы СКИ, решают фундаментальную проблему сегодняшнего дня – проблему получения информации, заключенную в форме и длительности сверхкороткого импульса света.

В заключение отметим, что интерферометр Фабри-Перо является удобным устройством для спектрально - временного анализа сверхкоротких информационных лазерных импульсов. Такой анализ для наносекундных импульсов представлен в [13]. Особенности его работы при импульсном освещении изложены в работах [14,15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Парафанова, В. Петабаты, фемтосекунды и термояд. [Текст] / В. Парафанова // Наука и жизнь. – 2004. – № 4.
2. Сверхкороткие световые импульсы, под ред. С Шапиро. – М.: Мир, 1981. – С. 38.
3. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M.et al.// Appl.Phys.B. 2000. V. 70. – P. 375.
4. Мазуренко Ю.Т. Спектральная когерентная оптика [Текст]. Ю.Т Мазуренко // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 10 – С. 5–12.
5. Мазуренко Ю.Т. Нелинейная оптика спектрально разложенных волновых пакетов. [Текст] Ю.Т Мазуренко // Оптика и спектроскопия. – 1985. – Т. 59. – Вып. 1. – С. 57–61.
6. Mazurenko Yu.T. Holography of wave packets// Appl.Phys. – 1990. –V. B59. –№ 2. – P. 101–114.
7. Frochly C., Colombeau B., Vainpouille M. Shapping and analisis of picosecond light pulses // Proccess in Optics. – 1983. – V. 20 – P. 63–153.
8. Mazurenko Yu.T. et al. Spectral holography of pico- and nanosecond optical pulses//Optics and Laser Techn. – 1996. – V. 218. – № 4. – P. 285-290.

9. Мазуренко Ю.Т. Анализ формы сверхкоротких импульсов методом спектральной интерферометрии. [Текст]. Ю.Т. Мазуренко, С.Э. Путилин, А.Г. Пельменев, В.Н. Шехтман // Оптика и спектроскопия. – 2000. – Т. 89. – № 4. – С. 666-672.
10. Киричук В.С. и др. [Текст] В.С. Киричук // Автометрия. – 1973. – № 1. – С. 63.
11. Могильницкий Б.С. Измерение некоторых параметров сверхкоротких лазерных импульсов [Текст] / Б.С. Могильницкий // Сборник материалов VI Международного научного конгресса “Гео-Сибирь-2010”. – Новосибирск: 2010, – Т. 5. – Ч. 2. – С. 143-146.
12. Могильницкий Б.С. Импульсная интерферометрия: возможности и их реализация. [Текст] / Б.С. Могильницкий // Материалы X международной научно-технической конференции (АПЭП – 2010). Новосибирск. – 2010. – Т. 3. – С. 60.
13. Беспалов В.Г. Спектрально-временной анализ переходных процессов в интерферометре Фабри-Перо. [Текст] / В.Г. Беспалов, Ю.Н. Ефимов, Д.И. Стаселько // Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т. 90. – № 4. – С. 690-698.
14. Могильницкий Б.С. Интерферометр Фабри-Перо при импульсном освещении: новый подход и возможности [Текст] / Б.С. Могильницкий // Измерительная техника. – 2009. – № 12. – С. 11-15.
15. Mogilnitsky B.S. Fabry-Perot Interferometer in the World of Pulses: New Approaches and Capabilities. [Text] / B.S. Mogilnitsky, Ju.N. Ponomarev // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2009. – V. 22. – № 5. – PP. 544-550.

© Б.С. Могильницкий, 2012

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ

Анна Дмитриевна Зонова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383) 361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383) 361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

В статье рассмотрена методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом. Приведён пример обработки результатов и рассчитаны относительные погрешности измерений.

Ключевые слова: накладные датчики, отопительная система, неразрушающий метод, методика измерений, тепловая мощность, массовый расход, относительная погрешность измерений.

EXPRESS-MEASUREMENTS METHODS OF HEAT POWER HEATING INSTRUMENT OF A NON-DESTRUCTION METHOD

Anna D. Zonova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, postgraduate student of department «Metrology, standardization and certification», tel. (383) 361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, Ph-doctor, professor, director of department «Metrology, standardization and certification», tel. (383) 361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

In article is considered express-measurements methods of heat power heating instrument of a non-destruction method. It's given the example of processing results and calculated relative errors.

Key words: additional sensors, heating system, a non-destruction method, methods of the measurements, performing the measurements, heat power, mass consumption, relative error.

В настоящее время существует несколько методов измерения тепловой мощности в водяных системах отопления. Главным образом, используют метод, для которого необходимо нарушать целостность отопительной системы с целью установки в неё датчиков температуры и расхода. Использование таких «врезных» средств измерений позволяет провести измерения параметров теплоносителя и рассчитать тепловую мощность, выделяемую отопительной системой. Для определения тепловой мощности отдельного отопительного

прибора такой метод непригоден из-за высокой стоимости используемых средств измерений. Поэтому актуальной является задача разработки новых неразрушающих методов и средств определения эффективности работы отопительных приборов, позволяющих оперативно оценивать их работоспособность на основе использования накладных датчиков. Используемый для этих целей ультразвуковой метод с накладными датчиками имеет существенный недостаток. При его реализации необходимо знать свойства материала, из которого изготовлен трубопровод. Кроме этого, стенки трубопровода не должны содержать коррозии и накипи.

Предложенный в [1] неразрушающий теплотрический метод, основанный на использовании накладных датчиков температуры и теплового потока (ДТП), не имеет указанных недостатков. Сущность метода заключается в следующем (рисунок 1).

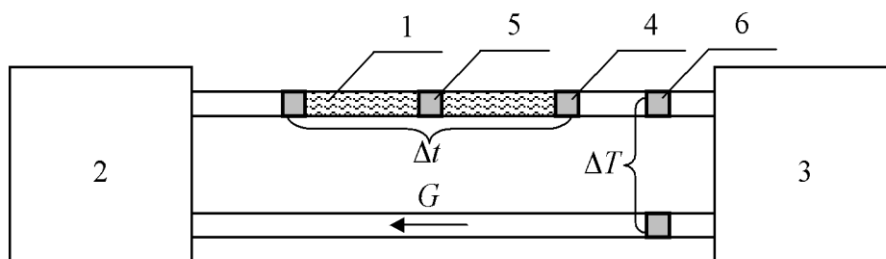


Рис. 1. Схема устройства для реализации неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения

На поверхности участка трубопровода 1, соединяющего систему теплоснабжения 2 с отопительным прибором 3, размещают накладные датчики температуры 4 и датчик теплового потока 5. Этот участок трубопровода выполняет функцию расходомерного. Расстояние между датчиками температуры выбирается достаточным, чтобы зафиксировать малый перепад температуры Δt на поверхности расходомерного участка, возникающий из-за потери тепла с его поверхности в окружающую среду, которая характеризуется мощностью P_G . Кроме этого, на входе и выходе отопительного прибора (ОП) также устанавливают накладные датчики температуры 6.

Тепловую мощность P_G , выделяемую на расходомерном участке, определяют по известной формуле [2]

$$P_G = K_S G \Delta t, \quad (1)$$

где K_S – коэффициент, учитывающий калорические свойства теплоносителя (для воды его часто называют коэффициентом Штука) и зависящий от давления и температуры теплоносителя; G – массовый расход теплоносителя.

С другой стороны тепловая мощность P_G связана с плотностью теплового потока q соотношением

$$P_G = q F = K E F = K E \pi d l_G, \quad (2)$$

где F – площадь поверхности расходомерного участка; K – коэффициент преобразования ДТП, Вт/(м²·мВ); E – электрический сигнал датчика; d – диаметр трубы; l_G – длина расходомерного участка.

С учётом этого из (1) следует, что значение длины l_G расходомерного участка равно

$$l_G = \frac{K_S G \Delta t}{K E \pi d}. \quad (3)$$

Значения разности температуры Δt и длины l_G расходомерного участка выбирают исходя из возможностей измерителя сигналов и чувствительности S датчиков температуры. Если измеритель имеет погрешность 1 мкВ, а датчик разности температуры, содержащий 7 пар спаев дифференциальных медь-константановых преобразователей, – чувствительность около 300 мкВ/°С, то погрешность измерений разности температуры составит около 0,0035 °С. Следовательно, при разности температуры в 0,1 °С относительная погрешность её измерений составит 3,5 %.

Мощность P_x отопительного прибора определяют по формуле, аналогичной (1):

$$P_x = K_S G \Delta T, \quad (4)$$

где ΔT – разность температуры на входе и выходе ОП.

Расход теплоносителя (в данном случае массовый расход), как следует из (1), определяют по формуле

$$G = \frac{P_G}{K_S \Delta t}. \quad (5)$$

Таким образом, подставляя значения массового расхода G и тепловой мощности P_G в формулу (4), получают искомое значение выделяемой ОП тепловой мощности

$$P_x = \frac{P_G \Delta T}{\Delta t} = \frac{q F \Delta T}{\Delta t}. \quad (6)$$

На этом методе основано устройство для неразрушающего контроля параметров теплоносителя в системах теплоснабжения, которое может быть использовано в качестве стационарного средства измерений, например, при поквартирном учёте тепла, или переносного прибора для экспресс-измерений при энергоаудите систем отопления. Устройство представляет собой систему накладных дифференциальных медь-константановых термоэлектрических датчиков и измерительного прибора, регистрирующего их сигналы. Для практического использования этого устройства для измерений тепловой мощности отопительных приборов разработана методика, которая, в соответствии с ГОСТ Р 8.563–2009 [3], должна содержать описание совокупности операций, направленных на получение значений измеряемых величин с заданной точностью. В данном случае такими измеряемыми величинами являются, прежде всего, мощность отопительного прибора, а также

другая важная для энергоаудита физическая величина – расход теплоносителя в системе отопления.

При подготовке к выполнению измерений проводят следующие операции. В первую очередь, проверяют условия измерений, а также рабочее состояние и настройку используемого измерительного прибора в соответствии с руководством по эксплуатации. Затем на прямолинейный расходомерный участок трубопровода, а также на трубопроводах непосредственно перед входом и после выхода из отопительного прибора устанавливают датчики согласно рисунку 1. Датчики температуры изолируют от влияния окружающей среды теплоизоляционным материалом и подключают к многоканальному измерителю, например, В7-99. Измеритель предназначен для измерений ТЭДС датчиков с погрешностью не более 1 мкВ и позволяет выводить результаты как на дисплей прибора, так и, при необходимости, на монитор компьютера.

Значения разности температуры, измеряемые датчиками температуры, рассчитывают по формулам

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{n_1 S_1}, \quad (7)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta e}{n_2 S_2}, \quad (8)$$

где ΔE и Δe – ТЭДС датчиков, расположенных на расходомерном участке и отопительном приборе, соответственно; n_1, n_2 – общее число пар спаев в датчиках температуры; S_1, S_2 – чувствительность одиночных термопар, используемых в этих датчиках.

Подставляя выражения (2), (7) и (8) в формулу (6), получают

$$P_x = \frac{K E F \Delta E n_2 S_2}{n_1 S_1 \Delta e}. \quad (9)$$

При условии, что $n_1 = n_2$, $S_1 = S_2$, уравнение измерений тепловой мощности, выделяемой теплоносителем на поверхности отопительного прибора, принимает вид

$$P_x = \frac{K E F \Delta E}{\Delta e} = \frac{K E \pi d l_G \Delta E}{\Delta e}. \quad (10)$$

Массовый расход теплоносителя определяют по формуле

$$G = \frac{K E F}{K_S \Delta t} = \frac{K E \pi d l_G}{K_S \Delta t}. \quad (11)$$

Обработку измеренных значений электрических сигналов датчиков осуществляют способом электронного регистрирования в документе MS Excel. При этом выполняется автоматическая подстановка этих значений в уравнения измерений (10) и (11) с указанием в данном документе необходимых дополнительных параметров (чувствительность S и общее число пар спаев n дифференциальных термопар, значения температуры в помещении $t_{ном.}$ и на улице $t_{сред.}$), а также с представлением полученных результатов в графическом виде. Результаты измерений оформляют в следующем виде (табл. 1).

Важной составляющей в определении достоверности результатов измерений является расчёт их погрешностей, в данном случае, относительной погрешности измерений тепловой мощности δ_{P_x} и массового расхода δ_G [4].

Таблица 1. Измеряемые параметры и полученные результаты

Δe , мкВ	ΔE , мкВ	E , мВ	Δt , °С	ΔT , °С	q , Вт/м ²	P , Вт	G , кг/с
38,6	765	0,903	0,123	2,43	181	247	0,024
Доп. параметры							
$n \cdot S$, мкВ/°С	315		K , Вт/(м ² ×мВ)	200		$t_{ном.}$, °С	+22
F , м ²	0,07		K_S , Дж/(кг×К)	4200		$t_{сред.}$, °С	-15

Из уравнения (10) следует, что относительная погрешность измерений тепловой мощности равна

$$\delta_{P_x} = 1,1 \sqrt{\delta_K^2 + \delta_E^2 + \delta_d^2 + \delta_{l_G}^2 + \delta_{\Delta E}^2 + \delta_{\Delta e}^2}, \quad (12)$$

где δ_K – погрешность измерений коэффициента K ; δ_E – погрешности измерений E ; δ_d – погрешность измерений d ; δ_{l_G} – погрешность измерений l_G ; $\delta_{\Delta E}$ – погрешность измерений ΔE ; $\delta_{\Delta e}$ – погрешность измерений Δe , соответственно.

Из уравнения (11) рассчитывают относительную погрешность массового расхода теплоносителя

$$\delta_G = 1,1 \sqrt{\delta_K^2 + \delta_E^2 + \delta_d^2 + \delta_{l_G}^2 + \delta_{\Delta t}^2}, \quad (13)$$

где $\delta_{\Delta t}$ – погрешность измерений Δt на расходомерном участке. Значения указанных погрешностей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения погрешностей измеряемых параметров

δ_K , %	δ_E , %	δ_d , %	δ_{l_G} , %	$\delta_{\Delta E}$, %	$\delta_{\Delta e}$, %	$\delta_{\Delta t}$, %
5,0	0,02	1,0	1,0	0,05	0,3	3,5

Эти значения при подстановке в уравнения (12) и (13) дают следующие оценки погрешностей: тепловой мощности – около 6 %, массового расхода – около 7 %.

Полученные значения погрешности измерений тепловой мощности и массового расхода теплоносителя вполне достаточны для экспертной оценки работоспособности и эффективности отопительных приборов, используемых в системах теплоснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Зонова, А.Д., Черепанов, В.Я. Исследование неразрушающего метода измерений тепловой мощности отопительных приборов / А.Д. Зонова, В.Я. Черепанов // Сб. матер. VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010». – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 124-129.
- 2 Исаченко, В.П., Осипова, В.А., Сукомел, А.С. Теплопередача. Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // М.: Изд-во «Энергия», 1975. – 488 с.

3 ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений // Введ. 2009 – 12 – 15, № 1253–ст. – М.: Стандартинформ, 2010. – 27 с.

4 РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения // Введ. 2001 – 01 – 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 146 с.

© *А.Д. Зонова, В.Я. Черепанов, 2012*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Дмитрий Петрович Троценко

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (913)466-47-78, e-mail: trotsenkodmitry@yandex.ru

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (913)925-62-25, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Владимир Алексеевич Ямшанов

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630104, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, начальник сектора теплофизических измерений, тел. (923)243-03-51

В статье рассмотрены вопросы повышения точности калибровки датчиков теплового потока. Предложена методика определения неоднородности теплового поля в установках, реализующих кондуктивный метод.

Ключевые слова: калибровка, неоднородность теплового поля, датчики теплового потока.

DEFINITION OF HETEROGENEITY OF THE THERMAL FIELD IN INSTALLATIONS FOR CALIBRATION OF SENSORS OF THE HEAT FLUX

Dmitry P. Trotsenko

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, postgraduate student, department of metrology, standardization and certification, tel. (913)466-47-78, e-mail: trotsenkodmitry@yandex.ru

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, doctor of science, director of department of metrology, standardization and certification, tel. (913)925-62-25, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Vladimir A. Yamshanov

Siberian Scientifically Research Institute of Metrology, 4, Dimitrova ., Novosibirsk, 630104, engineer, head of department of thermalphysic measurement, tel. (923)243-03-51

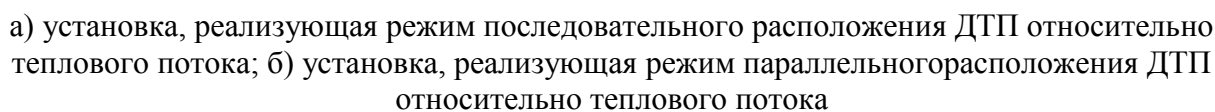
In article questions of increase of accuracy of calibration of sensors of a heat flux. The technique of definition of heterogeneity of a thermal field in the installations realizing a method conductive is offered.

Key words: calibration, heterogeneity of a thermal field, sensors of a heat flux.

Тепловой поток, отнесённый к единице площади поверхности теплообмена, называется плотностью теплового потока. Для измерения этой физической величины получают всё большее распространение специальные измерительные преобразователи – накладные датчики теплового потока (ДТП).

$$q = K \cdot E. \quad (1)$$

Калибровка ДТП кондуктивным методом осуществляется посредством кондуктивных установок (рис. 1).



Кондуктивная установка состоит из теплоотдающей пластины 1, тепловоспринимающей пластины 2 и среды, через которую проходит тепловой поток 3.

В установке, работающей в режиме последовательного расположения ДТП относительно теплового потока, (рис. 1,а), эталонный 4 и калибруемый 5 датчики располагают один над другим. При таком расположении датчики пронизывает одинаковый тепловой поток. С точки зрения электротепловой аналогии [2] эталонный и калибруемый датчики являются тепловыми сопротивлениями для теплового потока, которые соединены последовательно.

Недостатком такой установки является невозможность одновременной калибровки сразу нескольких датчиков, а также датчиков, отличающихся формой и размерами, так как при этом возникает трудно решаемая задача учета теплообмена на их боковых и открытых поверхностях.

Для одновременной калибровки нескольких ДТП необходима установка, реализующая режим их параллельного расположения относительно теплового потока (рис. 1,б). Если датчики располагаются в однородном тепловом поле, то их пронизывает одинаковый тепловой поток. Поэтому неоднородность теплового поля является важнейшей метрологической характеристикой этой разновидности установок, влияющей на погрешность передачи единицы плотности теплового потока.

В стационарном тепловом режиме неоднородность теплового поля можно определить выражением

$$\delta_n = \max(|m_i - m_{cp}| / m_{cp}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $m_i = q_{2i}/q_{1i}$, q_{1i} – плотность теплового потока в выбранной точке теплового поля, вокруг которой происходит определение неоднородности, q_{2i} – плотность теплового потока в любой точке исследуемого теплового поля, i – номер исследуемой точки теплового поля, при $i = 0$, $m_0 = 1$, n – количество исследуемых точек, $m_{cp} = 1 / (n+1) \cdot \sum_{i=0}^n m_i$.

Метод основан на одновременном измерении плотности теплового потока двумя датчиками. Первый датчик размещается в любой точке теплового поля и постоянно остается на одном и том же месте. Второй располагается вокруг первого датчика. По полученным отношениям плотностей тепловых потоков можно по формуле (2) определить неоднородность теплового поля.

Точность определения неоднородности теплового поля, посредством двух ДТП, зависит от их инструментальной погрешности. В связи с этим предлагается другая методика, позволяющая определить неоднородность теплового поля с минимальной погрешностью. Сущность методики заключается в более точном определении отношений плотностей теплового потока.

Предположим, что тепловой поток, создаваемый теплоотдающей и тепловоспринимающими поверхностями, пронизывает среду, в которой размещаются ДТП. Если материал среды неоднороден и имеет разное по объему тепловое сопротивление, то в различных точках объема плотность теплового потока будет неодинаковой. Для определения неоднородности теплового поля в двух точках среды, расположенных на плоскости, параллельной теплоотдающей и тепловоспринимающей поверхности, размещаются датчики теплового потока, рис. 2, а.

На рис. 2,а показано расположение датчиков № 1 (ДТП1) и № 2 (ДТП2). Если ДТП1 имеет коэффициент преобразования K_1 , а ДТП2 – коэффициент K_2 их сигналы равны E_{11} и E_{21} , то плотность теплового потока q_{11} , определенная ДТП1, как следует из (1), равна $q_{11} = K_1 \cdot E_{11}$, а плотность теплового потока q_{21} , определенная ДТП2, равна $q_{21} = K_2 \cdot E_{21}$. Зная плотность теплового потока в

местах расположения датчиков, можно определить отношение m_1 значений плотности теплового потока, пронизывающего эти участки

$$m_1 = \frac{q_{21}}{q_{11}}. \quad (3)$$

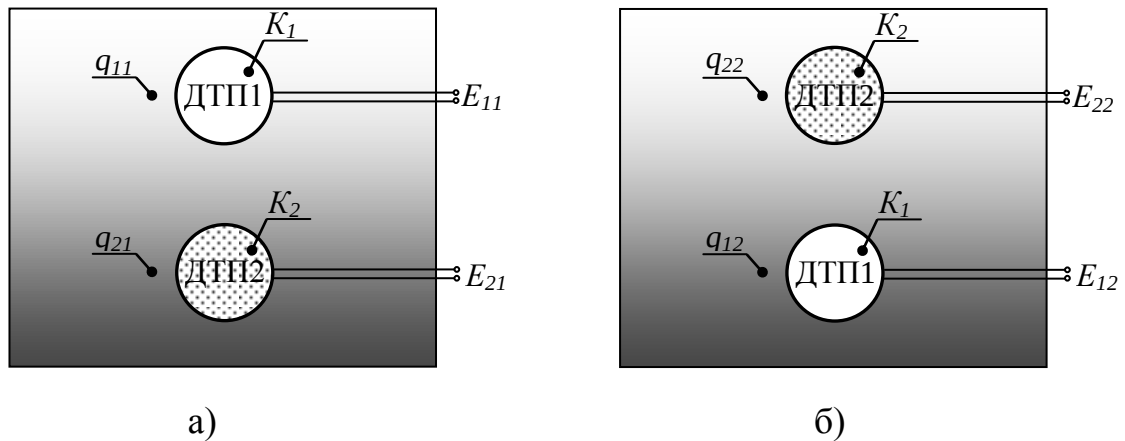


Рис. 2. Расположение датчиков теплового потока при определении неоднородности теплового поля

Затем датчики меняют местами и определяют соответствующие значения плотности теплового потока, которые будут равны $q_{12} = K_1 \cdot E_{12}$, $q_{22} = K_2 \cdot E_{22}$.

Перемещение может привести к изменению значения теплового потока, но при этом сохраняется форма теплового поля. Сохранение формы обеспечивается свойством материала среды – среда имеет фиксированное распределение теплового сопротивления по объему. Поэтому в стационарном режиме форма теплового поля после перемещения идентична форме теплового поля до изменения местоположения ДТП.

Зная плотность теплового потока в новых местах расположения датчиков № 1 и № 2, отношение m_1 значений плотности теплового потока будет равно

$$m_1 = \frac{q_{12}}{q_{22}}. \quad (4)$$

Так как неоднородность теплового поля не изменяется до и после перемещения датчиков, то и отношения (3) и (4) будут равны

$$\frac{q_{21}}{q_{11}} = \frac{q_{12}}{q_{22}}. \quad (5)$$

Отсюда с учетом формулы (3) следует

$$\frac{q_{21}}{q_{11}} = \frac{E_{21}}{E_{11}} \cdot \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{21}} \cdot \frac{E_{12}}{E_{22}}}. \quad (6)$$

Аналогичным образом можно определить отношения плотностей теплового потока m_i и для других мест расположений ДТП № 2.

Эта методика позволяет определить неоднородность теплового поля посредством двух датчиков относительно любой произвольно выбранной точки в плоскости тепловоспринимающей или теплоотдающей пластин.

Описанная методика была опробована следующим образом. Для этой цели использовались датчики теплового потока ДТП № 3530 (ДТП1) и ДТП № 3528 (ДТП2). Датчики были расположены в соответствии с рис. 2, а. В стационарном тепловом режиме при плотности теплового потока около 300 Вт/м^2 были получены сигналы датчиков: $E_{11} = 10,773 \text{ мВ}$, $E_{21} = 10,156 \text{ мВ}$. После перемещения датчиков на новые места (рис.2, б) сигналы датчиков изменились и составили $E_{12} = 10,653 \text{ мВ}$, $E_{21} = 10,269 \text{ мВ}$.

С учётом этих сигналов, в соответствии с формулой (6), значение m_1 составило 1,011, $m_{cp} = 1,006$. Подстановка этих значения в (2) дает значение характеристики δ_n неоднородности теплового поля, равное 0,6 %.

Особенность предложенной методики заключается в том, что достигается высокая точность определения неоднородности теплового поля даже при использовании датчиков с неизвестными коэффициентами преобразования.

Погрешность методики определяется, главным образом, постоянством отношения m_i значений плотности теплового потока в местах расположения ДТП1 и ДТП2. В зависимости от свойства среды, в которой размещены ДТП, это отношение до и после перестановки может отличаться. Это и является основным источником погрешности определения неоднородности теплового поля которая при условии постоянства отношения m_i в пределах $\pm 1 \%$, не превышает 1 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. МИ 1855-88. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне $10 \dots 1000 \text{ Вт/м}^2$. Методические указания // Введ. 1988 – 01 – 01. – М: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
2. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ./ Ф. Крейт, У. Блэк– Мир. – М., 1983 – 512 с.

© Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов, В.А. Ямианов, 2012

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫМ МЕТОДОМ

Надежда Анатольевна Курбатова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383)361-07-45, e-mail: milana-maria@mail.ru

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований основных метрологических характеристик теплотрической установки для поверки датчиков теплового потока.

Ключевые слова: излучатель, тепловой поток, радиационно-конвективный метод, датчик теплового потока, поверка.

RESEARCH EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR VERIFICATION HEAT FLUX SENSORS BY A RADIATION-CONVECTIVE METHOD

Nadegda A. Kurbatova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, senior teacher, department «Metrology, standardization and certification», tel. (383)361-07-45, e-mail: milana-maria@mail.ru

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, doctor of engineering science, professor of chair «Metrology, standardization and certification», tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The article describes results of experimental researches of the basic metrological characteristics of heat measuring installation for verification heat flux sensors.

Key words: a radiator, a heat flux, a radiation-convection method, heat flux sensors, verification.

Технической основой метрологического обеспечения средств теплотририи в настоящее время является Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2008, обеспечивающий ее воспроизведение и передачу в диапазоне от 10 до 5000 Вт/м² при значениях температуры от 200 до 420 К [1]. Этот эталон заменил действующую с 1988 г. установку высшей точности УВТ 53-А-88 и соответствующую государственную поверочную схему МИ 1855-88, которые обеспечивали единство измерений в диапазоне от 10 до 2000 Вт/м² при температуре от 200 до 400 К [2].

Находящаяся на утверждении новая поверочная схема для средств измерений плотности теплового потока предусматривает расширенный по сравнению с первичным эталоном ГЭТ 172-2008 диапазон воспроизводимых и передаваемых значений плотности теплового потока (от 1 до 10 000 Вт/м²).

Такое расширение в область малых значений вызвано потребностью определения качества современных теплозащитных конструкций зданий и сооружений. Измерения высоких значений плотности теплового потока востребованы на предприятиях атомной энергетики, химической технологии, в ракетостроении и в других сферах, использующих высокоэнергетические объекты и установки. Кроме того, это позволит проводить сличения эталона ГЭТ 172-2008 с эталонами других стран, в частности, с эталоном NIST, у которого нижний предел воспроизводимых значений составляет 10 кВт/м².

Для «привязки» передаваемых первичным эталоном значений плотности теплового потока в расширенный диапазон необходимо решить задачи по разработке и исследованию новых методов воспроизведения и передачи ее единицы, а также по созданию соответствующих эталонных теплотметрических установок. В данной статье приведены результаты исследований теплотметрической установки, основанной на радиационно-конвективном методе поверки датчиков теплового потока [3].

Принцип действия установки основан на использовании метода открытой адиабатической оболочки, ранее применённого в первичном эталоне ГЭТ 172-2008 [4].

При исследованиях установки использовались специально разработанные и изготовленные два тепловых блока, отличающихся диапазоном воспроизводимых значений плотности теплового потока. При этом применялись датчики теплового потока, коэффициент преобразования которых был ранее определен на государственном первичном эталоне. Для значений плотности теплового потока от 200 до 2500 Вт/м² использовался тепловой блок, предназначенный для работы при температуре до 150 °С. Полученные при разной плотности теплового потока значения коэффициента преобразования эталонных датчиков сравнивались с его значением, полученным на первичном эталоне. Приведенная на рис. 1 зависимость показывает, что при значениях выше 700 Вт/м² относительная погрешность δ определения коэффициента преобразования не превышает 3 %. Это соответствует требованию новой поверочной схемы для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 1 до 10 000 Вт/м².

Для исследований температурной зависимости коэффициента преобразования датчиков использовалась термобатарея Пельтье, которая размещалась между датчиком и сосудом с тающим льдом.

Наличие тающего льда позволяет стабилизировать отвод тепла от термобатареи, что способствует установлению стационарного теплового потока. Температура поверяемых датчиков регулируется изменением тока в термобатарее.

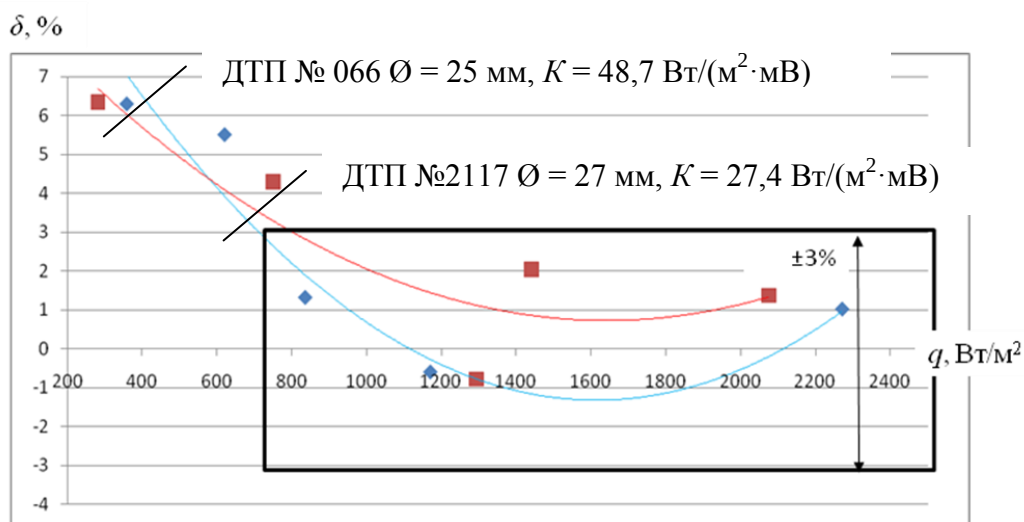


Рис. 1. Зависимость погрешности определения коэффициента преобразования от плотности теплового потока

Установлено (рис. 2), что в наиболее используемом на практике диапазоне температуры от 0 до 40 °С коэффициент преобразования изменяется не более 1,5 % при изменении температуры на каждые 10 °С.

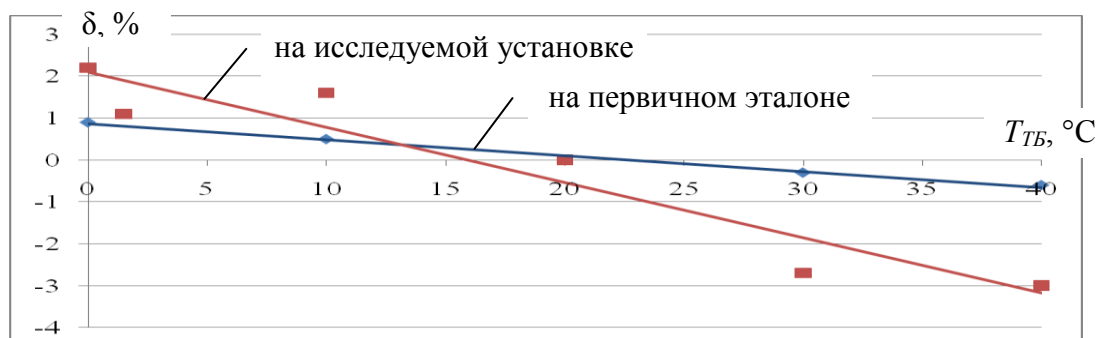
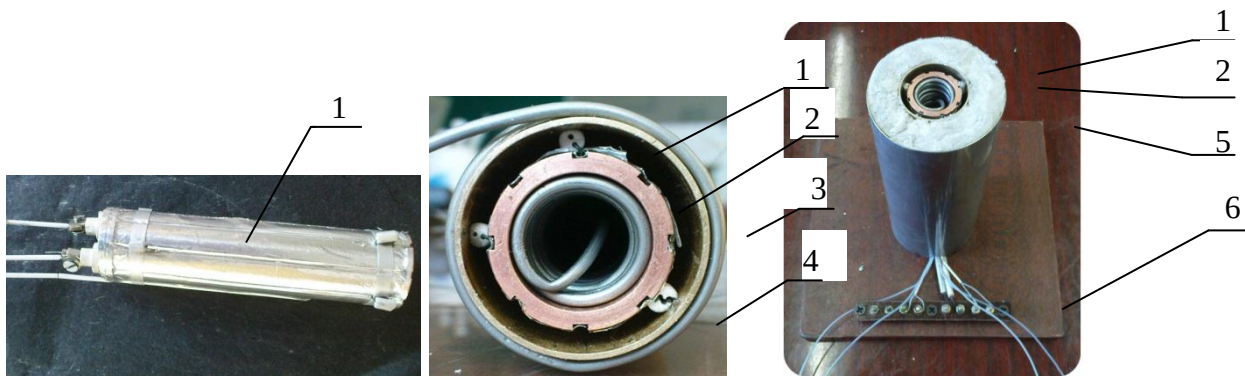


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента преобразования

Эти результаты стали экспериментальным подтверждением работоспособности радиационно-конвективного метода и основанием для создания установки эталонного назначения, предназначенной для более высоких значений плотности теплового потока (до 10 кВт/м²). В связи с этим был разработан и изготовлен новый тепловой блок, предназначенный для работы при значениях температуры до 450 °С (рис. 3).

Для исследований этого теплового блока были изготовлены два специальных датчика, коэффициенты преобразования которых были определены на кондуктивном компараторе КТМ-01 [4]. Датчик № 1 состоит из двух фольгированных стеклотекстолитовых дисков диаметром 27 мм общей толщиной 0,25 мм. Датчик № 2 состоит из двух медных дисков диаметром 27 мм и толщиной 0,5 мм, разделённых слоем силиконового герметика. Для измерений перепада температуры датчик № 1 снабжен тремя парами, а датчик

№ 2 – одной парой соединенных последовательно дифференциальных медь-константановых термопар.



1 – тепловой излучатель; 2 – нагреватель излучателя; 3 – адиабатический экран; 4 – нагреватель экрана; 5 – теплоизолирующий кожух; 6 – клеммная колодка

Рис. 3. Тепловой блок

Зависимость, приведенная на рис. 4, показывает, что при исследованиях этих датчиков на радиационно-конвективной установке (плотность теплового потока от 3500 Вт/м^2 до 10 кВт/м^2) относительная погрешность определения коэффициента преобразования составляет не более 3 %, что соответствует требованиям новой поверочной схемы.

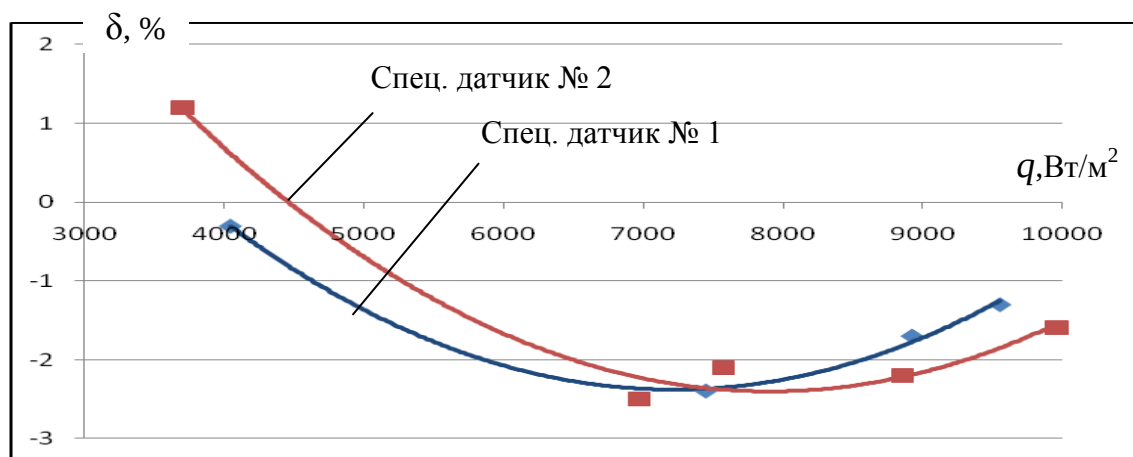


Рис. 4. Погрешность определения коэффициента преобразования специальных датчиков

При помощи этих датчиков был опробован новый вариант радиационно-конвективного метода, основанный на их непосредственном сличении. При этом датчики располагаются последовательно по отношению к тепловому потоку вблизи выходного отверстия излучателя в виде «сэндвича». Один из датчиков выполняет функцию эталонного, а другой – поверяемого. Исследования показали, что относительная погрешность определения коэффициента преобразования при этом не превышает 1,5 %.

В табл. 1 приведены результаты исследований метрологических характеристик радиационно-конвективной установки.

Таблица 1. Метрологические характеристики установки

Характеристики	Значение
Плотность теплового потока	от 3500 до 10000 Вт/м ²
Относительная погрешность определения коэффициента преобразования	не более 2,5 %
Температура излучателя	от 250 до 450 °С
Время выхода излучателя на стационарный режим	150 мин
Время выхода излучателя на стационарный режим после перемонтажа датчика	20 мин
Скорость изменения температуры излучателя в стационарном режиме	не более 0,005 °С/мин
Разность температур между излучателем и экраном	не более 0,04 °С

В целом полученные результаты соответствуют требованиям новой государственной поверочной схемы для средств измерений поверхностной плотности теплового потока, предъявляемым к эталонным теплотрическим установкам, для которых значения погрешности должно составлять от 1,5 до 3,0 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока / О.М. Лозинская, Н.И. Рыбак, В.Я. Черепанов, Э.М. Шейнин, В.А. Ямшанов // Измерительная техника. – 2009. - № 10. – С. 52-55.
2. МИ 1855-88 Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 до 2 000 Вт/м². Методические указания.
3. Курбатова, Н.А. Радиационно-конвективный метод и установка для поверки датчиков теплового потока на основе адиабатического излучателя / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // Измерительная техника. – 2011. – № 6. – С. 48–50.
4. Курбатова, Н.А. Теплотрическая установка эталонного назначения для поверки датчиков теплового потока / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // Вестник СГГА. – Новосибирск. – 2011. – № 1 (14). – С. 87–96.

© Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов, 2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КИПЕНИЯ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ РЕПЕРНОЙ ТОЧКИ НАТРИЯ

Александр Федорович Бродников

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383) 361-07-45, e-mail: braf@mail.ru

Виктор Яковлевич Черепанов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Метрология, стандартизация и сертификация», тел. (383) 361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

В статье рассмотрена методика определения действительной температуры кипения воды дифференциальным методом с использованием миниатюрной ампулы реперной точки натрия. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенной методики определения дифференциальным методом реперной точки натрия.

Ключевые слова: реперная точка, дифференциальный метод, измерительная установка, миниатюрная ампула.

DEFINITION OF THE VALID TEMPERATURE OF BOILING OF WATER BY MEANS OF CONSTANT POINT OF SODIUM

Aleksandr F. Brodnikov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, cand. tech. sci, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification «Metrology, standardization and certification», tel. (383) 361-07-45, e-mail: braf@mail.ru

Victor Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, Ph-doctor, professor, director of department «Metrology, standardization and certification», tel. (383) 361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

In article the technique of definition of the valid temperature of boiling of water by a differential method with using of a tiny ampoule constant sodium points is considered. Results of experimental check of the offered technique of definition by a differential method constant sodium points are resulted.

Key words: constant point, a differential method, measuring installation, a tiny ampoule.

В настоящее время наметилась тенденция к дальнейшему внедрению реперных точек в качестве носителей температурной шкалы на более низких ступенях поверочной схемы для средств термометрии. Это обусловлено, с одной стороны, необходимостью повышения точности и стабильности средств проверки, например, термометрических каналов теплосчетчиков, с другой стороны – возможностью использования для этой цели малогабаритных и даже миниатюрных ампул реперных точек.

Поэтому в новой Государственной поверочной схеме ГОСТ 8.558 – 2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры для средств измерений температуры предлагается использовать в качестве носителей температурной шкалы меры температуры 2-го и 3-го разрядов, погрешности которых должны быть на уровне 0,01 – 0,05 оС. Реализуются эти меры, в частности, в виде аппаратуры для воспроизведения реперных точек.

В данной работе показана возможность практического применения меры температуры на основе реперной точки натрия, реализованной в миниатюрной ампуле, для точного определения действительной температуры кипения воды дифференциальным методом [1].

В качестве примера использования предложенного дифференциального метода проведено определение действительной температуры кипения воды с помощью миниатюрной реперной точки затвердевания натрия с массой навески 0.8 г. Конструкция измерительной ячейки [2] содержит цилиндрическую ампулу (рис. 1) из нержавеющей стали 45 мм × 9,5 мм × 0,3 мм. Ампула имеет термометрический канал в виде миниатюрной пробирки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 2,5 мм, в которую помещен спай дифференциальной медь-константовой термодпары. Для улучшения теплового контакта спая с поверхностью канала его заполняли окисью алюминия. Ампула заполнялась натрием в среде аргона.



Рис. 1. Миниатюрная ампула натрия из нержавеющей стали

Другой спай термодпары помещали рядом с эталонным термометром в сосуд Дьюара с кипящей водой.

Ампулу погружали в канал калибратора температуры, в котором устанавливали температуру 98 °С. В режиме нагрева до этой температуры длительность «площадки» плавления составила более трёх часов.

Исследования ячейки показали (рис. 2), что кривые плавления и затвердевания натрия имеют «площадки» стабилизации температуры в пределах $\pm 0,01$ °С. Это соответствует требованиям к эталонным средствам измерений температуры 2-го разряда.

Измерения действительной температуры кипящей воды выполнялись при помощи измерительной установки (рис. 3), которая состоит из следующих

средств измерений и вспомогательного оборудования: 1 – измерителя сигналов термопреобразователей сопротивления и термопар; 2 – милливольтметра В2-99; 3 – сосуда Дьюара; 4 – ампулы с натрием; 5 – эталонного термометра ПТСВ-1-2 (2-го разряда); 6 – калибратора температуры КТ-500; 7 – вспомогательного термометра ЭТС-100.

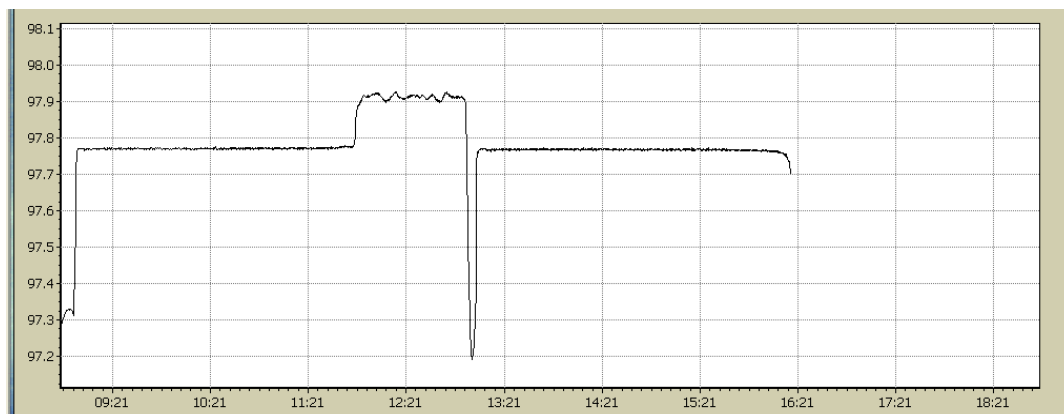


Рис. 2. Характер изменения температуры при плавлении и затвердевании натрия

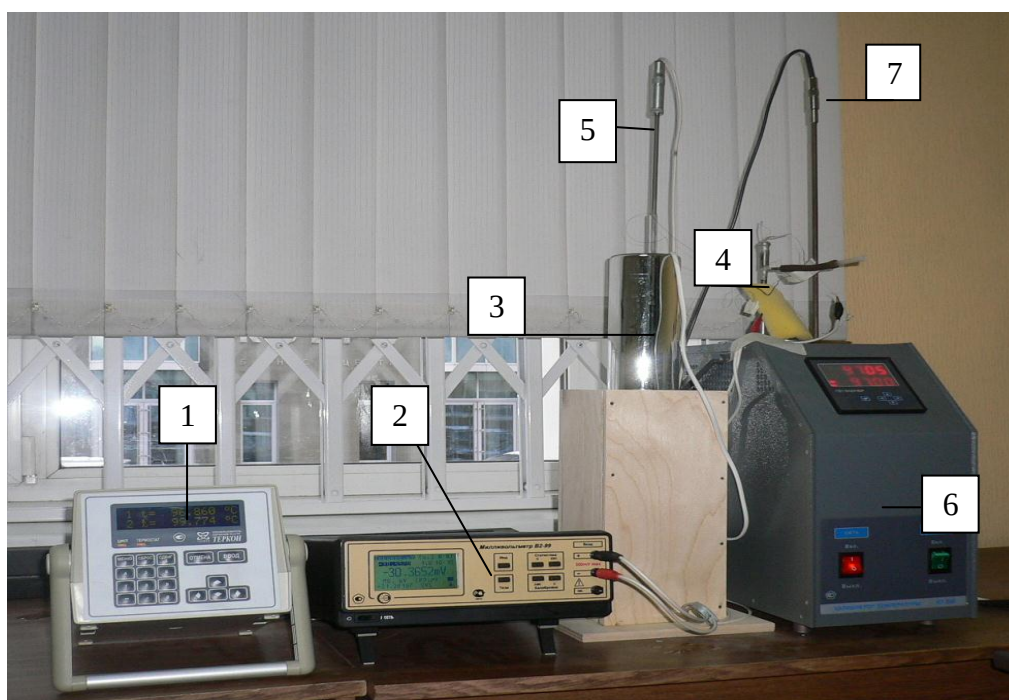


Рис. 3. Измерительная установка для определения действительной температуры кипения воды

После окончания фазового перехода плавления натрия, которое определяли по стабилизации показаний милливольтметра, в калибраторе температуры устанавливали режим охлаждения до температуры 97,00 °С. В процессе понижения температуры фиксировали через каждую минуту показания

милливольтметра, измеряющего сигнал дифференциальной медь-константановой термопары. По их значениям построен график (рис. 4).

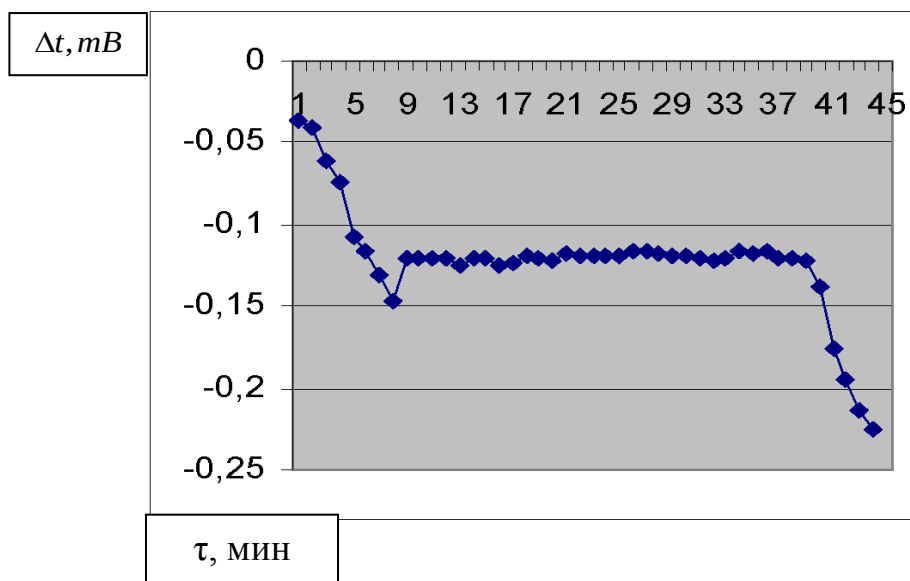


Рис. 4. Кривая затвердевания натрия в миниатюрной ампуле при определении действительной температуры кипения воды

На графике видна площадка затвердевания натрия. Её длительность составила более 30 минут, а сигнал термопары, соответствующий «площадке» затвердевания, был равен 0,119 мВ. При температуре затвердевания натрия, равной 97,75 °С (рисунок 2), с учетом значения дифференциальной ТЭДС термопары, равной при этой температуре 46,5 мкВ/°С, действительная температура кипения воды составила 100,16 °С. Эталонный термометр, помещенный в кипящую воду, показал при этом значение 100,13 °С.

Таким образом, расхождение значений действительной температуры кипения воды, определенных дифференциальным методом с использованием реперной точки натрия и эталонным термометром, составило 0,03 °С. Такой результат показывает, что миниатюрная реперная точка натрия может вполне заменить эталонные платиновые и ртутные термометры 3-го разряда при проверке в паровых термостатах рабочих термометров из состава теплосчетчиков, для которых предел допускаемой погрешности составляет 0,1°С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродников А.Ф., Черепанов, В.Я. Результаты исследований и перспективы использования миниатюрных ампул реперных точек для воспроизведения и передачи температурной шкалы // Измерительная техника – 2009. – № 10. – С. 49-52.
2. Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Повышение точности воспроизведения и передачи температурной шкалы на основе миниатюрных реперных точек // Сборник материалов V Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2009». Т. 5. Специализированное приборостроение метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 171–173.

ОБРАЗЦОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Геннадий Владимирович Шувалов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Анатолий Алексеевич Мамонов

Сибирский государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, проспект Димитрова, 4, начальник сектора, член-корреспондент Российской метрологической академии, тел. (383) 210-08-66

Ольга Александровна Ясырова

Омский филиал Новосибирской государственной академии водного транспорта, 644042, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 4, доцент кафедры физики, тел. (3812) 31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Екатерина Александровна Абрамова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 361-07-45

В статье рассмотрены вопросы разработки установки для измерения коэффициента объемного расширения нефтепродуктов.

Ключевые слова: нефтепродукты, коэффициент объемного расширения, измерение.

STANDARD EQUIPMENT FOR MEASURING THE VOLUME EXPANSION COEFFICIENT OF OIL PRODUCTS

Gennady V. Shuvalov

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, bodies, (383) 210-17-26, an e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Anatoly A. Mamonov

Omsk branch of Novosibirsk state academy of a sailing charter, 644042, Omsk, Ivan Alekseeva's street, 4, the senior lecturer of chair of physics, bodies, (3812) 31-89-29, an e-mail: 300520@mail.ru

Olga A. Jasyrova

Omsk branch of Novosibirsk state academy of a sailing charter, 644042, Omsk, Ivan Alekseeva's street, 4, the senior lecturer of chair of physics, bodies, (3812) 31-89-29, an e-mail: 300520@mail.ru

Ekaterina A. Abramova

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the aspirant of chair of metrology, standardization and certification, bodies, (383) 210-17-26, an e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

The paper deals with the development of equipment for measuring the coefficient of thermal expansion of oil products.

Key words: oil products, factor of volume expansion, measurement.

Известно, что большая часть нефтедобычи в России приходится на Сибирский регион. Кроме того, значительный объем нефтепродуктов транспортируется и используется в условиях Сибири и Дальнего Востока, где температура в зимнее время достигает минус (50-60)°С. В этих условиях произвести учет массы нефтепродуктов часто становится невозможным, так как необходимо определять плотность нефтепродуктов при указанных температурах или знать точные температурного коэффициента объемного расширения. Точных методов для определения плотности при температурах минус (50 - 60) °С в настоящее время не существует, а процедуры пересчета плотности нефтепродукта с температуры 20 °С на температуру, при которой измеряется фактический объем нефтепродукта не всегда возможен из-за ограничений таблиц пересчета ГОСТ 3900-85 (нижняя температура минус 25 °С). Кроме того ГОСТ 3900-85 не учитывает влияние сортности нефтепродуктов, вследствие чего нефти из разных месторождений существенно отличаются по своим теплофизическим свойствам, что вносит значительную погрешность в результат определения массы нефтепродукта.

Для решения этой задачи в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (ФГУП «СНИИМ») разрабатываются эталонные средства воспроизведения единицы температурного коэффициента объемного расширения, которые позволяют определять плотность нефтепродуктов при отрицательных температурах вплоть до минус 60°С на основе данных по коэффициенту их объемного расширения и плотности, определенной в лабораторных условиях.

В общем случае, плотность вещества, как правило, уменьшается с ростом температуры (вследствие теплового расширения) и увеличивается с повышением давления. Зависимость плотности от температуры при постоянном давлении в общем случае выражается уравнением

$$\rho_2 = \rho_1 [1 - \beta(t_2 - t_1)], \quad (1)$$

где ρ_1 - плотность при температуре t_1 , ρ_2 - плотность при температуре t_2 , β - средний коэффициент объемного теплового расширения в интервале от t_1 до t_2 .

У многих жидкостей, в том числе нефтепродуктов, не содержащих парафина, наблюдается линейная зависимость плотности от температуры, так что для них справедливо соотношение

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{t_1 - t_2} = \alpha, \quad (2)$$

Величина α представляет собой среднюю температурную поправку к плотности, показывающую, насколько изменяется плотность данной жидкости при изменении температуры на 1 °С.

Значения α для нефтепродуктов приведены в ГОСТ 3900-85.

Поскольку значения поправок являются средними, пересчеты по формулам (1) и (2) могут дать значительные погрешности, если разность температур t_1 и t_2 велика. Поэтому для определения плотности с большей точностью формулу (2) рекомендуется применять только в тех случаях, когда температура измерения t_1 отличается от температуры t_2 , при которой требуется определить плотность, не более чем на $\pm 10^\circ\text{C}$.

В основу измерений температурного коэффициента объемного расширения положен метод измерения объемного расширения с помощью емкостного низкотемпературного дилатометра. При этом дополнительный объем расширенного нефтепродукта измеряется путем измерения емкости эталонного конденсатора, между электродами которого находится измеряемый нефтепродукт. Это позволяет увязать измерения коэффициента объемного расширения нефтепродуктов с единицей электрической емкости, которая воспроизводится Государственным первичным эталоном единицы электрической емкости ГЭТ 107-77.

Для реализации данного метода измерений коэффициента объемного расширения нефтепродуктов использовался вариант емкостного дилатометра в виде отрезка коаксиальной линии, частично заполненной диэлектрической жидкостью.

Конструкция такого дилатометра показана на рис. 1.

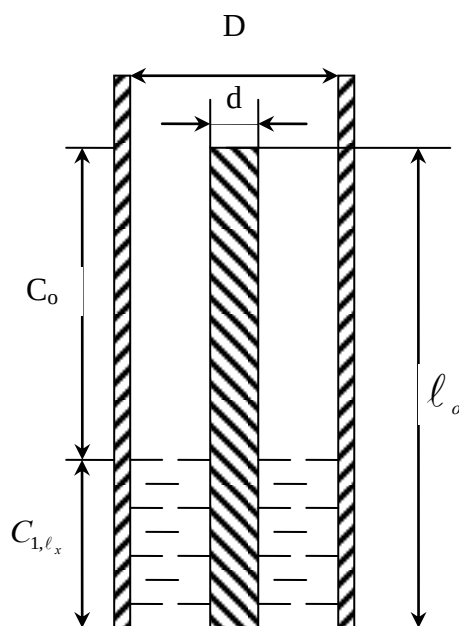


Рис. 1. Конструкция дилатометра

Электрическая емкость указанной на рисунке 2 коаксиальной линии состоит из воздушной ёмкости C_0 и параллельно включенной ёмкости участка линии C_1 , заполненной жидкостью.

Используя общеизвестное выражение электрической ёмкости для коаксиальной линии

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \ell}{\ln \frac{D}{d}} \quad (3)$$

найдем суммарную ёмкость дилатометра:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_0 = [\ell_x \cdot \varepsilon + (\ell_0 - \ell_x) \varepsilon_0] \cdot \frac{2\pi}{\ln \frac{D}{d}} \quad (4)$$

При изменении температуры нефтепродукта $\Delta T = T_2 - T_1$, увеличивается заполнение коаксиальной линии жидкостью, т.е. изменяется её уровень от ℓ_{xT_1} до ℓ_{xT_2} , а поскольку диэлектрическая проницаемость жидкости больше, чем у воздуха, то общая ёмкость линии увеличивается. Её изменение ΔC можно представить в следующем виде.

$$\Delta C = C_{T_2} - C_{T_1} = [\ell_{xT_2} \left(\frac{\varepsilon_{T_2}}{\varepsilon_0} - 1 \right) - \ell_{xT_1} \left(\frac{\varepsilon_{T_1}}{\varepsilon_0} - 1 \right)] \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D}{d}} \quad (5)$$

Полагая в первом приближении, что диэлектрическая проницаемость жидкости ε_T пренебрежимо мало изменяется в малом интервале изменения температуры, то выражение (5) упростится до вида

$$\Delta C = \Delta \ell_x \cdot \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0} - 1 \right) \cdot \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}, \quad (6)$$

откуда находим искомый подъём уровня $\Delta \ell_x$ и связанный с ним объём ΔV вытесненной жидкости

$$\Delta \ell_x = \frac{\Delta C}{\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0} - 1 \right) \cdot \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}} \quad (7)$$

$$\Delta V = \Delta \ell_x \cdot S = \frac{\Delta C}{\left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0} - 1 \right) \cdot \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D}{d}}} \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (8)$$

где S – площадь поперечного сечения линии, заполняемой жидкостью.

Из данных выражений видно, какие параметры необходимо знать для определения β .

Для практической реализации предложенного метода была разработана конструкция встроенного датчика, с помощью которого косвенным путём определялось необходимое для расчетов отношения $\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0}$ в заданном температурном диапазоне.

Таким образом, были получены расчетные соотношения для косвенного измерения объёма вытесненной жидкости через изменение электрической ёмкости и геометрические постоянные дилатометра, а также определены условия термокомпенсации. С учетом этого разработана конструкция датчика

для измерения температурной зависимости коэффициента объемного расширения нефтепродуктов.

Как указывалось выше, дополнительно к коэффициенту объемного расширения нефтепродуктов необходимо знать плотность нефтепродукта при определенной температуре. Для нефти и нефтепродуктов плотность является нормируемым показателем качества и подлежит при использовании обязательному определению согласно ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности» и ГОСТ Р 51069-97 «Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром».

В России стандартизированы два метода определения плотности: ареометрический и пикнометрический по ГОСТ 3900-85, которые хотя и обеспечивают необходимую точность, по своему конструктивному исполнению и условиям применения не всегда удовлетворяют требованиям практики, так как в большинстве случаев могут использоваться лишь в условиях стационарных лабораторий. Вместе с тем зачастую возникает необходимость оперативного определения плотности нефтепродуктов в местах их хранения и использования, особенно в полевых условиях. Это привело к созданию альтернативного барботажно-пузырьковый метода определения плотности нефтепродуктов [1].

С учетом проведенных исследований была разработана конструкция прибора, предназначенного для измерения плотности ГСМ, и разработана методика его применения для контроля плотности судовых топлив [2].

Проведенные исследования позволяют создавать стандартные образцы плотности и температурного коэффициента объемного расширения нефтепродуктов в низкотемпературной области, что обеспечит единство измерений свойств нефтепродуктов в диапазоне температур до минус 60°C.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ясырова О.А., Шувалов Г.В., Жуков А.Ю. Исследование метрологических характеристик приборов для определения плотности жидкости // Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: Сборник материалов 4-го Международного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2008», 22–24 апреля 2008. – Новосибирск, 2008. – Том 4. – Часть 2. – С. 109–112.
2. Ясырова О.А., Шувалов Г.В. Разработка метода определения плотности нефтепродуктов // Сборник научных трудов: вып. 6 / сост. В.А. Глушец. – Омск: Иртышский филиал НГАВТ, 2008. – С. 367 – 370.

© Г.В. Шувалов, А.А. Мамонов, О.А. Ясырова, Е.А. Абрамова, 2012

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

Геннадий Владимирович Шувалов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Александр Петрович Ильин

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, заведующий кафедрой общей и неорганической химии, тел. (3822) 56-34-74, e-mail: ilyinap@mail.ru

Иван Владимирович Клековкин

Сибирский государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, проспект Димитрова, 4, заместитель начальника лаборатории физико-химических свойств и состава материалов и веществ, тел. (383) 210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.nsk.ru

В статье рассмотрены вопросы измерения термохимических параметров нанопорошков металлов.

Ключевые слова: нанопорошки металлов, термохимические параметры, метрологическое обеспечение.

METROLOGICAL MAINTENANCE OF MEASUREMENTS OF THERMOCHEMICAL PARAMETERS NANOPOWDER OF METALS

Gennady V. Shuvalov

Siberian state геодезическая academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, bodies. (383) 210-17-26, an e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Alexander P. Ilyin

The state educational institution of the higher vocational training «National research Tomsk polytechnical university», 634050, Tomsk, Lenin's avenue, 30, managing chair of the general and inorganic chemistry, bodies. (3822) 56-34-74, an e-mail: ilyinap@mail.ru

Ivan V. Klekovkin

Siberian state Awards of the Labour Red Banner metrology scientific research institute, 630004, Novosibirsk, the prospectus of Dimitrova, 4, the deputy chief of laboratory of physical and chemical properties and structure of materials and substances, bodies. (383) 210-12-65, an e-mail: klekovkin@sniim.nsk.ru

The paper deals with the measurement of the thermochemical parameters of metal nanopowders.

Key words: metal nanopowder, thermochemical parameters, metrological maintenance.

Одним из наиболее широко распространенных наноматериалов являются нанопорошки (НП) металлов, которые производятся в больших масштабах и находят применение в самых различных областях техники и технологии: в составе ракетных топлив, реагентов в органическом и неорганическом синтезе, в водородной энергетике и т.д.

Успешное использование нанопорошков металлов в различных областях техники и технологии обуславливает наличие подробных сведений об их физико-химических характеристиках. В этой связи актуальным является создание метрологического комплекса для обеспечения единства измерений термохимических свойств нанопорошков металлов, в том числе:

- Температуры начала окисления – до 600 °С;
- Степени окисленности – до 50 %;
- Теплового эффекта реакции – 6 000 кДж/кг.

Создание метрологического комплекса обеспечения единства измерений термохимических свойств нанопорошков металлов включает разработку методов и средств измерений, а также государственных стандартных образцов термохимических свойств нанопорошков металлов.

Для этого были решены следующие задачи:

- Проведен анализ свойств нанопорошков металлов и выбран материал для изготовления СО;
- Разработаны методики измерений температуры начала окисления, степени окисленности, теплового эффекта окисления;
- Разработаны, исследованы и созданы государственные стандартные образцы температуры начала окисления, степени окисленности, теплового эффекта окисления нанопорошков металлов.

В работе использовались нанопорошки металлов, получаемые методом электрического взрыва проводников (ЭВП). Благодаря этому электровзрывные НП обладают рядом отличий в сравнении с НП, полученными другими способами. Такие НП имеют сферическую форму частиц, устойчивы к окислению и спеканию при комнатной температуре, их характеризует высокая диффузионная активность при нагревании, связанная с особыми теплофизическими свойствами НП [1].

Для оценки термохимических свойств и характеристик нанопорошков металлов использовался комплекс методов термического анализа – дифференциальный термический анализ (ДТА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).

По данным ДТА и ДСК рассчитывались параметры химической активности исходных нанопорошков и их смесей: температура начала окисления ($T_{н.о.}$, °С), степень окисленности (α , %), максимальную скорость окисления (V_{max} , %мас./с) и тепловой эффект окисления (ΔH), которые являются наиболее типичными параметрами для входного контроля нанопорошков на производстве и исходными данными для осуществления

процесса синтеза нанопорошков и продукции на их основе. Для оценки безопасности обращения с нанопорошками их наиболее значимой характеристикой является Тн.о., затем $V_{\max}$ и т. д. Параметры определяют также технологические свойства нанопорошков.

В качестве примера в таблице 1 приведены параметры химической активности нанопорошков вольфрама и его смесей с нанопорошками алюминия согласно данным дифференциально-термического анализа исходных порошков и их смесей и расчетов параметров активности.

Таблица 1. Состав исследуемых смесей НП алюминия и вольфрама и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$t_{\text{н.о.}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \%$	$V_{\max}, \text{масс. \%}$	$\Delta H, \text{Дж/г}$
	Al	W				
1	100	0	400	45,9	0,10	4995
10	90,9	9,1	380	50,3	0,10	5794
11	83,3	16,7	380	58,5	0,41	6993
12	71,4	28,6	380	56,2	0,05	6593
13	0	100	370	24,1	0,03	3197

В работе в качестве эталонного прибора использовался термоанализатор SDT Q600, измерения в соответствии с методикой измерений проводили в режиме линейного нагрева в интервале 20...1000 $^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева 10 град./мин в атмосфере воздуха.

В результате проведенных экспериментальных работ было создано метрологическое обеспечение измерений термохимических параметров нанопорошков металлов в виде:

- Метрологического комплекса измерений температуры начала окисления, степени окисленности, теплового эффекта реакции нанопорошков металлов на базе совмещенного ТГА/ДСК/ДТА анализатора SDT Q600;
- Методик измерений температуры начала окисления, степени окисленности, теплового эффекта реакции нанопорошков металлов;
- Государственных стандартных образцов температуры начала окисления, степени окисленности, теплового эффекта реакции нанопорошков металлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002.

© Г.В. Шувалов, А.П. Ильин, И.В. Клековкин, 2012

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Лариса Александровна Канушина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; доцент кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Александр Николаевич Соснов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

Наталья Кирилловна Соснова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия»; 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10; кандидат технических наук, профессор кафедры технологии оптического производства; телефон (383)-361-07-79; e-mail: kaf.top@ssga.ru

В статье анализируются условия обработки оптических деталей с учетом механических и термических факторов разрушения поверхностного слоя заготовки с целью получения поверхностей заданного качества и сохранения работоспособности инструмента.

Ключевые слова: качество поверхности оптических деталей; регулирование термического состояния; алмазно-абразивная обработка; тепловой баланс.

ASSURANCE OF QUALITY FOR OPTICAL DETAIL SURFACES BY REGULATING THERMAL CONDITIONS FOR THE AREA UNDER TREATMENT IN PROCESS OF DIAMOND-ABRASIVE GRINDING

Larisa A. Kanushina

Assoc. Prof., department of optical production technology, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383)344-40-58, fax +7(383) 344-40-58, E-mail: kaf.top@ssga.ru

Alexander N. Sosnov

Prof., department of optical production technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Natalya K. Sosnova

Prof., department of optical production technologies, Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo st., 630108, Novosibirsk, phone: +7(383) 344-40-58, e-mail: kaf.top@ssga.ru

The paper deals with the conditions for optical details treatment with regard to the mechanical and thermal factors, causing destruction of the blank surface layer, in order to produce the preset quality surfaces and preserve instruments operability.

Key words: to assure surface quality, regulation of thermal conditions of area under treatment, thermal conditions, diamond-abrasive grinding, thermal balance.

Определение температуры в зоне обработки, возникающей при шлифовании, затрудняется из-за краткого времени и высокой частоты контактирования зерен с обрабатываемой поверхностью заготовки. Применяя доступные методы измерения температуры при различных режимах шлифования, и используя, литературные данные, был установлен диапазон фактических температур от 60 до 1200⁰ С.

Температурные ограничения при алмазно-абразивном шлифовании обусловлены следующими факторами. Алмазные зерна окисляются на воздухе при температуре свыше 800⁰ С. Стекла имеют температуру размягчения в пределах 600 – 800⁰С, а часто используемая медно-оловяная связка М1 – 860⁰ С, поэтому работоспособность алмазно-абразивного инструмента попадает в зону риска из-за засаливания рабочей поверхности.

Из этого следует, что нельзя допускать нагрев в зоне обработки более чем 600 – 800⁰ С. Для этого необходимо определить источники нагрева рабочей зоны, выяснить допустимые значения параметров обработки, после которых температуры поднимаются выше указанных, и решить задачи отвода тепла.

Количество теплоты, выделившееся в процессе шлифования, определяется по формуле:

$$Q = k P_z V_{кр} / 0,427 = k N_{э} J,$$

где k – 0,80 – 0,95 – коэффициент, показывающий какая доля механической энергии переходит в тепло, для стекла $k = 0,80$;

$V_{кр}$ – окружная скорость резания;

P_z – сила резания;

$N_{э}$ – эффективная мощность;

J – механический эквивалент теплоты.

Часть теплоты воспринимается заготовкой, часть уходит в инструмент через алмазные зерна, часть отводится через стружку и смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Каждый из этих компонентов имеет определенные теплофизические свойства, поэтому доля тепла в каждом случае будет различна.

Общее количество теплоты распределяется между контактируемыми поверхностями.

$$Q = Q_d + Q_{кр} + Q_c + Q_{ж}$$

Q_d – часть тепла, идущая в деталь;

$Q_{кр}$ – часть тепла, идущая в круг;

Q_c – часть тепла, идущая в связку;

$Q_{ж}$ – часть тепла, нагревающаяся СОЖ.

Многими авторами отмечается, что СОЖ нагревается не из зоны резания, а с поверхности нагретого после шлифования материала, что позволяет исключить последнее слагаемое из уравнения.

Формулы для расчета баланса температур приведены в [1]. Результаты расчета показывают, что в заготовку уходит 60 – 85% общего количества выделившегося тепла, в стружку 1-30%, в круг 9-18% .

Существует зависимость между режимами обработки и количеством тепла, выделившимся в зоне обработки.

В качестве ограничительных параметров целесообразно принять элементы режимов резания: скорость вращения инструмента $V_{ин}$, скорость перемещения изделия $V_д$, подачу S , давление P . Аналитических выражений, связывающих все параметры качества поверхностей с режимами обработки, пока не создано ввиду сложности их взаимодействия. Экспериментальные исследования [2, 3, 4] и производственный опыт показывают, что режимы обработки влияют на форму и качество поверхностей следующим образом:

шероховатость поверхности с увеличением скорости обработки уменьшается, причем нелинейно и незначительно. Это объясняется двумя причинами:

- Во-первых, увеличение скорости приводит к увеличению температуры на контакте инструмент - обрабатываемая заготовка, но одновременно уменьшает время воздействия, то есть уменьшает глубину прогреваемого и напряженного слоев;

- Во-вторых, увеличение скорости обработки увеличивает деформирующее напряжение, но при этом глубина напряженного слоя уменьшается.

Увеличение скорости вращения инструмента, закрепленного на нижнем шпинделе, значительно ускоряет срабатывание материала в краевой зоне по сравнению с центральной, что приводит к погрешности формы заготовки. При обработке деталей методом притира существует ограничение скорости вращения инструмента вследствие возникновения гидродинамического эффекта при больших скоростях[2]. Практически, при обработке стекла и других хрупких неметаллических материалов, скорость резания выбирается в пределах 10 – 30 м/с.

Увеличение продольной подачи (числа двойных ходов в мин.) также приводит к уменьшению времени контакта инструмента и заготовки, однако при этом повышаются динамические нагрузки, уменьшается стабильность процесса, происходит неравномерное срабатывание инструмента. Возвратно-поступательное движение верхнего звена в процессе обработки приводит к непрерывному изменению действующих напряжений в поверхностных слоях заготовки и инструмента. С ростом ускорения, в поверхностном слое заготовки растёт количество и неоднородность распределения очагов зарождения микротрещин. Повышенная дефектность поверхностного слоя способствует ускорению съема обрабатываемого материала.

С увеличением давления возрастает глубина внедрения зерен, возрастает количество работающих зерен (количество источников тепла) и площадь контакта, уменьшается зазор между заготовкой и инструментом, происходит интенсивное трение продуктов разрушения о связку, ухудшаются условия циркуляции СОЖ, то есть возрастает теплонапряженность.

Удельное давление на зерно ограничивается сохранением условий самозатачивания. Для своевременного удаления затупившихся зерен

необходимо постоянное продвижение осколков стекла в зазоре между инструментом и заготовкой для срабатывания связки. Это происходит если глубина внедрения h_z зерна равна: $h_z = 0,12 d_z$ [5]. В этом случае зазор полностью заполнен осколками стекла, которые свободно по нему перемещаются.

Влияние поперечной подачи (глубины внедрения алмазных зерен в стекло) на тепловое состояние в зоне обработки имеет сложный характер. Как показано в работах [6], взаимодействие алмазных зерен со стеклом различно в зависимости от глубины внедрения. При глубине внедрения зерен размером до 5 мкм в силу упругих свойств стекла, стружка не снимается, но выделяется значительное количество теплоты за счет внешнего и внутреннего трения. В этом случае отсутствует отвод тепла за счет стружки, а небольшой зазор между инструментом и заготовкой затрудняет циркуляцию СОЖ, что уменьшает её теплоемкость. При шлифовании стекла зернами в интервале размеров 5 – 14 мкм происходит пластическое отеснение стекла. Здесь наблюдается самое большое выделение тепла за счет внешнего и внутреннего трения, так как увеличивается площадь контактирующих поверхностей, а отвод тепла минимален.

При шлифовании полированного стекла зернами малых размеров, поверхность инструмента быстро теряет свою работоспособность [6], а на поверхности заготовки остаются следы расплавленной связки. Алмазные зерна размером менее 14 мкм применяются только на финишных операциях (тонком алмазном шлифовании). В этом случае шлифование проводится по разрушенному предыдущей обработкой слою и припуск на обработку должен лишь не намного превышать разрушенный слой. Шлифование стекла крупными зернами размером более 20 мкм приводит к хрупкому разрушению стекла. В этом случае кинетическая энергия переходит в тепловую и затрачивается на хрупкую разрушение. Баланс между количеством образованного тепла и отведенного достигается выбором оптимальных скоростей инструмента и заготовки, соблюдения условий самозатачивания и правильного подбора концентрации зерен и типа связки.

Тепловые процессы, сопровождающие механическую обработку стекла, делают невозможным получение качественных поверхностей без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Их назначение заключается не только в отводе тепла и продуктов разрушения из зоны контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой, но и в участии в разрушении материала, путем уменьшения трения и за счет физико-химического воздействия. Последнее обстоятельство вынуждает подходить к выбору СОЖ индивидуально в зависимости от свойств материала.

Сказанное выше показывает, что для улучшения качества поверхности при изготовлении оптических деталей и сохранения работоспособности инструмента следует выбирать оптимальную скорость и давление обработки, максимально стабилизировать их, применять СОЖ, обладающую поверхностно-активными свойствами, чтобы выделяющееся тепло не приводило к плавлению стекла и связки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев А.И., Методика расчета температур при шлифовании./ А.И.Исаев, Силян С.С.// Вестник машиностроения – 1957.– №4.– С. 54 -59.
2. Перерозин М.А. Справочник по алмазной обработке стекла./ М.А. Перерозин.– М.: Машиностроение. 1987.– 224 с.
3. Лепитова Н.М. Алмазная обработка стекла./ Н.М. Лепитова // Синтетические алмазы в промышленности.– Киев: Наук. думка.– 1974. –С. 288-290.
4. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей./В.В.Рогов.– Киев: Наук. думка. – 1985. – 264 с.
5. Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей./А.Л. Ардамацкий.– Л.: Машиностроение. –1978. –232 с.
6. Альтшулер В. М., Ашкерев Ю.В. Изменение работоспособности алмазного инструмента в процесс тонкого алмазного шлифования оптического стекла./ В.М. Альтшулер, Ю.В. Ашкерев // ОМП, –1976. –№5, –С. 67-68.

© Л.А. Канушина, А.Н. Соснов, Н.К. Соснова, 2012

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО ГОСТ Р 54299-2010 «СУДОВЫЕ ТОПЛИВА. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»

Геннадий Владимирович Шувалов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Ольга Александровна Ясырова

Омский филиал Новосибирской государственной академии водного транспорта, 644042, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 4, доцент кафедры физики, тел. (3812) 31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Екатерина Александровна Абрамова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 361-07-45

В статье рассмотрены вопросы измерения физико-химических параметров судовых нефтепродуктов.

Ключевые слова: судовые нефтепродукты, физико-химические параметры, измерение.

APPLICATION OF PHYSICOCHEMICAL METHODS DEFINITION OF SOME SHIP OIL PRODUCT PARAMETERS IN ACCORDANCE WITH GOST P 54299-2010 «SHIP FUEL. SPECIFICATIONS»

Gennady V. Shuvalov

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, bodies. (383) 210-17-26, an e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

Olga A. Jasyrova

Omsk branch of Novosibirsk state academy of a sailing charter, 644042, Omsk, Ivan Alekseeva's street, 4, the senior lecturer of chair of physics, bodies, (3812) 31-89-29, an e-mail: 300520@mail.ru

Ekaterina A. Abramova

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the aspirant of chair of metrology, standardization and certification, bodies. (383) 210-17-26, an e-mail: shuvalov@sniim.nsk.ru

The paper deals with the measurement of physicochemical parameters of the marine petroleum products.

Key words: ship oil products, physical and chemical parameters, measurement.

Показатели качества судового топлива должны удовлетворять требованиям, которые регламентируются международными (ISO) или национальными стандартами, а, в некоторых случаях, техническими условиями международных организаций.

Наиболее применяемой в настоящее время за рубежом спецификацией является стандарт Международной Организации Стандартов (ISO) — «ISO 8217: 2010. Нефтяные продукты. Топлива (класс F)», впервые утвержденный в 1987 г., а в 2010 г. дополнительно доработанный.

В России в основу классификации судовых топлив положен ГОСТ 28577.2 –90 «Нефтепродукты. Топлива (класс F). Классификация». Стандарт устанавливает две группы топлив D и R (D - дистиллятные топлива; R - остаточные топлива). Дальнейшая классификация топлив проводится по показателям вязкости при 100 °С. Указанный стандарт, а также технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту», устанавливает лишь наиболее общие требования к важнейшим характеристикам топлив. Необходимые физико-химические показатели регламентируются рядом дополнительных стандартов и технических условий на конкретные топлива [1].

Такая практика нормирования требований к судовым топливам в различных ГОСТ, ОСТ, ТУ не способствует установлению единообразных норм к их параметрам, что учитывая многообразие судовых дизелей и конструктивные особенности топливных систем, затрудняет выбор сортов топлива.

В этой связи возникла необходимость перенесения международного опыта нормирования показателей судового топлива и для России. В соответствии с Программой национальной стандартизации 2010 года был разработан ГОСТ Р «Судовые топлива. Технические условия», который является модификацией международного стандарта ИСО 8217:2010 с учетом требований технического регламента «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту». После согласований с заинтересованными организациями ГОСТ Р 54299-2010 «Судовые топлива. Технические условия» был утвержден приказом Росстандарта от 29 декабря 2010 года N 1149 - ст и вводится в действие с 1 июля 2012 года.

В ГОСТ Р 54299-2010 появился ряд новых требований к свойствам дистиллятных топлив по отдельным показателям: в частности, содержание в топливе сероводорода не должно превышать 2,0 мг/кг. Кроме того, для дистиллятных топлив численно нормируется его смазывающая способность.

Стандарт более четко и жестко устанавливает требования и к остаточным топливам, так появился ряд новых требований к свойствам: в частности, нормируется расчетный углеродно-ароматический индекс (ССАИ).

Кислотное число для остаточных топлив не должно превышать 2,0 мг КОН/г для всех марок топлив; натрия, вызывающего коррозию топливной аппаратуры, должно содержаться не более 50 -100 мг/кг.

Кроме того, вводятся новые нормы совместного содержания алюминия и кремния для разных марок топлив в мг/кг, не более: RMA10 – 25, RMB30 – 40, RMD80 – 40, RME180 – 50, RMG180/380/500/700 – 60, RMK380/500/700 – 60.

Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» предъявляет обязательные требования к качеству отечественных судовых топлив в виде двух показателей, характеризующие экологические и пожароопасные свойства топлив, а именно: содержание серы и температура вспышки.

Определение температуры вспышки судовых топлив производится на основе стандартов ГОСТ Р EN ISO 2719:2002 «Нефтепродукты. Методы определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса» и стандарта ГОСТ 6356 – 75 «Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле». В настоящее время выпускается большое количество отечественных и зарубежных приборов для определения температуры вспышки судовых топлив. Значительная часть этих приборов морально устарела и нуждаются в существенной модернизации до современных требований, в том числе, по точности и оперативности измерений. Одним из решений этой задачи может быть уменьшение объема испытуемого нефтепродукта, что позволяет уменьшить время определения температуры вспышки. Кроме того, уменьшение объемов топлива, смазочных и моторных масел при проведении экспресс-диагностики обеспечит существенную экономию нефтепродуктов.

С целью разработки экспресс-метода анализа были проведены экспериментальные исследования температуры вспышки нефтепродуктов, в результате которых было установлено, что на точность определения температуры вспышки основное влияние оказывает скорости нагрева пробы нефтепродукта (рис. 1).

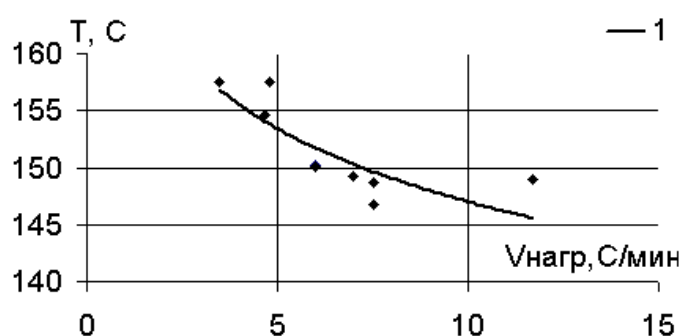


Рис. 1. Зависимость температуры вспышки нефтепродукта от скорости его нагрева

Наиболее вероятной причиной этого влияния могут быть конвективные процессы теплообмена в жидком нефтепродукте. Указанные особенности были учтены при разработке прибора для определения температуры вспышки нефтяных топлив СИМ-5 [2].

Определение содержания серы в судовом топливе проводится по ГОСТ Р 51947-2002 «Нефть и нефтепродукты. Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии» или ГОСТ 19121-73 «Метод определения содержания серы сжиганием в лампе»

Ламповый метод определения серы по ГОСТ 19121-73 является одним из основных методов определения содержания серы в органических материалах и заключается в сжигании пробы материала с последующим определением образующегося сернистого ангидрида SO_2 . В [3] предложено для увеличения чувствительности измерять электропроводность образовавшейся серной кислоты, поэтому кондуктометрический метод оказался перспективным для определения содержания серы. Была разработана методика определения серы в нефтепродуктах с использованием кондуктометрического метода, а также прибор с использованием этого метода [4].

В табл. 1 приведены параметры приборов, которые могут применяться для подтверждения параметров судовых топлив, которые изготавливаются в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии.

Таблица 1. Приборы для измерения параметров судовых топлив

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности	Средства измерений
Температура вспышки, °С (дизтопливо и масла)	20-200 100-300	±5 абс.	Анализатор СИМ-5
Содержание серы в нефтепродуктах, %	0,01 - 2,00	15 отн.	Анализатор СИМ-6

Указанные приборы прошли государственные испытания и утверждены Росстандартом в качестве средств измерений (номера Государственного реестра средств измерений для СИМ-5 №26139 и СИМ-6 №26140). В них реализованы стандартные методы испытаний нефтепродуктов, изложенные в стандартах ГОСТ 6356 – 75 и ГОСТ 19121-73.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Вводимый в действие с 1 июля 2012 года ГОСТ Р 54299-2010 «Судовые топлива. Технические условия» устанавливает новые требования к параметрам судовых топлив.

2. Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» предъявляет требования к качеству отечественных судовых топлив в виде двух обязательных показателей, характеризующие экологические и пожароопасные свойства топлив, а именно, содержание серы и температура вспышки, определение которых может производиться на основе российских стандартов ГОСТ 6356 – 75 и ГОСТ 19121-73

3. Для подтверждения параметров судовых топлив по показателям содержание серы и температура вспышки можно эффективно использовать анализаторы СИМ-5 и СИМ-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Топлива отечественные и зарубежные для судов флота рыбной промышленности. РД 15.136-90. Номенклатура. Порядок назначения и применения. Клайпеда, 1992 год
2. Шувалов Г.В. и др. Экономия горючесмазочных материалов при работе двигателей внутреннего сгорания / А.В. Бондарев, И.С. Новиков и др. // Сибирский научный вестник / Вып. VI. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2003. – С. 49-52.
3. Шувалов Г.В. Прибор для определения соединений серы в нефтепродуктах [Текст]: / Г.В. Шувалов // Материалы 6 международной конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП –2002».: Сб. тр. – Т. 3. – Новосибирск, 2002. – с. 135-137.
4. Шувалов Г.В. Опыт практического применения анализаторов СИМ-6 для определения серы в нефтепродуктах [Текст] / Г.В.Шувалов // Материалы 6 международной выставки и научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2010».: Сб. тр. – Т. 5. Ч. 2 – Новосибирск, 2010. – С. 155-158.

© Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова, Е.А. Абрамова, 2012

РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Петр Михайлович Плетнев

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук 191, профессор кафедры физики, тел. (383) 328-02-71, e-mail: pletnevpm@sty.ru

Галина Вячеславовна Симонова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 361-07-45, e-mail: simgal@list.ru

Дмитрий Павлович Симонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

Светлана Арсеньевна Степанова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры технологии оптического приборостроения, тел. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Предлагается установить корреляционную зависимость между локальными и интегральными характеристиками керамики на основе цифрового и фотоэлектрического методов анализа отражённого от поверхности светового сигнала. Это позволит снизить затраты и повысить достоверность контроля качества керамических изделий.

Ключевые слова: керамические материалы, цифровые снимки, автоматизированная классификация, структура, отражение света.

DEVELOPMENT CONTACTLESS METHODS QUANTITATIVE DETERMINATION THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CERAMIC MATERIALS

Peter M. Pletnev

Siberian Transport University, 191 Dusy Kovalchuk, Novosibirsk, Prof., department of physics, tel. (383) 328-02-71, e-mail: pletnevpm@sty.ru

Galina V. Simonova

Siberian state academy of geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, docent, department metrology, standardization and sertification, tel. (383) 361-07-45, e-mail: simgal@list.ru

Dmitriy P. Simonov

Siberian state academy of geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, P.G., department of photogrammetry and remote sensing, tel. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

Svetlana A. Stepanova

Siberian state academy of geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, P.G., department of of technology optical instrumentation, tel. (383) 361-07-31, e-mail: kaf.top@ssga.ru

Article describes establishing a correlation between the local and integral characteristics of ceramic-based digital and photoelectric methods of analysis of the reflected light signal from the surface. This will reduce costs and improve the reliability of quality ceramic products.

Key words: ceramics, digital images, automated classification, structure, light reflection.

На свойства всех видов керамических материалов решающее влияние оказывает их строение. Под строением подразумевается взаимное сочетание и распределение кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой (т.е. пор) фаз, их физико-химическая природа и количественное соотношение.

Особенности строения керамики оценивают путем исследования её микроструктуры и текстуры. Микроструктура устанавливает природу кристаллических фаз, характер их строения и сочетания со стекловидной фазой и порами. Текстура определяет объем пор, их размеры, строение, форму и взаимное расположение в изделии. Рассмотрение свойств керамических материалов устанавливает, что в большинстве случаев они обуславливаются особенностью фазового состава.

В настоящее время контроль за соответствием полученных изделий предъявляемым требованиям происходит с использованием механической или визуальной оценки специально подготовленных образцов. Такой способ нельзя назвать прогрессивным, т.к. это достаточно трудоёмко, а результаты содержат значительную долю субъективной компоненты. Ранее было показано, что для получения достоверной и оперативной информации оценки качества керамических образцов целесообразно использовать существующие методы автоматизированного дешифрирования [1].

Под распознаванием образов (классификацией) понимается процедура, позволяющая вынести решение о принадлежности данного изображения или его фрагмента к одному из n классов, причем $n > 1$. Это решение выносится на основании наличия у изображения некоторых признаков того или иного класса. Результатом является выделение классифицированных объектов на изображении [2].

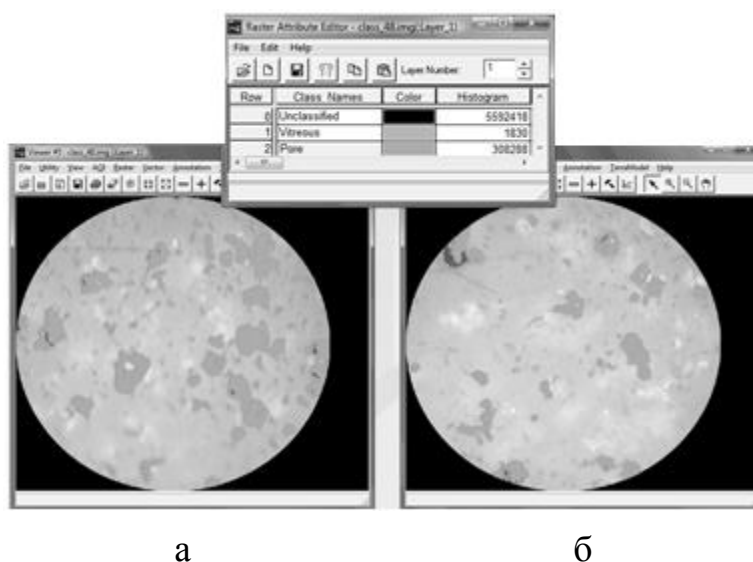
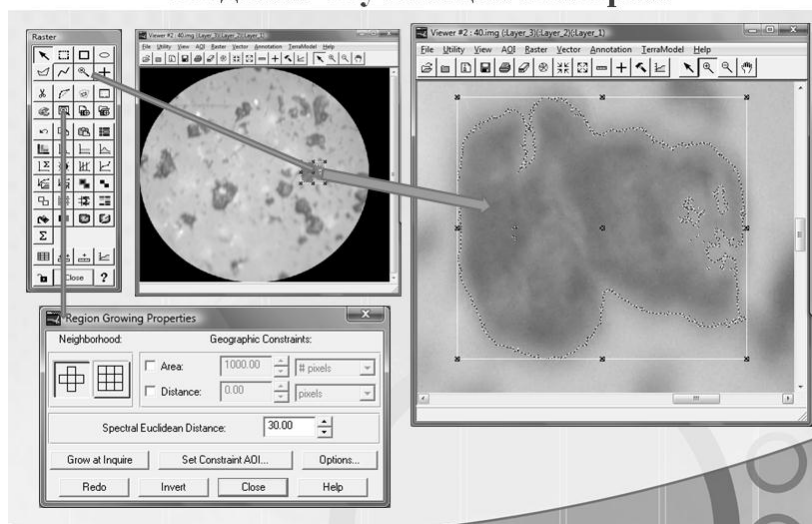
Целью данной работы было установить возможную корреляцию между количественными характеристиками структуры керамических образцов выявленную методами цифрового дешифрирования и интегральными характеристиками отражённого от керамики светового луча.

На рис. 1 представлен процесс создания обучающей выборки для класса «газовая фаза (поры)» методом выращивания.

Условия получения изображений разных образцов были практически идентичны, что позволило использовать одну и ту же обучающую выборку для классификации аналогичных образцов.

Для получения цифровых изображений поверхности керамических образцов был использован микроскоп МИА ЛабМет-И1 при увеличении 360х и цифровая фотокамера Olympus 3-420.

На рис. 2 представлен результат обработки цифровых изображений поверхности двух образцов керамики выполненной по единому эталону.



Обучающая выборка создавалась при помощи эталона, сформированного на основе визуального анализа изображения. В набор сигнатур для данного эксперимента включались только два определяемых класса – «газовая фаза (поры)» и «стекловидная фаза». Таким образом, кристаллическая фаза, являющаяся основой керамики, попадала в понятие «неклассифицированные пиксели».

На рис. 2 отчётливо заметно, что образец “а” (температура спекания 1650 С) имеет большое количество пор и меньший размер кристаллов, чем образец “б” (температура спекания 1680 С).

Исходя из этого, следует ожидать увеличение рассеяния отраженного от поверхности светового луча для образца “а” по сравнению с образцом “б”.

Для проверки этого предположения были проведены эксперименты по отражению от поверхности керамических образцов излучения He-Ne лазера на длине волны 630 нм. Лазерный луч направлялся нормально на поверхность образца, диаметр светового луча на образце составлял 4 мм. Отражённый сигнал регистрировался под углом 30 градусов от нормали. Полученный световой поток направлялся оптической системой на селеновый фотоэлемент. Электрический сигнал измерялся с помощью цифрового вольтметра. Соотношение сигнал/шум составляло 10^3 . Результаты измерений в условных единицах приведены в табл. 1. Усреднение проводилось по измерениям в 10 точках поверхности образцов.

Таблица 1. Результаты проведенных исследований

Температура обжига, С°	Тип поверхности	Серия 1			Серия 2		
		Х _{ср} , у.е.	Min, у.е	Max, у.е	Х _{ср} , у.е	Min, у.е	Max, у.е
1650	Шлиф.	9,67	9,00	10,31	10,37	9,90	10,83
	Пресс.	10,02	9,97	10,04	10,95	10,90	11,00
1680	Шлиф.	7,53	7,11	7,92	8,51	8,02	9,00
	Пресс.	9,42	9,14	9,70	10,18	9,80	10,56

Интересно, что относительные характеристики отраженного сигнала одного типа керамики практически идентичны как для полированной так и для прессованной поверхности.

Полученные результаты показывают, что изменение структуры керамики и соотношение фаз на поверхности существенно влияют на характер отраженного светового сигнала. Следовательно, для снижения затрат на контроль качества керамики специфический процесс цифрового дешифрирования при определении фазового состава можно использовать только на стадии формирования количественных эталонов структурных признаков. Структурными признаками в данном случае является процентное соотношение и размер фрагментов каждой фазы. Эти результаты нужно сопоставить с результатами оценки интегральных свойств поверхности на основе характеристик отраженного светового сигнала, что позволит получить корреляционную зависимость величины рассеянного светового сигнала от состояния поверхностной структуры образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плетнев П.М., Симонова Г.В., Симонов Д.П., Степанова С.А. Оптимизация методов контроля качества функциональной керамики // Сб. материалов VII Международного научного конгресса ГЕО-Сибирь. – 2011. – Т. 5. Ч. 2. – С. 211 – 214.
2. Хлебникова Е.П. Определение количественного и качественного состава керамики методами автоматизированного дешифрирования // Сб. матер. VII Международного научного конгресса ГЕО-Сибирь. – 2011. – Т. 4. – С. 55-59.

© П.М. Плетнёв, Г.В. Симонова, Д.П. Симонов, С.А. Степанова, 2012

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ЭТАЛОНОВ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Дмитрий Павлович Симонов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

В статье проанализированы возможности создания единых цифровых эталонов для автоматизированного дешифрирования различных объектов.

Ключевые слова: цифровые эталоны, дешифрирование, дешифровочные признаки.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF CREATING DIGITAL STANDARDS FOR SIGNS OF STRUCTURED SURFACES

Dmitriy P. Simonov

Siberian state academy of geodesy, 10 Plahotnogo, Novosibirsk, 630108, P.G., department of photogrammetry and remote sensing, tel. (383) 361-08-66, e-mail: dumkah@gmail.com

The article describes the analysis of possibility of establishing a common digital standards for the automated interpretation of various objects.

Key words: digital standards, interpretation, interpretive signs.

В настоящее время цифровые методы обработки информации являются наиболее перспективными инструментами для получения количественной и качественной информации об исследуемых объектах.

В основу формальной информации положена ее связь с разрешающей способностью и контрастностью снимка.

Изображение, состоящее из n дискретных элементов (точек), имеющих любой из m тонов, может принимать $N = m^n$ различных состояний. Число состояний – это и есть количество информации, тогда информационная емкость I выражается через логарифм числа состояний:

$$I = \log N = n \log m. \quad (1)$$

Подсчет по формуле (1) предполагает, что все комбинации точек и тонов считаются равновероятными. В реальных условиях для оценки информации следует учитывать, что вероятность таких комбинаций различная и зависит от характера объектов. Поэтому было введено понятие вероятностной информации.

Количество информации, содержащееся в некотором сообщении, связано с вероятностью и частотой его проявления. Если выбор производится из x сообщений, каждое из которых может быть получено с вероятностью $P(x)$, то минимальная информация, проходящая через одно сообщение, рассчитывается по формуле Шеннона:

$$H = - \sum_{x=1}^n P(x) \log P(x), \quad (2)$$

где H – энтропия, через которую количественно выражается неопределенность опознавания объекта

Дешифрирование – это процесс распознавания объектов, их свойств и взаимосвязей по их изображениям на снимке. Признаки, по которым распознаются объекты на снимках, называются дешифровочными

Задача дешифрирования – извлечь как можно больше информации со снимка, необходимой для выполнения поставленной задачи. Следовательно, результаты дешифрирования напрямую зависят от информационной емкости снимка. Информационная емкость снимка может быть формальной, вероятностной и оценочной [1].

Свойства объекта, находящие непосредственное отображение на снимках, принято называть прямыми дешифровочными признаками. К ним относятся три группы признаков: геометрические (форма, тень, размер); яркостные (тон, уровень яркости, цвет, спектральный образ); структурные (текстура, структура).

Структурные признаки тесно связаны с масштабом снимка. Так, кроны деревьев, воспринимаемые на среднемасштабном снимке как структура изображения, на более мелкомасштабных составят текстуру, а структуру на них образуют сочетания выделов с разным составом древостоя и полей между ними. Рисунок изображения принято считать надежным дешифровочным признаком, так как он мало зависит от условия освещения, сезона и технических параметров съемки [2].

Системы автоматизированной обработки цифровых данных состоят из таких подсистем, как ввод, хранение, обработка и представление результатов. Разные типы программ предоставляют пользователям различные возможности по обработке снимков, обеспечиваемые заложенными в них средствами анализа и интерфейса. К таким пакетам относятся программные продукты ERDAS, Geomatica, ENVI. В этих комплексах имеется набор процедур, реализующих основные алгоритмы распознавания образов по многоспектральным изображениям, как на основе кластерного анализа, так и с использованием обучающих процедур [3].

Получение различной информации об объектах основано на классификации массивов пикселей. Следует различать информационные и спектральные классы. Информационные классы – это те объекты, которые необходимо распознать на снимке: различные виды растительности, определенные структуры поверхности, типы горных пород и т. д. В отличие от этого, спектральный класс – это группа пикселей, обладающих приблизительно одинаковой яркостью в некотором спектральном диапазоне. Одной из основных целей классификации состоит в том, чтобы соотнести спектральные классы с информационными. Проблема состоит в том, что как правило, одному информационному классу соответствуют несколько спектральных, а некоторые выделенные спектральные классы вообще не соответствуют никаким объектам.

В качестве модельного эксперимента для сравнительной оценки различных методов дешифрирования были использованы цифровые изображения функциональной керамики типа ВГ при различных температурах спекания. Выбор керамики в качестве модели природного ландшафта обусловлен удобством направленного изменения свойств поверхности. Изменяя температуру спекания можно менять структурные характеристики без существенного изменения типа материала. Наличие малого числа природных классов на объекте (кристалл, стеклофаза и поры) и узкого спектрального интервала отображения каждого класса делает такой объект удобным как для моделирования его структурных свойств, так и для сравнительной оценки разных методов дешифрирования [4].

Для получения цифровых изображений структурированной поверхности был использован микроскоп МИА ЛабМет-И1 при увеличении 360х и цифровая фотокамера Olympus 3-420.

Для обработки изображений и создания цифровых эталонов использовался программный комплекс ERDAS IMAGINE – это один из наиболее распространенных в мире пакетов цифровой обработки и содержит базовые средства для визуализации, интерактивной коррекции и кластеризации (алгоритм Isodata) изображений, а также получения количественной информации об объектах.

Целью данной работы было показать возможность создания цифрового признака объекта (эталона) по которому его можно определить на других снимках при автоматизации дешифрирования рис. 1.

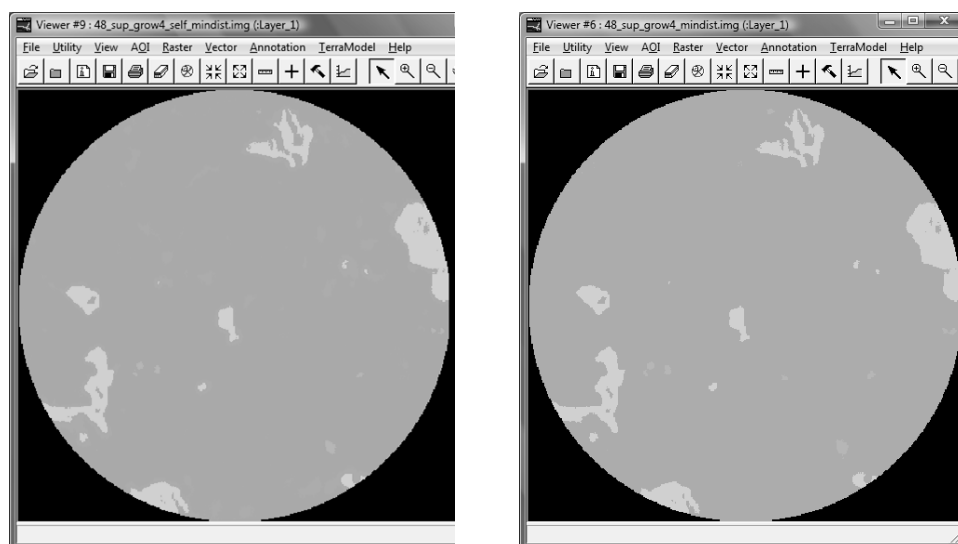


Рис. 1. Результат дешифрирования одного изображения по разным эталонам

В ходе экспериментальных работ использовались метод главных компонент, метод параллелепипедов, метод максимального правдоподобия, метод минимальных дистанций и др.

Анализ полученных результатов указал на «Метод параллелепипедов» как наиболее оптимальный. Классификация способом параллелепипедов

использует простое решающее правило и применяется, когда значения спектральной яркости разных объектов практически не перекрываются, а классов объектов немного, что соответствует поставленной задаче, однако и для этого метода достоверность дешифрирование существенно зависела от неравномерности освещения, качества обработки поверхности, глубины резкости изображения и т. д.

Для объектов с большим количеством спектральных классов и существенной зависимостью спектральной яркости от многих причин следует ожидать меньшую достоверность дешифрирования. Таким образом, спектральные признаки не являются устойчивыми даже для простых моделей, следовательно, для сложных объектов, например, типа леса, возможно нужно ориентироваться на структурные признаки.

Таблица 1. Расхождения отнесения пикселей к заданным классам

Классы	"Чужие" эталоны		"Свои" эталоны		Расхождение
	Пиксели	Проценты	Пиксели	Проценты	
Class 1	104810	5,443%	101675	5,280%	0,163%
Class 2	138617	7,198%	135611	7,042%	0,156%
Class 3	5743	0,298%	3329	0,173%	0,125%
Class 4	1676593	87,061%	1685148	87,505%	
Всего	1925763	100,000%	1925763	100,000%	

Создание единого цифрового эталона для определения и выделения заданного объекта на изображении методами цифровой обработки изображений позволит значительно сократить время и трудозатраты как на контроль качества продукции так и повысить достоверность экспертной оценки исследуемых изображений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аковецкий В.И. Дешифрирование снимков [Текст]: учеб. для вузов / В.И. Аковецкий. – М.: Недра, 1983. – 374 с.
2. Яншин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы [Текст] / В.В. Яншин. – М.: Машиностроение, 1995. – 112 с.
3. Лурье И.К. Теория и практика цифровой обработки изображений [Текст] / И.К. Лурье, А.Г. Косиков. – М.: Научный мир, 2003. - 168 с., 8 с. цв. вкл.
4. Симонов Д.П. Определение количественного и качественного состава керамики методами автоматизированного дешифрирования [Текст] / Е.П. Хлебникова, Д.П. Симонов // Сб. матер. VII Международного научного конгресса "ГЕО-Сибирь-2011", Новосибирск. - Т. 4. – Новосибирск: СГГА, 2011. - С. 55-59.

© Д.П. Симонов, 2012

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ВЫБОРОЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРТИЙ ПРОДУКЦИИ

Татьяна Михайловна Соловьева

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. (383) 3610745, (383)3610745, e-mail: s_t_m_83@mail.ru

В статье предложена методика оценки достоверности результатов сплошного и выборочного выходного измерительного контроля изделий, основанная на применении метода имитационного моделирования. Приведен пример планирования многопараметрического контроля качества ограниченных партий изделий.

Ключевые слова: риски заказчика и производителя, выборочный контроль, имитационное моделирование.

WORKING OUT OF TECHNIQUES OF SELECTIVE MEASURING CONTROL OF CONSIGNMENTS OF GOODS

Tatyana M. Soloveva

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, street Plahotnogo 10, the post-graduate student of chair of metrology, standardization and certification, Telephone: (383 3610745), e-mail: s_t_m_83@mail.ru

In article the technique of an estimation of reliability of results of continuous and selective target measuring control of the products, based on application of a method of imitating modeling is offered. The example of planning of multiple parameter quality assurance of the limited lot of products is resulted.

Key words: customer's risk, producer's risk, the selective surveillance, simulation modelling.

Статья посвящена вопросам разработки методик сплошного и выборочного измерительного контроля качества продукции [1]. Рассмотрена ситуация, когда выходному контролю подвергаются изделия без явных дефектов. Не соответствующие требованиям нормативных документов (НД) изделия выявляются только при инструментальном контроле нескольких параметров изделий (контролируется несколько определяющих качество изделия параметров). Отметим, что планирование многопараметрического контроля является наиболее актуальной в современных условиях задачей.

Выделяют измерительный контроль и контроль по альтернативному признаку (далее - альтернативный). При измерительном контроле с помощью средств измерений (СИ) измеряются параметры изделия, характеризующие его безопасность и качество. Затем результаты измерений сравниваются с установленными в НД (стандартах или технических регламентах) допускаемыми значениями этих параметров. При выходе хотя бы одного параметра за допускаемую границу изделие признается не соответствующим

требованиям (бракуется). Известно, что погрешности выполняемых при контроле измерений могут привести к ошибкам контроля 1 рода (когда годное изделие ошибочно бракуется) и к ошибкам 2 рода (когда фактически негодное изделие признается годным) [2-6].

Качество результатов контроля принято характеризовать степенью доверия к ним - достоверностью. Широко применяемыми показателями достоверности контроля являются вероятности ошибок контроля 1 и 2 рода, а также риски заказчика и производителя.

Вероятность ошибки контроля 1 рода P_1 – это вероятность забраковать при контроле изделие при условии, что фактически оно годное (т. е. все параметры изделия находятся в поле допуска). Эта вероятность при серийном производстве характеризует среднюю долю ошибочно забракованных изделий среди всех поступивших на контроль фактически годных изделий.

Вероятность ошибки контроля 2 рода P_2 – это вероятность признать в результате контроля годным изделие при условии, что фактически оно негодное (при серийном производстве характеризует среднюю долю признанных годными изделий среди всех поступивших на контроль фактически негодных изделий).

Вероятности ошибок контроля 1 и 2 рода характеризуют прежде всего качество методик контроля и их представляется целесообразным применять как критерии достоверности при планировании методик контроля единичных изделий или при мелкосерийном производстве. Для потребителей особенно важно, чтобы значение ошибки контроля 2 рода было достаточно малым.

Риск производителя $R_{\text{п}}$ – безусловная вероятность забраковать годное изделие (при серийном производстве характеризует среднюю долю ошибочно забракованных годных изделий в партии поступивших на контроль изделий).

Риск заказчика R_z – вероятность того, что изделие фактически негодно при условии, что в результате контроля оно признано годным (характеризует среднюю долю фактически негодных изделий среди всех признанных в результате контроля годными). Отметим, что R_z является аналогом показателя ppm (аббревиатура от «part per million»), представляющего собой среднюю долю негодных изделий, приходящуюся на миллион выпущенных изделий. Этот показатель широко применяется в за рубежом для характеристики качества технологических процессов при серийном и массовом производстве [7].

Риск заказчика зависит как от качества методики контроля, так и от доли негодных изделий среди поступающих на контроль (т.е. от качества производства). Его целесообразно использовать при оптимизации методик контроля серийно выпускаемой и массовой продукции [8].

Оценить риски заказчика и производителя с учетом погрешности измерений в случае многопараметрического контроля можно методом имитационного (статистического) моделирования [2-6, 8, 9].

Приведенные в [8,9] экспериментальные оценки рисков заказчика и изготовителя получены с помощью имитационной модели контроля в предположении, что партия изделий велика (10^6 штук). Поэтому эти оценки достаточно близки к значениям математических ожиданий искомых рисков.

Реальные партии продукции обычно меньше по объему, и оценки рисков заказчика и изготовителя (которые являются случайными величинами) для партий могут существенно отличаться от соответствующих математических ожиданий. Поэтому представляют интерес границы, в которых искомые риски могут находиться с большой вероятностью (доверительные границы).

Эти доверительные границы также могут быть найдены с помощью имитационной модели контроля способом, предложенным в [8]. В качестве верхней доверительной оценки рисков используются максимальные значения рисков (из оценок, которые получены при многократной имитации контроля выборок из партии изделий заданного объема). Граничные значения искомых рисков, полученные таким способом, при непрерывных одномодальных распределениях соответствуют достаточно высокой доверительной вероятности.

Рассмотрим пример. Некоторые экспериментально полученные при моделировании на компьютере результаты приведены ниже. В приведенном примере в качестве верхних доверительных границ рисков использованы максимальные значения рисков из тех оценок, которые получены при 50 - кратной имитации контроля выборок из партии изделий (V_n). Полученные таким образом оценки рисков соответствуют достаточно высокой доверительной вероятности (не ниже 0,95).

Приведенные в предлагаемом примере результаты получены методом имитационного моделирования при следующих исходных данных. Процедура измерительного контроля имитировалась для двух партий, состоящих из одной и десяти тысяч изделий (т. е. $V_{n1} = 10^3$, $V_{n2} = 10^4$). Предполагалось, что качество каждого изделия характеризуется 30 подлежащими контролю идентичными независимыми параметрами. Все параметры вследствие технологического разброса при производстве являются случайными величинами и распределены по нормальному закону с известным математическим ожиданием (МО) и среднеквадратичным отклонением (СКО) σ . Предполагалось также, что МО параметров совпадают с номинальными значениями соответствующих параметров, а СКО может принимать значения 1 (при стандартной технологии производства) или 0,9 (при улучшенной технологии). Предельное допускаемое отклонение от МО (граница поля допуска) для всех параметров при моделировании принято равным 3.

Моделью погрешности измерений при контроле служила равномерно распределенная случайная величина с СКО $\sigma_{\text{и}} = 0,1$. Отметим, что распределения контролируемых параметров (и их численные характеристики) могут быть различными, так как модель допускает их изменение в соответствии с конкретными требованиями. Также может быть изменена модель погрешности измерений.

Объем контролируемой выборки изделий (V_k) принимался равным 0; 20; 40; 60; 80 и 100 % от объема партии. Например, для V_{n1} при $V_k = 20$ % имитировался контроль 200 случайно выбранных изделий из 1 000, а при $V_k = 100$ % имитировался сплошной контроль. При вычислении оценок искомых рисков предполагалось, что заказчику поступают как признанные при контроле

годными изделия, так и все не подвергнутые контролю изделия. В результате имитации контроля партии из $V_n = 10^6$ изделий были получены оценки искомых рисков, которые вследствие большого объема партии достаточно близки к математическим ожиданиям этих рисков. Указанные оценки рисков, очевидно, являются наиболее вероятными.

Также контроль имитировался, как отмечено, для партий V_{n1} и V_{n2} (по 50 раз при каждом значении V_k), и указанным способом были найдены оценки верхних доверительных границ искомых рисков («худшие» оценки).

Результаты расчетов рисков (в зависимости от объема выборки) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки рисков заказчика и производителя при $\sigma_n = 0,1$.

Риски	σ	Оценки	Объем выборки V_k (%)					
			0	20	40	60	80	100
R_n	1,0	$V_n = 10^6$	0	0,25	0,50	0,76	1,0	1,27
		$V_{n1} = 10^4$	0	0,40	0,69	0,90	1,23	1,51
		$V_{n2} = 10^3$	0	0,60	1,10	1,60	1,80	1,90
	0,9	$V_n = 10^6$	0	0,11	0,22	0,34	0,43	0,55
		$V_{n1} = 10^4$	0	0,22	0,34	0,52	0,56	0,75
		$V_{n2} = 10^3$	0	0,40	0,60	0,80	1,20	1,10
R_z	1,0	$V_n = 10^6$	7,79	6,50	5,20	3,84	2,44	0,98
		$V_{n1} = 10^4$	8,23	7,27	5,55	4,25	2,70	1,24
		$V_{n2} = 10^3$	9,20	8,67	6,89	5,50	3,78	1,88
	0,9	$V_n = 10^6$	2,54	2,11	1,70	1,24	0,80	0,37
		$V_{n1} = 10^4$	2,87	2,49	1,99	1,44	1,04	0,55
		$V_{n2} = 10^3$	3,90	3,13	2,22	2,04	1,33	0,72

Отметим, что при объеме выборки $V_k = 0$ % контроль отсутствует. При этом, очевидно, риск производителя $R_n = 0$. Риск заказчика R_z при $V_n = 10^6$ должен быть близок к математическому ожиданию доли негодных изделий в партии [7], или равен максимальной зафиксированной доле негодных изделий (при V_{n1} или V_{n2}).

Рассмотрим, как могут быть использованы полученные результаты. Пусть, например, в контракте на поставку продукции (или в соответствующем техническом регламенте) установлено, что максимальный допустимый риск заказчика $R_z^d = 1$ %, и пусть СКО погрешности измерений $\sigma_n = 0,1$. Тогда из таблицы найдем, что при объеме партии, близком к V_{n1} ($\sim 10^4$ изделий), риск заказчика с высокой вероятностью не превышает R_z^d только при улучшенной технологии производства (при $\sigma = 0,9$) и контроле более 80 % изделий. В этом случае граничное значение $R_z = 1,04$ %, а $R_n = 0,56$ %. Для партии в 1000 изделий, чтобы обеспечить необходимое качество продукции после контроля, необходим практически сплошной контроль. При этом $R_n = 1,1$ %.

Таким образом, разработанный метод оценки достоверности выходного выборочного многопараметрического контроля позволяет планировать методики контроля для малых партий изделий. При этом следует использовать верхние доверительные границы искомых рисков (которые также определяются методом имитационного моделирования).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.563-2009. ГСИ Методики (методы) измерений. – М: Стандартиформ, 2010.
2. Данилевич С.Б. О специфике измерений и допускового измерительного контроля // Измерительная техника, 2003. – № 8. – С. 16-19.
3. Данилевич С.Б., Данилевич К.С. Многопараметрический контроль качества // Методы менеджмента качества. – 2002. – № 12.
4. Данилевич С.Б., Княжевский В.В. Планирование выборочного измерительного контроля методом имитационного моделирования // Методы менеджмента качества. – 2004. – № 4. – С. 33-36.
5. Данилевич С.Б., Колесников С.С. Разработка методик эффективного контроля сложных объектов // Измерительная техника. – 2007. – № 5. – С. 19-22.
6. Данилевич С.Б. Разработка эффективных методик контроля и испытаний продукции. Монография. Новосибирский филиал АСМС. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 120 с.
7. Данилевич С.Б., Соловьева, Т.М. Оценка достоверности результатов измерительного многопараметрического контроля // Главный метролог. – 2009. – №5. – С. 43-46.
8. Розно М.И. Откуда берутся неприятности? // Стандарты и качество. – 2002. – № 11. – С. 14-20.
9. Рубичев Н.А., Фрумкин В.Д. Достоверность допускового контроля качества. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 172 с.

© Т.М. Соловьева, 2012

ИСПЫТАНИЯ АИИС КУЭ В ЦЕЛЯХ УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА

Василий Юрьевич Кондаков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. 361-07-45, e-mail: faska2@inbox.ru

Владимир Сергеевич Крылов

ФГУП «СНИИМ», 630004, Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер, 210-22-05, e-mail: krulov@sniim.nsk.ru

В статье приводятся этапы и методы испытаний АИИС КУЭ, перечислены основные недостатки, выявляемые при испытаниях, и методы их решения.

Ключевые слова: АИИС КУЭ, испытания в целях утверждения типа.

AUTOMATED INFORMATION MEASURING SYSTEM FOR ELECTRIC POWER COMMERCIAL ACCOUNTING OFFICIAL TESTING FOR TYPE APPROVAL

Vasilii Ju. Kondakov

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo st., 10, lecturer, 361-07-45, vkondakov@sibmail.ru

Vladimir S. Krulov

FSUI «SNIIM», 630004, Novosibirsk, Dimitrov st., 4, engineer, 210-22-05, krulov@sniim.nsk.ru

In article stages and test methods of AIMS EPCA are resulted, the basic lacks revealed at tests, and methods of their decision are listed.

Key words: AIMS EPCA, official testing for type approval.

Испытание автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электрической энергии в целях утверждения типа проводятся для обеспечения государственного регулирования в области осуществления торговли и товарообменных операций в исполнение федерального закона об обеспечении единства измерений. Для доступа на оптовый рынок электроэнергии и мощности организации эксплуатирующей АИИС КУЭ необходимо в ОАО «Администратор торговой сети» предъявить комплект документов, подтверждающих соответствие АИИС КУЭ предъявляемым требованиям, в том числе свидетельство об утверждении типа АИИС КУЭ как единичного экземпляра СИ. Испытаниями АИИС КУЭ занимаются многие метрологические центры, но не все испытатели четко понимают специфику испытаний таких систем.

Порядок испытаний АИИС КУЭ, как и любых испытаний средств измерений в целях утверждения типа, регламентирован в ПР 50.2.104 и МИ 3290-2010. Испытания АИИС КУЭ начинаются с заявки от Заявителя в адрес

Испытателя. Вместе с заявкой направляется проектная документация для оценки объемов работ и их стоимости. После заключению договора Испытателя с Заявителем разрабатывается программа испытаний. Разработанная программа испытаний утверждается Испытателем и согласуется Заявителем. Для проведения экспериментальных проверок представителям Испытателя необходимо выехать на место эксплуатации АИИС КУЭ и получить все разрешающие допуски на право безопасного проведения работ. Если подстанции, где установлены счетчики АИИС КУЭ, принадлежат предприятию, эксплуатирующему эту АИИС КУЭ, то допуски получить необходимо только в этой организации. Но часто подстанции принадлежат сторонним электросетевым организациям, и тогда проведение инструктажей и получение допусков является серьезной организационной проблемой. Решением этой задачи занимается Заказчик. После проведения экспериментальных проверок, если выявлены недостатки, то они должны быть устранены. Соответствующее письмо с перечнем замечаний направляется Заявителю. После положительных экспериментальных проверок Испытателем оформляется Акт испытаний и приложения к нему: описание типа, протоколы испытаний и методика поверки. Все документы оформляются в трех экземплярах. Один отправляется на экспертизу во ВНИИМС, два других остаются у Заявителя и Испытателя. ВНИИМС после рассмотрения поступивших документов вместе с Росстандартом оформляет свидетельство об утверждении типа АИИС КУЭ как единичного экземпляра.

Программы испытаний АИИС КУЭ обычно разрабатываются на основе уже существующих программ испытаний АИИС КУЭ, тип которых утверждался ранее Испытателем. Первым этапом испытаний, согласно программе испытаний, является проверка документации. Целью этой проверки является определение всех измерительных компонентов, их типов и характеристик. Проверяется наличие свидетельств об утверждении типа или сертификатов об утверждении типа на каждый измерительный компонент как отдельного средства измерений. Требование о применении измерительных компонентов только утвержденных типов изложено в п. 7.3 ГОСТ Р 8.596-2002. В техническом проекте проверяется соответствие приведенных метрологических характеристик существующим правилам по метрологии и применение только единиц физических величин допущенных в РФ. Для уменьшения объема экспериментальных испытаний допускается проверка паспортов-протоколов на каждый информационно-измерительный комплекс. Паспорта протоколы должны быть согласованы с территориальными органами государственной метрологической службы. Но при этом необходим выборочный контроль достоверности результатов обследования, приведенных в паспортах протоколах.

Экспериментальные проверки на месте эксплуатации начинаются с внешнего осмотра счетчиков, вторичных цепей, устройств сбора и передачи данных (УСПД) и сервера. По опыту проведения испытаний основным недостатком является отсутствие маркировки вторичных цепей измерительных трансформаторов. Согласно требованиям Положения Министерства топлива и

энергетики РФ о порядке проведения ревизии и маркирования специальными знаками визуального контроля средств учета электрической энергии от 1998г. должны быть: актуализированные схемы вторичных цепей, промаркированные линии, клеммные колодки, автоматы и счетчики.

Поправка часов счетчиков относительно шкалы времени UTC не должна превышать ± 5 секунд в соответствии с требованиями Приложения 11.1 к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Проверка этой поправки выполняется либо визуальным сравнением эталонных часов с часами на индикаторе счетчика, либо с помощью программы опроса счетчиков, которой можно сравнить часы счетчика с часами ноутбука, синхронизованного по NTP. Для счетчиков СЭТ в программе «Конфигуратор СЭТ» есть средства для установки и коррекции времени, которые показывают часы ноутбука и счетчика одновременно. В практике испытаний замечено, что если синхронизация часов хотя бы одного счетчика на подстанции не работает, то и не работает синхронизация для всех счетчиков на подстанции. Конфигурирование синхронизации часов счетчиков осуществляется после монтажа системы, при этом возможны ошибки в указании источника шкалы времени UTC, отсутствие связи со спутниками GPS, невозможность корректировки часов из-за очень большого значения поправки.

Одной из самых важных проверок выполнения системных функций является проверка информационного обмена. Она выполняется путем сравнения результатов измерения электроэнергии из регистров счетчика с результатами измерений электроэнергии из отчетного XML файла АИИС КУЭ, отправляемого в ОАО «АТС». Считывание регистров счетчика производится с помощью портативного оптического считывающего устройства по интерфейсам ГОСТ Р МЭК61107-2001. В регистрах счетчика хранятся значения электроэнергии без учета коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов, а в XML файле результаты электроэнергии заносятся умноженными на коэффициенты. При проверке информационного обмена проверяется не только работоспособность каналообразующей аппаратуры (модемов, УСПД, маршрутизаторов), но и правильность коэффициентов трансформации записанных в базе данных. Основные недостатки, выявляемые при испытаниях, это несоответствие названия точки измерений в XML файле и её физического расположения на подстанции, несоответствие записанных в базе данных коэффициентов трансформаторов. Устраняются данные замечания переконфигурированием программного обеспечения сервера.

Дальнейшие экспериментальные проверки касаются соблюдения условий применения измерительных компонентов. Выход за нормальные условия применения приводит к появлению дополнительных погрешностей. Для счетчиков электрической энергии по ГОСТ 52323-2005 установлены нормальные условия внешней магнитной индукции в месте установки счетчиков не более 0,05 мТл. Превышение этого значения для постоянной магнитной индукции было замечено только в регионе Курской магнитной аномалии. Возможно превышение постоянной индукции возле счетчиков на

предприятиях использующих большие постоянные токи, например в металлургическом производстве.

Проверки условий применения измерительных трансформаторов состоят из проверок мощности нагрузки на вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения. Согласно ГОСТ 7746-2001 нагрузка на вторичную обмотку трансформатора тока должна быть в пределах от 25 % до 100 % номинального значения мощности нагрузки. Измерений мощности выполняется двумя способами: с отключением и измерением полного сопротивления цепи или методом амперметра-вольтметра без отключения. При этом обычно для трансформаторов тока установленных в ЗРУ 6-10 кВ измерения проводят с отключением, потому что цепь от трансформатора до счетчика имеет небольшую длину и выполнить достоверные измерения методом амперметра-вольтметра невозможно. По практике испытаний АИИС КУЭ замечено, что для трансформаторов тока установленных в ЗРУ 6-10 кВ и счетчиков установленных на передних панелях ячеек ЗРУ 6-10 кВ в 80 % случаев наблюдается недогруз. Устранение недогруженных вторичных обмоток трансформаторов тока осуществляется включением в фазные проводники догрузочных резисторов последовательно. Измерений нагрузок на вторичные обмотки трансформаторов напряжения можно выполнить только в рабочем их состоянии под напряжением. Измерения проводятся методом амперметра-вольтметра. По практике испытаний встречаются как недогруженные трансформаторы, так и перегруженные. Недогруз трансформаторов напряжения устраняется установкой догрузочных резисторов параллельно измерительным обмоткам. Важное условие при установке догрузочных резисторов: резисторы должны быть подключены к самому ближайшему клеммнику от трансформатора напряжения, чтобы не создавать дополнительный ток во вторичной цепи и не вызывать падение напряжения в цепи от трансформатора напряжения до счетчика.

Падение напряжения в цепи от трансформатора напряжения до счетчика не должно превышать 0,25% от номинального напряжения по требованиям п. 1.5.19 ПУЭ и требования Приложения 11.1 к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Измерений падения напряжения осуществляется с помощью вольтметра с прокладкой дополнительного провода от счетчика до трансформатора напряжения. Другой способ выполним, когда невозможно проложить провод, заключается в одновременном измерении напряжения на трансформаторе напряжения и на счетчике двумя синхронизованными и калиброванными вольтметрами. Разница в показаниях вольтметров и будет падение напряжения в цепи от трансформатора напряжения до счетчика. По опыту испытаний замечено, что превышение падения напряжения обусловлено падением в автоматических выключателях и в проводах, если в них протекает относительно большой ток. Устранение данного недостатка решается только установкой автоматов с большим током отсечки и прокладкой отдельных цепей напряжения до каждого счетчика.

После окончания экспериментальных проверок проводится расчет границ допускаемых погрешностей для измерительного канала, складывающейся из: амплитудной погрешности трансформатора тока, амплитудной погрешности трансформатора напряжения, погрешности схемы включения, обусловленной угловыми погрешностями трансформаторов, основной погрешности счетчика и дополнительных погрешностей счетчика. Рассчитанные погрешности нормируются в виде относительных для граничных условий информативных параметров: силы тока и коэффициента мощности. Абсолютные значения погрешности результатов измерений приписываются по аттестованной методике измерений с помощью данной АИИС КУЭ.

Во время проведения экспериментальных проверок происходит апробация методики поверки, так как действия по методике поверки совпадают с выполнением действий по программе испытаний, кроме одного. Проверка идентификационных данных метрологически значимой части программного обеспечения АИИС КУЭ. При испытаниях определяется метрологически значимая часть программного обеспечения. Для АИИС КУЭ это программное обеспечение сервера, которое выполняет сбор результатов измерений – реализует драйвера счетчиков, выполняет обработку результатов измерений – умножает на коэффициенты трансформации, сохраняет результаты измерений в базу данных и формирует отчетный файл с результатами измерений для его передачи другим организациям. Для наиболее часто используемых средств верхнего уровня в АИИС КУЭ нами определены файлы, относящиеся к метрологически значимому программному обеспечению. И определено влияние программного обеспечения на метрологические характеристики: для АИИС КУЭ дополнительная погрешность программного обеспечения не превышает единицы младшего разряда результата измерений.

По итогам опыта испытаний АИИС КУЭ наибольшее количество недостатков, выявляемых при испытаниях, распределено так: 1. превышение падения напряжения в цепи от трансформатора напряжения до счетчика. 2. недогруз вторичных обмоток трансформаторов тока, 3. недогруз вторичных обмоток трансформаторов напряжения.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ АИИС КУЭ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Василий Юрьевич Кондаков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, тел. 361-07-45, e-mail: faska2@inbox.ru

Владимир Сергеевич Крылов

ФГУП «СНИИМ», 630004, Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер, 210-22-05, krulov@sniim.nsk.ru

В статье приводятся два метода расчета погрешности измерения электрической энергии. С помощью численного эксперимента проводится их сравнение и определяется методическая погрешность для каждого метода. В заключении описывается теоретическая основа рассчитанных методических погрешностей.

Ключевые слова: АИИС КУЭ, методика измерений, расчет погрешности.

METHODS CALCULATION ERROR MEASURE ELECTRICAL ENERGY FOR AUTOMATED INFORMATION MEASURING SYSTEM FOR ELECTRIC POWER COMMERCIAL ACCOUNTING

Vasilii Ju. Kondakov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, senior teacher, department «Metrology, standardization and certification», 361-07-45, vkondakov@sibmail.ru

Vladimir S. Krulov

FSUI «SNIIM», 630004, Novosibirsk, Dimitrov st., 4, engineer, tel. 210-22-05, e-mail krulov@sniim.nsk.ru

Two methods of calculation of an error of measurement of electric energy are given in article. By means of numerical experiment comparison is carried out them and the methodical error for each method is defined. In the conclusion the theoretical basis of the calculated methodical errors is described.

Key words: AIMS EPCA, measurement procedure, calculation error.

Погрешности АИИС КУЭ рассчитываются согласно аттестованным методикам измерений, разрабатываемым для каждой конкретной системы. В разделе обработка результатов в методике измерений приводят алгоритм расчета приписываемой погрешности электрической энергии по ее измеренным значениям. Для приписывания погрешности результату измерений необходимо вычислить значение тока и коэффициента мощности по измеренным значениям электроэнергии, определить по таблице относительную погрешность для области токов и коэффициентов мощности, в которой находятся вычисленные значения, и затем рассчитать абсолютную погрешность.

Для оптового рынка электроэнергии используют два метода расчета погрешностей. Первый метод, дифференциальный, основанный на расчете двух средних значений силы тока отдельно для направления приема и отдачи. Вторым методом, интегральный, основанный на расчете общего тока для всех направлений.

Измерительный канал АИИС КУЭ осуществляет измерение активной и реактивной электрической энергии в двух направлениях за получасовой интервал, что является исходной информацией для расчета погрешности.

Дифференциальный метод заключается в расчете среднего тока и коэффициента мощности за получасовой интервал отдельно для направления прием и для направления отдачи. Вычисление относительной погрешности из погрешностей измерительных компонентов канала и приписывания в зависимости от тока и коэффициента мощности относительной погрешности для каждого направления в отдельности. Алгоритм расчета по данному методу приведен на рис. 1.

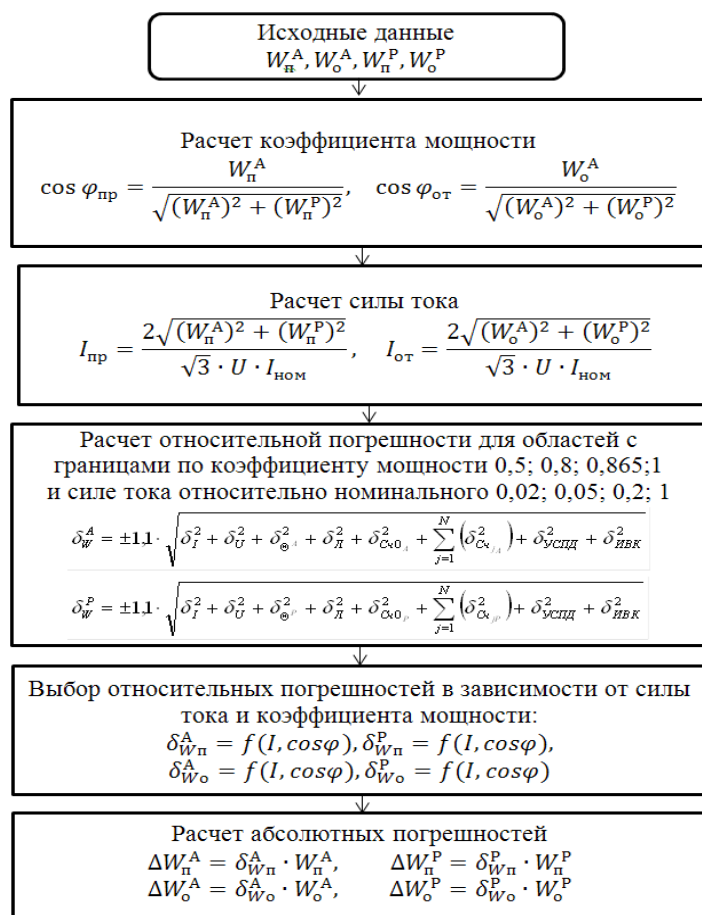


Рис. 1. Алгоритм расчета погрешности по дифференциальному методу

Интегральный метод заключается в расчете общего среднего тока и коэффициента мощности для обоих направлений. Вычисление относительной погрешности из погрешностей измерительных компонентов канала, так же как и в дифференциальном методе. Приписывание одинаковой относительной

погрешности и для направления прием и для направления отдачи. Алгоритм расчета погрешности по интегральному методу приведен на рис. 2.

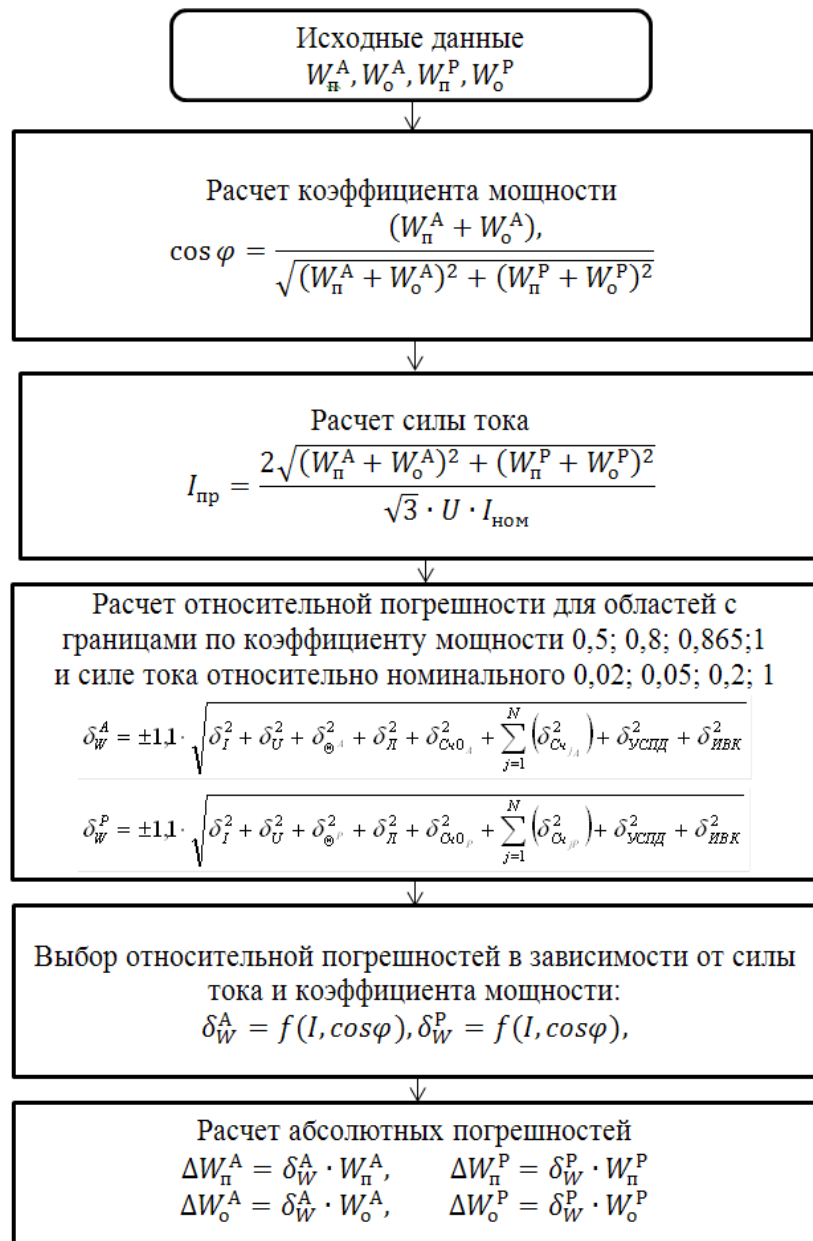


Рис. 2. Алгоритм расчета погрешности по интегральному методу

Используемые обозначения в алгоритмах: W_{π}^A – активная электроэнергия в направлении прием, т. е. переданная в сети; W_o^A – активная электроэнергия в направлении отдачи, т. е. переданная из сетей; W_{π}^P – реактивная электроэнергия в направлении прием, т.е. при приеме активной электроэнергии преобладает индуктивность, или при отдаче активной энергии преобладает емкость в сети; W_o^P – реактивная электроэнергия в направлении отдачи, т. е. при приеме активной электроэнергии преобладает емкость, или при отдаче активной энергии преобладает индуктивность в сети.

В численном эксперименте рассчитывались погрешности по двум методам и сравнивались с достоверным значением абсолютной погрешности. Входные величины для численного эксперимента – постоянные значения силы тока, и угол вектора полной мощности, определяющий направление течения активной электроэнергии, коэффициент мощности и характер реактивного потребления в сети на пятнадцатиминутном интервале времени. Из этих данных вычислялись соответствующие определенному направлению активная и реактивная электроэнергия. Для каждого пятнадцатиминутного интервала по значениям тока и коэффициента мощности определялась относительная погрешность. И затем рассчитывалась абсолютная погрешность. Электроэнергии суммировались по двум пятнадцатиминутным интервалам в получасовые значения, подобно как в регистрах счетчика. Абсолютная погрешность электроэнергии для получасового интервала определялась суммой абсолютных погрешностей двух пятнадцатиминутных интервалов. Эта абсолютная погрешность и есть достоверная, т.к. определена для неизменных значений тока и коэффициента мощности. По алгоритмам дифференциального и интегрального метода вычислялись абсолютные погрешности для получасового интервала. Методическая ошибка вычислялась как относительная разность между абсолютной погрешностью, определенной по дифференциальному или интегральному методу, и достоверной абсолютной погрешностью.

Для определения более достоверного метода расчет методических ошибок был выполнен многочисленное количество раз. Входные значения токов и углов вектора полной мощности задавались по методу Монте-Карло. Входные величины имели равномерное распределение в области допустимых значений. Критерий окончания итеративного цикла Монте-Карло – неизменность математических ожиданий и СКО методических ошибок более чем на 0,1 %.

Таблица 1. Результаты численного эксперимента

	Дифференциальный метод		Интегральный метод	
	МО	СКО	МО	СКО
Активная прием	-15,6%	36%	-2,4%	18%
Активная отдача	-14,9%	36%	-2,4%	18%
Реактивная прием	-36,6%	64%	-13,5%	55%
Реактивная отдача	-36,0%	64%	-13,6%	55%

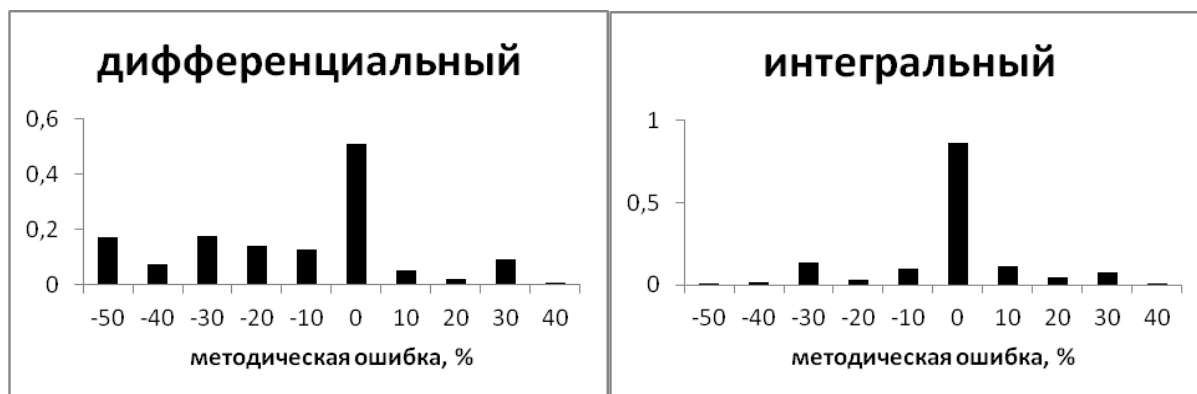


Рис. 3. Диаграммы распределения методических ошибок

По полученным отрицательным методическим ошибкам для обоих методов можно заключить, что приписанные погрешности АИИС КУЭ в среднем занижаются. По анализу диаграмм в частном случае вероятно как занижение погрешностей, так и завышение.

При замене реальных значений силы тока и коэффициента мощности в дифференциальном методе происходит завышение коэффициента мощности и занижение силы тока. Так как относительная погрешность имеет большую зависимость от коэффициента мощности, то происходит занижение погрешности. Рассмотрим случай емкостного потребления электроэнергии. Для такого получасового интервала результаты измерений электроэнергии будут следующие: W_{Π}^A, W_0^P . По дифференциальному методу расчет коэффициента мощности для приема электроэнергии выполняется по формуле:

$$\cos \varphi_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}^A}{\sqrt{(W_{\Pi}^A)^2 + (0)^2}} = \frac{W_{\Pi}^A}{W_{\Pi}^A} = 1.$$

Информация о реальном коэффициенте мощности полностью теряется – он принимается равным единице, при этом погрешность становится минимальной.

В случае применения интегрального метода коэффициент мощности не завышается, а соответствует действительному при любом характере передачи электроэнергии. Но в случае реверса в получасовом интервале погрешность по интегральному методу занижается из-за завышения силы тока, сравнение:

$$\frac{2\sqrt{(W_{\Pi}^A + W_0^A)^2 + (W_{\Pi}^P + W_0^P)^2}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{ном}}} > \frac{2\sqrt{(W_{\Pi}^A)^2 + (W_{\Pi}^P)^2}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{\text{ном}}}$$

Зависимость относительной погрешности от силы тока становится сильной только в начале диапазона измерений тока, поэтому увеличение силы тока менее существенно чем увеличение коэффициента мощности.

Методические ошибки определения погрешности возникают из-за замены непрерывно изменяющегося коэффициента мощности и силы тока его средним значением на получасовом интервале. Пока неизвестен график изменения этих параметров в течение получасового интервала невозможно точно определить зависимость от них величины – это не только погрешности измерений, но и рассчитываемые потери электроэнергии в силовых элементах электрической сети. Выводы по результатам исследования следующие: 1. Более достоверным методом расчета погрешностей является интегральный метод. 2. Для повышения достоверности расчетных значений погрешности измерения электроэнергии следует иметь информацию о характере течения электроэнергии внутри получасового интервала.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЁННЫХ ЧАСОВ НА ТРАССЕ СНИИМ-СГГА

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, ФГУП «СНИИМ», 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова 4, начальник службы времени и частоты, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Иван Евгеньевич Макаров

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (ФГУП «СНИИМ»), 630004, Новосибирск, пр. Димитрова, 4, инженер 1-й категории, аспирант, тел.: (383)229-75-05, e-mail: barmaley_82@mail.ru

Описывается серия экспериментов по синхронизации пространственно-разнесённых часов, выполняемых в рамках Федеральной Целевой Программы (ФЦП) ГЛОНАСС. Целью эксперимента является оценка погрешностей синхронизации часов на трассе СНИИМ-СГГА. Эксперимент проводится в рамках перехода наземного комплекса управления (НКУ) ГЛОНАСС на беззапросные технологии измерений.

Ключевые слова: синхронизация часов, спутниковая навигационная система ГЛОНАСС, псевдодальность, беззапросная измерительная станция (БИС), водородный стандарт частоты и времени.

EXPERIMENTS ON SYNCHRONIZATION OF THE SPATIALLY CARRIED CLOCKS ON LINE SNIIM-SGGA

Alexander S. Tolstikov

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, FGUP "SNIIM", 630004, Novosibirsk, Dimitrova 4, head of National time and frequency service, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Ivan E. Makarov

Siberian Scientific-Research Institute of Metrologie (FGUP SNIIM), Dimitrova Av., 4, Novosibirsk, 630004, the engineer of 1st category, the post-graduate student, tel. (383)229-75-05, e-mail: barmaley_82@mail.ru

A series of experiments on synchronisation of the spatially-carried clocks, carried out within the limits of the Federal Target Program (FCP) GLONASS is described. The experiment purpose is the estimation of errors of synchronisation of hours on line SNIIM-SGGA. Experiment is spent within the limits of transition of a land complex of management (NKU) GLONASS on non-request technologies of measurements.

Key words: synchronisation of clocks, satellite navigating system GLONASS, pseudo-range, non-request measuring station (BIS), the hydrogen standard of frequency and time.

В 2011 году в ФГУП "СНИИМ" и ГОУ ВПО "СГГА" при поддержке ГОУ ВПО "СФУ" (г. Красноярск) и ОАО "ИСС им. М.Ф. Решетнева" (г.

Железногорск) были проведены исследования прецизионного измерителя наклонных дальностей МРК 33, который рассматривается как прототип беззапросной измерительной станции (БИС) в системе эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС, в сравнении с высокоточными зарубежными измерителями. Анализировалось влияние проблемных факторов: проявлений многолучевости и наличия неучтенных задержек навигационного сигнала на точность измерений геометрических дальностей от навигационного спутника до антенны БИС. Исследования проводились на площадках СНИИМ и СГГА.

Важным условием в организации высокоточных траекторных измерений является применение опорной шкалы времени, согласованной с системной шкалой времени $ГЛОНАСС(TIME)$. В качестве источника такой опорной шкалы $T(on)$ для экспериментов на площадке СГГА использовался пассивный водородный стандарт частоты Ч-1006, работающий в режиме перевозимых квантовых часов (ПКЧ).

Для обеспечения экспериментов на площадке СГГА опорной шкалой времени часы на основе Ч-1006 были сведены по моменту шкалы времени и по частоте с эталонной шкалой $UTC(Nm)$ государственного вторичного эталона единиц времени, частоты и шкалы времени ВЭТ1-19 ГСВЧ ФГУП "СНИИМ". После сведения по параметрам часы на основе стандарта частоты Ч-1006 были перемещены на экспериментальную площадку СГГА.

По окончании экспериментов, спустя 26 суток, часы были возвращены в СНИИМ и оценено расхождение шкал времени $UTC(Nm) - T(on)$, возникшее за время экспериментов и определены характеристики нестабильности этих часов (рис. 1).

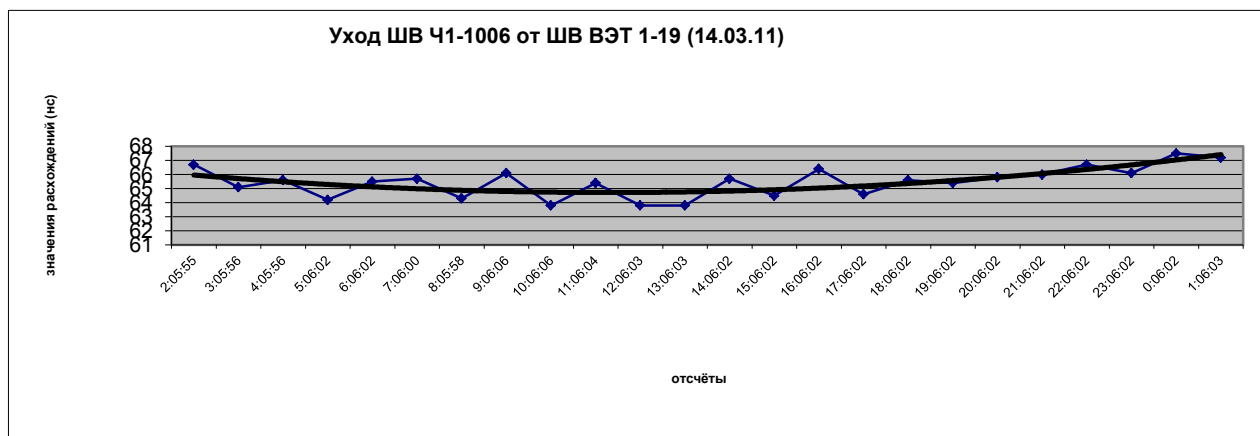


Рис. 1. Расхождение шкал времени $UTC(Nm) - T(on)$ до экспериментов

В течении экспериментов на площадке СГГА синхронность шкалы $T(on)$ и шкалы $UTC(Nm)$ контролировалась посредством сеансов синхронизации по методике "In common view" [1] (рис. 2).

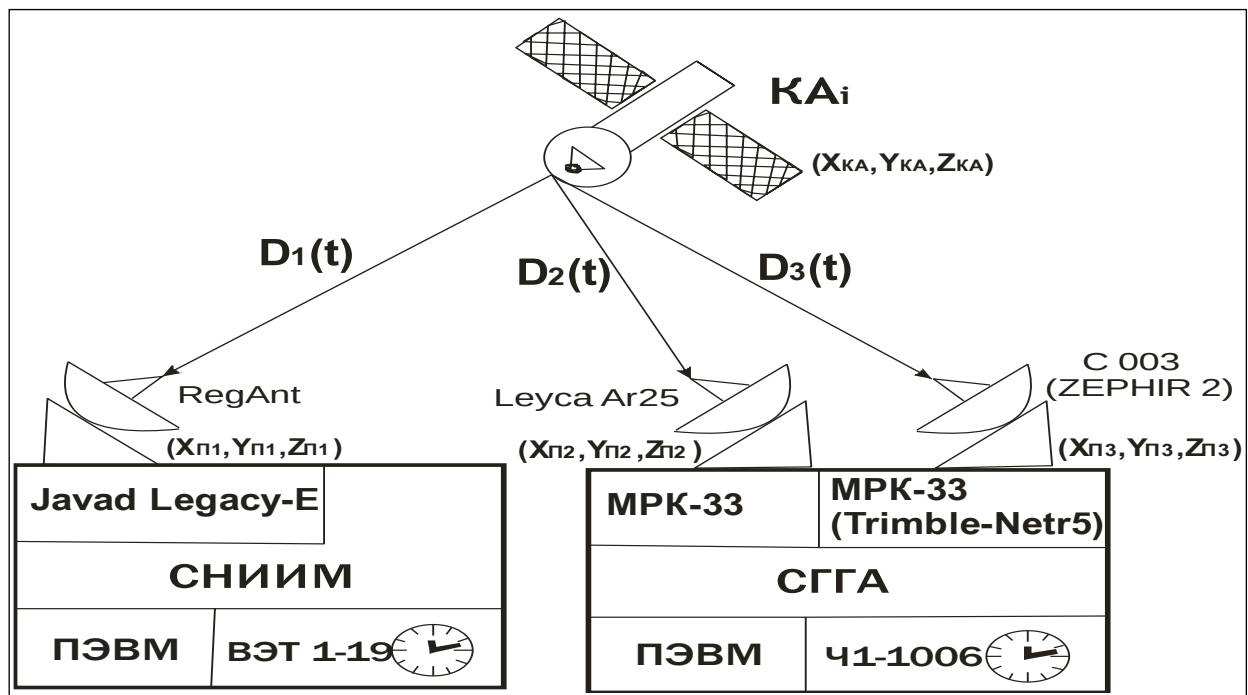


Рис. 2. Схема проведения сеансов синхронизации часов на экспериментальных площадках СГГА и СНИИМ

Информация о расхождении шкал времени $T(on)$ (СГГА) и $UTC(Nm)$ (СНИИМ) выделялась из результатов дальномерных измерений $D(t)$, одновременно выполняемых в СГГА и СНИИМ по одним и тем же спутникам ГЛОНАСС с использованием компенсирующих поправок на геометрические дальности $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_П)$. Уравнение измерений в этом случае принимает вид

$$D(t) - \rho[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_П(t)] = c \cdot \Delta T_П(t) + \sum_{k=1}^7 p_k(t). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{u}_C^T(t) = (x_C(t), y_C(t), z_C(t))$, $\mathbf{u}_П^T(t) = (x_П(t), y_П(t), z_П(t))$ - векторы координат спутников в гринвичской системе координат на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну; $p_k(t), k=1, \dots, 7$ - факторы, влияющие на точность синхронизации, представляют собой соответственно: $p_1(t) = c \cdot \Delta T_C(t)$ - уходы бортовых часов $\Delta T_C(t)$ относительно шкалы времени ЦС, $p_2(t) = \Delta D_{И}(t)$, $p_3(t) = \Delta D_{ТР}(t)$ - задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, выраженные в единицах длины; $p_4(t), p_5(t)$ - погрешности, вызванные смещением фазовых центров передающей антенны от центра масс НС и смещением фазового центра приемной антенны аппаратуры потребителя; $p_6(t)$ - погрешности вычисления вектора текущих координат НС $\mathbf{u}_C$ по эфемеридам, $p_7(t) = v(t)$ - представляют собой погрешности измерений, имеющие случайную природу.

Сравнение результатов измерений (рис. 3) $D_i(t), i=1,2,3$, полученных по коду C1 в СНИИМ и СГГА с учетом поправок на геометрические дальности позволило получить расхождение шкал времени $UTC(Nm) - T(on)$.

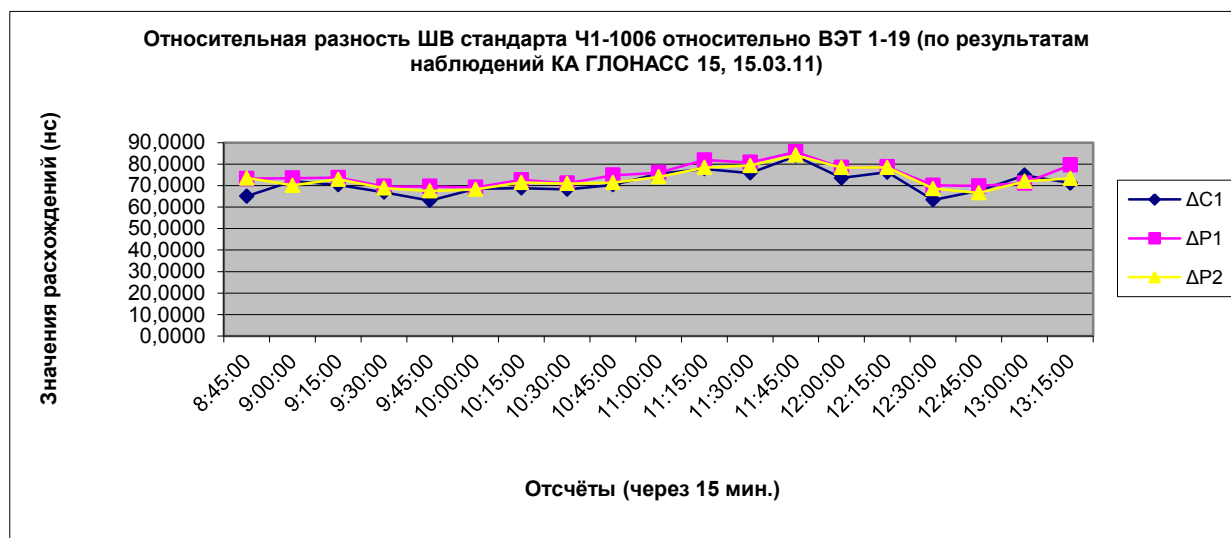


Рис. 3. Сравнение шкалы времени стандарта Ч1-1006 ($T(on)$) относительно шкалы ВЭТ 1-19 ($UTC(Nm)$) 21.03.11 по НС ГЛОНАСС 15

Таблица

Применяемый метод синхронизации часов	Нестабильность частоты синхронизируемых часов (интервал наблюдения 26 суток)	СКО (с)	
		На момент начала эксперимента	На момент окончания эксперимента
ПКЧ	$1,333 \cdot 10^{-14}$	$7,693 \cdot 10^{-15}$	$9,059 \cdot 10^{-15}$
In common view (C-код)	$1,336 \cdot 10^{-14}$	$1,471 \cdot 10^{-14}$	$1,767 \cdot 10^{-14}$

В таблице приведены статистические характеристики полученных результатов синхронизации часов с использованием методов ПКЧ и методики in Common View для приемной аппаратуры Javad Legacy-E – Trimble Net-R5 по НС ГЛОНАСС по С-коду. Сравнительный анализ показывает достаточную близость результатов синхронизации с помощью ПКЧ и с применением спутниковых навигационных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Defraigne, P., and C. Bruyninx, " Time Transfer for TAI using a geodetic receiver, An Example with the Ashtech ZXII-T", GPS Solutions, 5(2), pp. 43-50, 2001.

К ВЫБОРУ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Артем Андреевич Карауш

Новосибирский государственный технический университет, 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант кафедры автоматики, e-mail: karaush.a@mail.ru

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, ФГУП «СНИИМ», 630004, г. Новосибирск, пр-т Димитрова 4, начальник службы времени и частоты, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

В статье проведен сравнительный анализ численных методов. Приведены обоснования для использования метода Эверхарта в качестве наиболее эффективного метода численного интегрирования орбит спутников.

Ключевые слова: численное интегрирование, метод Эверхарта, восстановление орбит ИСЗ.

TO THE CHOICE OF NUMERICAL METHODS OF INTEGRATION OF THE EQUATIONS OF MOVEMENT OF NAVIGATING COMPANIONS

Artem A. Karaush

Novosibirsk State Technical University, 630092, Novosibirsk, K. Marksa, 20, post-graduate student, automation department, e-mail: karaush.a@mail.ru

Aleksandr S. Tolstikov

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, FGUP «SNIIM», 630004, Novosibirsk, Dimitrova 4, head of National time and frequency service, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Comparative analysis of digital computational methods is presented in the article. It is shown, that Evehart method is the most effective method of digital integration of satellite orbits.

Key words: digital integration, Everhart method, recovering satellite orbits.

Центральной задачей эфемеридно-временного обеспечения спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO) является прогнозирование движения навигационных спутников (НС). Точность такого прогнозирования зависит от степени адекватности математических моделей, применяемых для описания движения НС, от правильности выбора стартовой точки прогноза и, в значительной степени, от характеристик выбранного численного метода интегрирования уравнений движения НС [1].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ численных методов, применяемых для интегрирования уравнений движения НС по

околокруговым орбитам, и обоснованный выбор на этой основе наиболее эффективных численных схем.

Для указанного сравнительного анализа численных методов выбраны математические модели движения в классе дифференциальных уравнений

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = -\frac{\mu}{\rho^3(t)} \cdot \mathbf{u}(t) + \sum_{i=1}^5 \mathbf{s}_i(t), \quad \mathbf{u}(t_0) = \mathbf{u}_0, \dot{\mathbf{u}}(t_0) = \dot{\mathbf{u}}_0, \quad (1)$$

$\mathbf{u}^T(t) = [x(t), y(t), z(t)]$ - вектор текущих координат НС в

квазиинерциальной системе координат (ИСК), $\rho(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$ - текущий радиус орбиты НС, μ - геоцентрическая постоянная гравитационного поля Земли, $\mathbf{s}_i(t)$ - вектор действующих на НС возмущений: $i=1$ - от несферичности гравитационного поля Земли, $i=2,3$ - от гравитационного воздействия на НС Луны и Солнца, $i=4$ - от радиационного давления на НС солнечного излучения, $i=5$ - немоделируемые возмущения случайной природы для которых в лучшем случае могут быть получены статистические характеристики.

Возмущения $\mathbf{s}_i(t), i=1, \dots, 4$ образуют группу моделируемых возмущений, которые с той или иной точностью могут быть представлены математическими моделями и учтены при расчете орбитального движения НС.

Возмущения $\mathbf{s}_i(t)$ приводятся к центру масс НС в объектоцентрической системе координат и преобразуются в ИСК с помощью известных матричных преобразований [2].

Наряду с общими требованиями точности к численным схемам интегрирования предъявляются дополнительные требования, порожденные особенностями уравнения движения НС вида (1).

1. Решение уравнения (1), не содержащего демпфирующих членов, находится на границе устойчивости. Выбранная численная схема не должна нарушать это условие и не накапливать погрешностей, при интегрировании на больших интервалах времени.

2. Численная схема не должна терять точность интегрирования при скачкообразных возмущениях в правой части уравнения (1). Такое изменение возмущения $\mathbf{s}_4(t)$ возможно при вхождении НС в тень Земли, когда скачком снимается радиационное давление на НС солнечного излучения.

Анализ точности численных схем принято строить на основе сравнения аналитического решения уравнения движения и решений этого уравнения, полученных с помощью сравниваемых численных схем. Однако для общего случая, при условии действия на НС всех возмущений $\mathbf{s}_i(t)$, уравнение (1) в квадратурах не интегрируется [2, 3]. По этой причине для сравнительного анализа используется упрощенное уравнение

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 \cdot z(t) + s_1(t) + s_4(t), z(t_0) = z_0, \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0, \omega^2 = \frac{\mu}{\rho^3(t)} \quad (2)$$

решением которого является проекция на ось Z ИСК движения НС в плоскости (ХОZ), для которого $s_1(t)$ имитирует возмущение от второй зональной гармоники амплитудой a , $s_4(t)$ - возмущение от радиационного давления на НС солнечного излучения в виде прямоугольного импульса $\theta(t - T_1)$ амплитудой b с моментом появления T_1 и моментом снятия T_2 .

Метод	δ конечное	δ среднее арифм	δ max	time	feval
Рунге-Кутты	1,2000E-02	6,7600E-02	7,5570E-01	0,049	4000
Адамса-Штёрмера	2,6659E-06	-4,2711E-08	2,6934E-06	0,053	6006
Эверхарта	2,7940E-09	1,1191E-09	3,1665E-08	0,506	22051
Адамса-Мультон-Коуэлла	4,4694E-06	8,8574E-07	8,3372E-06	0,204	1991

Аналитическое решение уравнения (2) представляется выражением [4].

Таблица 1. Шаг = 100 с

$$\begin{aligned}
 z(t) = & \frac{a \cdot \sin^2(\omega t)}{2\omega^2} + \frac{a \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(3\omega t)}{6\omega^2} - \frac{a \cdot \cos^2(\omega t)}{2\omega^2} + \frac{a \cdot \cos(3\omega t) \cdot \cos(\omega t)}{6\omega^2} \\
 & + \frac{b \cdot \theta(t - T_1)}{\omega^2} - \frac{b \cdot \theta(t - T_1) \cdot \sin(T_1\omega) \cdot \sin(\omega t)}{\omega^2} - \frac{b \cdot \theta(t - T_1) \cdot \cos(T_1\omega) \cdot \cos(\omega t)}{\omega^2} \\
 & - \frac{b \cdot \theta(t - T_2) \cdot \sin^2(\omega t)}{\omega^2} + \frac{b \cdot \theta(t - T_2) \cdot \sin(T_2\omega) \cdot \sin(\omega t)}{\omega^2} - \frac{b \cdot \theta(t - T_2) \cdot \cos^2(\omega t)}{\omega^2} \\
 & + \frac{b \cdot \theta(t - T_2) \cdot \cos(T_2\omega) \cdot \cos(\omega t)}{\omega^2} + c_2 \cdot \sin(\omega t) + c_1 \cdot \cos(\omega t).
 \end{aligned}$$

Параметры c_1 и c_2 определяются из начальных условий $z(t_0) = z_0, \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0$.

Сравнение численного интегрирования уравнения (2) с его аналитическим решением на интервале времени 10^5 с. проводилось для схем:

- Рунге-Кутты 4-го порядка [4,5],
- Адамса-Штёрмера 5-го порядка [4],
- Эверхарта 15-го порядка [6],
- Адамса-Мультон-Коуэлла 16-го порядка [5,7].

Численные схемы 2, 3, 4 не требуют сведения уравнения (2) к системе уравнений 1-го порядка. Схемы 1, 3 одношаговые. Для схем 2, 4 разгонная сетка решений получена на основе аналитического решения уравнения (2).

При моделировании выбирались: радиус орбиты $\rho = 2.5 \cdot 10^7$ м., $\mu = 398600 \cdot 10^9$ м³/с², $a = \mu \cdot 10^{-6}$, $b = \mu \cdot 10^{-7}$. Начальные условия $z(t_0) = z_0, \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0$ выбирались так, чтобы движение НС начиналось от экватора.

Таблица 2. Шаг = 1000 с

Метод	δ конечное	δ среднее арифм	δ max	time	feval
Рунге-Кутты	1,8273E+03	1,3073E+01	1,8273E+03	0,005	400
Адамса-Штёрмера	1,8959E+00	-1,4830E-01	2,5660E+00	0,005	606
Эверхарта	2,6077E-08	-5,1868E-10	4,8429E-08	0,050	2251
Адамса-Мультона-Коуэлла	6,2514E+02	7,1383E+01	7,1766E+02	0,043	191

Таблица 3. Со ступенчатым воздействием. Шаг = 100 с

Метод	δ конечное	δ среднее арифм	δ max	time	feval
Рунге-Кутты	3,1900E-02	7,0400E-02	8,0340E-01	0,054	4000
Адамса-Штёрмера	1,0100E-02	1,1000E-03	2,0500E-02	0,052	6006
Эверхарта	1,3970E-08	-7,2660E-10	5,2154E-08	0,492	22051
Адамса-Мультона-Коуэлла	8,4000E-03	1,2000E-03	2,0500E-02	0,276	1991

Результаты сравнительного анализа численных схем приведены в таблицах 1, 2, 3. Для каждого из сравниваемых методов оценивалась погрешность интегрирования в метрах в виде:

- Абсолютного значения погрешности на конец интегрирования δ - конечное,
- Среднего арифметического на интервале интегрирования δ -среднее арифм.,
- Максимального значения на интервале интегрирования δ -max.

Основные результаты и выводы

1. Схема Рунге-Кутты показала свою работоспособность при малом шаге интегрирования 100 с. и неприемлемую точность при шаге 1 000 с. Как правило одношаговые схемы применяются в сочетании с многошаговыми схемами для заполнения с малым шагом разгонной сетки решений для запуска многошаговых схем.

2. Многошаговые методы Адамса-Штёрмера и Адамса-Мультона-Коуэлла обеспечивают приемлемую точность интегрирования при шаге 100 с. и шаге 1 000 с. и требуют знания решения в узлах разгонной сетки. Количество узлов зависит от порядка применяемой схемы.

Это создает определенные неудобства, связанные с необходимостью сгущения сетки решений из за риска потери точности интегрирования на участках вхождения НС в теневые зоны Земли, где возникают скачкообразные изменения радиационного давления солнечного излучения на НС.

3. Наилучшие по точности результаты показала одношаговая схема Эверхарта в условиях интегрирования с шагом 100 с. и с шагом 1000 с. гладкой функции и при скачкообразных возмущениях в правой части уравнения (2).

Дополнительный положительный эффект применения схемы Эверхарта заключается в том, что погрешность интегрирования оказывается знакопеременной функцией времени и обеспечивает тенденцию не накапливаться на интервале интегрирования. Об этом свидетельствует малость среднего арифметического погрешности δ по сравнению с выборочными значениями этой погрешности.

Определенным неудобством применения схемы Эверхарта, по сравнению с рассмотренными схемами, является большое число обращений к вычислению правой части уравнения (2), характеризующееся числом feval в таблицах 1, 2, 3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сурнин Ю.В., Кужелев С.В. Модели движения ИСЗ и точность численного прогнозирования орбит // Геодезия и картография. – 1982. – № 10. – С. 8-13.
2. Абалакин В.К., Аксенов Е.П., Гребенников Е.А., Демин В.Г., Рябов Ю.А. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. – М., 1976.
3. Чеботарев, Г. А. (1965). Аналитические и численные методы небесной механики. – М., 1965
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М., 1961.
5. Бордовицына, Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики. – Томск, 1984.
6. Everhart, E. Dept. of Physics and Astronomy, University of Denver, Colo., U.S.A. Celestial Mechanics, 1974, 10, p. 35-55.
7. Бордовицына, Т. В., Авдюшев, В. А. (2007). Теория движения искусственных спутников Земли. – Томск, 2007.

© А.А. Карауш, А.С. Толстиков, 2012

ОЦЕНИВАНИЕ УХОДА БОРТОВЫХ ЧАСОВ ПО ДАННЫМ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, ул. Димитрова, 4, начальник отдела № 8, доктор технических наук, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Екатерина Андреевна Ханыкова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, e-mail: hanikovak@mail.ru

Надежда Вячеславовна Закорючкина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, e-mail: znv560@ngs.ru

В статье рассмотрена проблема оценивания ухода бортовых часов навигационных спутников ГЛОНАСС по результатам траекторных измерений, выполняемых в сети беззапросных измерительных станций.

Ключевые слова: бортовые часы, траекторные измерения, влияющие факторы, навигационные спутники.

EVALUATION DEPARTURE ON-BOARD CLOCK FOR TRAJECTORY MEASUREMENTS

Alexander S. Tolsticov

The Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Street Plahotnogo, 10, the senior lecturer of chair of metrology, standardization and certification, Siberian Research Institute of Metrology, 4 Dimitrova, Novosibirsk, 630004, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Ekaterina A. Hanikova

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, student, department of metrology, standardization and certification, e-mail: hanikovak@mail.ru

Nadia V. Zakoruchkina

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, student, department of metrology, standardization and certification, e-mail: znv560@ngs.ru

The article describes the problem evaluation departure on-board clock navigation satellites GLONASS for trajectory measurements.

Key words: on-board clock, trajectory measurements, influencing factors, navigation satellites.

Точность и надежность координатно-временных определений, выполняемых на основе ГЛОНАСС/технологий, определяется достоверностью

навигационной информации, транслируемой с бортов навигационных спутников. Одной из важных задач мониторинга состояния спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС, решаемых в рамках выполнения Федеральной целевой программы "ГЛОНАСС", является контроль правильности частотно-временных поправок (ЧВП), определяющих положения шкал времени бортовых часов каждого спутника относительно системной шкалы времени.

Бортовые часы, основной элемент бортового синхронизирующего устройства спутника, строятся на основе высокостабильных цезиевых стандартов частоты. В силу большого числа причин шкала времени этих часов имеют тенденцию к уходу относительно системной шкалы времени. Эти уходы должны компенсироваться частотно-временными поправками (ЧВП), транслируемыми в составе эфемеридно-временной информации потребителю.

Ранее, до 2009 года, уходы бортовых часов оценивались по результатам одновременных запросных и беззапросных траекторных измерений. К настоящему времени, в связи с происходящей модернизацией ГЛОНАСС, всё эфемеридно-временное обеспечение системы переводится на беззапросные технологии траекторных измерений, результаты которых становятся основным источником информации о состоянии навигационной системы.

Эти технологии являются более информативными и производительными, по сравнению с запросными. Однако имеются сложности их применения, связанные с большим числом факторов, влияющих на точность результатов измерений. Действительно, измеренная псевдодальность $D(t)$, это интервал времени необходимый для прохождения навигационного сигнала от спутника до приемной аппаратуры и выраженный в единицах длины, связана с геометрической дальностью $\rho[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_П(t)]$ уравнением измерений

$$D(t) = \rho[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_П(t)] + c \cdot \Delta T_C(t) + c \cdot \Delta T_П(t) + \sum_{i=1}^{10} p_i(t). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{u}_C^T(t) = (x_C(t), y_C(t), z_C(t))$, $\mathbf{u}_П^T(t) = (x_П(t), y_П(t), z_П(t))$ - векторы координат спутников в гринвичской системе координат на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну,

$\Delta T_C(t)$ - уход бортовых часов и $\Delta T_П(t)$ уход часов приемной аппаратуры относительно шкалы центрального синхронизатора системы;

c – скорость распространения радиосигнала в вакууме;

$p_i(t)$ - факторы, влияющие на точность траекторных измерений;

$p_1(t)$ и $p_2(t)$ - задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях выраженные в единицах длины;

$p_3(t)$ и $p_4(t)$ - смещение фазового центра передающей антенны относительно центра масс навигационного спутника и смещение фазового центра приемной антенны относительно ее геометрического центра;

$p_5(t)$ - погрешности от релятивистских эффектов;

$p_6(t) = N \cdot \lambda$ - фактор, связанный с неоднозначностью фазовых измерений;

λ - длина волны несущей навигационного сигнала;

$p_7(t)$ - погрешности задания эфемерид навигационного спутника;

$p_8(t)$ - погрешности приведения измеренных дальностей к моменту прихода навигационного сигнала на приемную антенну;

$p_9(t)$ - погрешности от многолучевости распространения навигационного сигнала и от разрывов в данных кодовых измерений;

$p_{10}(t)$ - погрешности случайной природы, включающие шумы измерений, неучтенные задержки в измерительных каналах и некомпенсированные межлитерные задержки.

Проблемы в оценивании уходов бортовых часов $\Delta T_C(t)$ на основе уравнения (1) заключаются в сложности разделения этих уходов от $\Delta T_{\Pi}(t)$ - уходов часов приемной аппаратуры.

Такое разделение возможно за счет создания специальных условий проведения измерений $D(t)$, при которых $\Delta T_{\Pi}(t)$ априорно известно. Выполнение этих условий обеспечивается при траекторных измерениях, использующих в качестве опорной шкалы - шкалу времени UTC(Nm) вторичного эталона единиц времени, частоты и шкалы времени ВЭТ 1-19 пункта метрологического контроля ГСВЧ ФГУП «СНИИМ». Эта шкала согласована со шкалой Госэталона UTC(SU) и системной шкалой ГЛОНАСС(TIME) с высокой точностью.

Задача оценивания $\Delta T_C(t)$ при условии малости $\Delta T_{\Pi}(t)$ сводится к расчету компенсирующих поправок $\hat{\rho}[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_{\Pi}(t)]$ и применению этих поправок к уравнению измерений (1). Для расчета поправок $\hat{\rho}[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_{\Pi}(t)]$ может использоваться методика, описанная в [1], предполагающая расчет текущих навигационных параметров и геометрической дальности по бортовым эфемеридам спутников.

Поскольку бортовые эфемериды приводятся на момент излучения навигационного сигнала с передающей антенны спутника, возникает необходимость пересчета положений спутника и самой геометрической дальности $\hat{\rho}[\mathbf{u}_C(t), \mathbf{u}_{\Pi}(t)]$ к моменту прихода навигационного сигнала на антенну приемной аппаратуры.

Для повышения точности оценивания $\Delta T_C(t)$ на основе уравнения (1) должны быть учтены задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, привлечены алгоритмы предварительной обработки результатов измерений с целью уменьшения уровня шумов измерений и исключения проявлений многолучевости прихода навигационного сигнала, использование результатов предварительной калибровки приемной аппаратуры по межлитерным и междиапазонным задержкам.

Дополнительное повышение точности оценивания $\Delta T_C(t)$ может быть достигнуто за счет использования точных эфемерид, доступных через 10-12 суток после проведения измерений.

В работе показана возможность решения задачи оценивания уходов бортовых шкал времени навигационных спутников ГЛОНАСС $\Delta T_C(t)$ и задачи контроля правильности транслируемых частотно-временных поправок на базе программно-аппаратного комплекса пункта метрологического контроля ГСВЧ ФГУП «СНИИМ».

Необходимым условием для решения указанных задач является применение в качестве опорной шкалы времени $UTC(Nm)$ эталона ВЭТ 1-19, согласованной с высокой точностью с системной шкалой $ГЛОНАСС(TIME)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Defraigne, P., Bruyninx C. Time Transfer for TAI using a geodetic receiver, An Example with the Ashtech ZXII-T // GPS Solutions. – 2001. – № 5(2). – pp. 43-50.

© А.С. Толстиков, Е.А. Ханькова, Н.В. Закорючкина, 2012

ЭТАЛОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ УГЛОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ

Александр Викторович Куликов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий метрологической лаборатории, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Сергей Алексеевич Загарских

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, зам. начальника отдела, тел.(383) 210-14-13, E-mail: lui@sniim.nsk.ru

Виктор Тимофеевич Новоевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий лабораториями кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Александр Николаевич Носов

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, старший научный сотрудник, тел.(383) 210-14-13, E-mail: lui@sniim.nsk.ru

Данная эталонная установка относится к области метрологии в геодезической отрасли и решает задачу определения погрешностей измерений как вертикальных, так и горизонтальных углов всех типов геодезических угломерных приборов.

Ключевые слова: поверочная схема, эталонная установка, погрешность, многогранная призма, автоколлиматор.

STANDART INSTALATION FOR DETERMINING THE HORIZONTAL AND VERTICAL ANGLES MEASUREMENT ERRORS WITH SURVEYING GONIOMETERS

Alexander V. Kulikov

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of metrological laboratory, tel. (383) 344 - 44 71, e-mail: metrol@ssga.ru

Sergey A. Zagarskikh

Siberian research institute of metrology, 4, Dimitrova, st, Novosibirsk, 630004, Assistant chief of department, tel. (383) 210-14-13, e-mail: lui@sniim.nsk.ru

Victor T. Novoevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of laboratorys, department of nanosystems and optoengineering, tel. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru, assistant professor, tel. (383) 3 44-44-71, e-mail: l.g.kulikova @ ssga.ru

Alexander N. Nosov

Siberian research institute of metrology, 4, Dimitrova, st, Novosibirsk, 630004, Senior researcher associate, tel. (383) 210-14-13, e-mail: lui@sniim.nsk.ru

This standart installation concerns metrological field and is used in geodesy sphere for determining measurement errors of both horizontal and vertical angles with practically all types of surveying goniometres.

Key words: calibration scheme, standard instalation, error, polyhedral prism, autocolimator.

За последние два десятилетия геодезические инструменты стали в основном электронно-цифровыми, и, как следствие, меньших размеров и более эффективными. Однако их прекрасные точностные характеристики иногда могут обернуться неприятностями для конечного пользователя. Изготовитель калибрует оборудование и сохраняет специальные параметры в инструменте, чтобы соответствующим образом исправлять измеренные величины. В общем, пользователь ничего не знает о допустимых несовершенствах механики и связанных с ними внутренних поправках. Как следствие этого развития растет потребность в высокоточных и производительных эталонах для поверки этого геодезического оборудования, обеспечивающих привязку к поверочной схеме.

Авторами разработана установка для метрологической поверки и калибровки геодезических угломерных приборов, таких как тахеометров, теодолитов, астрономических универсалов и др. На данную Установку подана заявка на изобретение как на устройство.

В разработанной эталонной установке поставленная задача достигается тем, что установка для определения погрешности измерений горизонтальных и вертикальных углов геодезических угломерных приборов, содержит средство измерений, выполненное в виде автоколлиматора (эталон единицы плоского угла 1-го разряда) (АК) с диагональным зеркалом и многогранной призмой (эталон единицы плоского угла 1-го разряда), жестко закрепленной на оси вращения узла наклона. Причем узел наклона имеет возможность поворота в вертикальной плоскости на $\pm 135^\circ$. На малом основании помещён поворотный стол, снабженный двумя площадками, на верхней площадке которого устанавливается поверяемый ГУП, а на нижней - вторая многогранная призма (эталон единицы плоского угла 1-го разряда). Она оптически связана со вторым АК (эталон единицы плоского угла 1-го разряда).

Общий вид эталонной установки для определения погрешности измерений вертикальных и горизонтальных углов геодезических угломерных приборов приведён на рисунках 1 и 2: 1 – малое основание; 2 – массивное основание; 3 – поворотный стол; 4 – нижняя площадка поворотного стола 3, 6 – верхняя площадка поворотного стола 3, 5 – многогранная призма; 7 – коллиматор; 8 – стойка; 9 – узел наклона; 10 – зажимной винт; 11 – ось узла наклона; 12 – микровинт; 13 – подставка; 14 – АК; 15 – второй АК; 16 – диагональное зеркало; 17 – вторая многогранная призма; 18 – гайка; 19 – подставка.

Определение погрешности измерений горизонтальных углов ГУП (рис. 1) выполняют следующим образом.

Коллиматор 7 выставляют на бесконечность. Поверяемый ГУП устанавливают на верхней площадке 6 поворотного стола 3 и закрепляют с помощью винта, изменяя высоту площадки 6 с помощью подставок (не показаны), добиваются совпадения горизонтальной оси ГУП с осью 11 узла наклона 9.

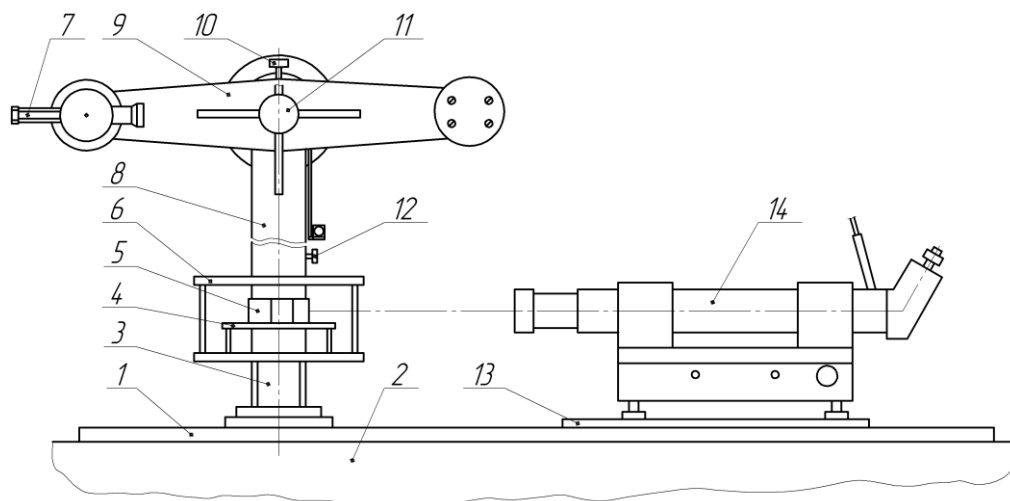


Рис. 1. Установка для определения погрешности измерений горизонтальных углов геодезических приборов

С помощью собственных уровней ГУП его вертикальную ось приводят в рабочее положение «Круг Л» и трубу ГУП устанавливают в положение «Круг Л».

Устанавливают первую грань призмы 5 против АК 14 и винтом точной наводки (не показан) поворотного стола 3 совмещают автоколлимационное изображение от первой грани призмы 5 с любым штрихом шкалы АК 14.

Трубу ГУП устанавливают в горизонтальное положение.

Коллиматор 7 с узлом наклона 9 устанавливают в горизонтальное положение. Совмещают поворотом зрительной трубы ГУП центр «креста» коллиматора 7 с центром сетки нитей ГУП. Устанавливают лимб ГУП на отметку «0°». Снимают отсчёт по шкале АК 14. Далее поворачивают ГУП на угловой шаг призмы 5, например 30° - для 12-гранной призмы, причём, первоначальные показания компенсатора ГУП остаются неизменными до окончания полного приёма измерений (для двух оборотов). Поворотом ГУП совмещают центр «креста» коллиматора 7 с центром перекрестия ГУП и аналогично вышеизложенным операциям снимают отсчёты по АК 14.

Указанную операцию проводят для всех углов второй призмы 5.

Отсчёты, полученные от каждой грани второй призмы 5, приводят к отсчёту от первой грани. Полученные результаты сравнивают с действительными значениями на вторую призму 5 и по полученным расхождениям результатов судят о погрешности измерений любого угла в горизонтальной плоскости ГУП (круг Л).

Для измерений при «Круге П» переводят через зенит зрительную трубу ГУП. При этом отсчёт по горизонтальному кругу ГУП должен быть около 180°. Проводят все описанные выше операции и определяют погрешность ГУП (круг П). Для определения погрешности ГУП при измерениях горизонтальных углов усредняют соответствующие значения, полученные при круге Л и круге П.

Определение погрешности измерений вертикальных углов ГУП (рисунок 2) выполняют следующим образом.

При «Круге Л» измерения проводят следующим образом. Поверяемый ГУП (не показан) устанавливают на верхней площадке 6. Перемещением узла наклона 9 вводят автоколлимационное изображение от первой грани призмы 17 в поле зрения АК 15 и зажимают винт 10. Наклоном зрительной трубы ГУП вводят центр «креста» коллиматора 7 примерно в центр поля зрения ГУП.

Предварительно устанавливают секундную шкалу АК 15 в среднее положение. Микровинтом 12 устанавливают на АК 15 отсчёт по минутной шкале.

Микровинтом ГУП совмещают центр «креста» коллиматора 7 с центром сетки нитей ГУП.

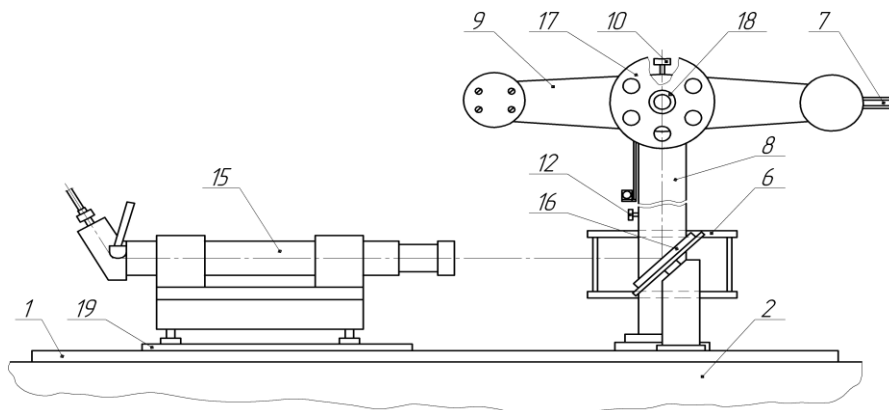


Рис. 2. Установка для определения погрешности измерений вертикальных углов геодезических приборов

Фиксируют показание по отсчётному устройству ГУП и снимают отсчёт по АК 15. Значение принимают за первый отсчёт. Последовательно наклоняют трубу ГУП на угловой шаг призмы 17 поочередно: $+15^\circ$; $+30^\circ$; $+45^\circ$; -15° ; -30° ; -45° (для 24-гранной призмы) и снимают отсчёты по АК 15.

Отсчёты, полученные от каждой грани призмы 17, приводят к отсчёту от первой грани. Полученные результаты сравнивают с действительными значениями призмы 17 и по полученным расхождениям результатов судят о погрешности измерений любого угла в вертикальной плоскости ГУП (круг Л).

При «Круге П» проводят операции аналогично «Кругу Л».

Для определения погрешности ГУП при измерениях вертикальных углов усредняют соответствующие значения, полученные при круге Л и круге П.

Определение суммарной погрешности ГУП

$$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{\Delta_m^2 + \Delta_{\text{ак}}^2 + \Delta_{\text{виз}}^2} \quad (1)$$

где $\Delta_m, \Delta_{\text{ак}}$ – погрешности аттестации многогранных призм и АК на государственном вторичном эталоне единицы плоского угла (ВЭТ);

$$S_{\text{ВЭТ}} = S_m = S_{\text{ак}};$$

$\Delta_{\text{виз}}$ – погрешность наведения АК

$$\Delta_m = \Delta_{\text{ак}} = t * S \quad (2)$$

где $t * S$ – предел допускаемой погрешности ВЭТ.

t – коэффициент Стьюдента при доверительно вероятности $P = 0,99$.

Суммарная погрешность $\Delta_{\text{сумм}}$ не должна превышать:

- Для 1 р-да 0,3";
- Для 2 р-да 1".

© *А.В. Куликов, С.А. Загарских, В.Т. Новоевский, А.Н. Носов, 2012*

УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ «ЦИФРОВОЙ НИВЕЛИР – КОДОВАЯ РЕЙКА»

Александр Викторович Куликов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий метрологической лабораторией, тел. (383) 344-4-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Виктор Тимофеевич Новоевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий лабораториями кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Александр Алексеевич Ильин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий лабораторией кафедры высшей геодезии, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Александр Николаевич Носов

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, старший научный сотрудник, тел. (383) 210-14-13, e-mail: lui@sniim.nsk.ru

Константин Витальевич Тукмачёв

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, младший научный сотрудник, тел. (383) 210-14-13, e-mail: lui@sniim.nsk.ru

Разработанные установки обеспечивают проведение работ по поверке и калибровке измерительной системы «Цифровой нивелир – кодовая рейка» на современном уровне требований.

Ключевые слова: средняя квадратическая погрешность, поверка.

CALIBRATORS FOR SYSTEMATIC ERROR DETERMINATION OF THE MEASURING SYSTEM «DIGITAL LEVEL – CODE ROD»

Alexander V. Kulikov

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of metrological laboratory, tel. (383) 344 - 44 71, e-mail: metrol@ssga.ru

Victor T. Novoevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of laboratorys, department of nanosystems and optoengineering, tel. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Aleksandr A. Ilyin

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of laboratory, department of higher geodesy, tel. (383) 344 - 44 - 71, e-mail: metrol@ssga.ru

Alexander N. Nosov

Siberian research institute of metrology, 4, Dimitrova, st, Novosibirsk, 630004, Senior researcher associate, tel. (383) 210-14-13, e-mail: lui@sniim.nsk.ru

Konstantin V. Tukmachev

Siberian research institute of metrology, 4, Dimitrova, st, Novosibirsk, 630004, Junior researcher, tel. (383) 210-14-13, E-mail: lui@sniim.nsk.ru

Developed installation and ensure conduct of work on the verification and calibration of the measuring system «Digital level - graduated code rod» on the current level of requirements.

Key words: mean-square value, calibration, standard.

В настоящее время накоплен большой отечественный опыт по использованию измерительной системы «Цифровой нивелир - кодовая рейка», результаты анализа которого должны быть использованы и отражены в нормативных документах с целью повышения достоверности и точности результатов исследований.

Погрешность измерительной системы «Цифровой нивелир - кодовая рейка», далее Система определяется двумя способами:

- С помощью Установки поверки системы (УПС) сравнением показаний Системы с показаниями микрометрического винта или длиной КМД;
- С помощью горизонтального лазерного интерферометра путем сравнения разностей отсчетов, взятых по рейке цифровым нивелиром, с эталонными разностями, полученными по интерферометру.

УПС, разработанная ПО «Инжгеодезия», представлена на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид УПС с нивелирной рейкой (нивелир и КМД не показаны)

На основании 1 установлены четыре стойки 2 с крышкой 3, на двух стойках установлен подвижный узел 5 с салазками 4. На подвижном узле закреплен микровинт 6 для перемещения салазок 4. На салазках закреплен рейкодержатель 7 с винтами 9 для фиксации рейки 8. На основании 1 установлены уровни 11, а лампа 12 для подсветки рейки – на одной из стоек, КМД устанавливаются на основании 1 в упор салазкам 4. На рейкодержателе 7 с винтами 9 закрепляют рейку 8. Против рейки устанавливают нивелир (не показан), приводят его в рабочее состояние.

В поле зрения нивелира наблюдают изображение штрихов рейки. Снимают отсчёт по отсчётному устройству нивелира и одновременно по шкале микрометрической головки 6 перемещают рейку 8 через каждые 5 мм. По разности показаний нивелира и микровинта судят о погрешности системы Δ_c . Сравнивают значение этого перемещения с показаниями нивелира - несовпадение есть погрешность Системы.

Горизонтальный интерференционный компаратор для определения погрешности измерительной системы «цифровой нивелир- кодовая рейка» разработанный в СГГА представлен на рисунке 2.

Погрешность измерительной системы зависит от величины масштаба в нивелире (например, в связи с эффектом старения ПЗС-матрицы) и от состояния штрих-кодов, которое может изменяться, если повреждается поверхность реек (например, поцарапанные кодовые элементы). Поэтому определение погрешности измерений системы необходимо выполнять как совместную калибровку нивелира и комплекта реек. Идея такой методики состоит в сравнении разности отсчётов, взятых цифровым нивелиром по двум кодовым рейкам, с эталонной разностью отсчётов, полученных по интерферометру. Нивелир 3 устанавливается на подставке 4 и приводится в рабочее положение. Кодовые рейки 5 и 6 укладываются на ложементе 9 каретки 7 и жёстко соединяются через концевую меру длины (КМД) 8 пятками навстречу друг другу. Передвигая каретку 7, моделируют минимально возможный для взятия нивелиром при помощи зеркала 9 отсчёт по одной из реек.

После приведения системы в рабочее положение обнуляется показание интерферометра и выполняется серия отсчётов нивелиром по одной из реек. Перемещая каретку, производится аналогичная установка высоты для второй рейки. Берутся отсчёты по интерферометру, серия отсчётов по нивелиру и второй рейке, используя функцию программного обеспечения нивелира “перевёрнутая рейка”. Таким образом, перемещая каретку с заданным шагом, фиксируемым лазерным интерферометром, исследуется комплект реек по всей длине штрих-кодовых шкал. Затем выполняется обратный ход.

По полученным данным определяется N_i - разность отсчётов нивелира по двум рейкам за вычетом номинального значения КМД и I_i - разности соответствующих показаний интерферометра:

$$N_i = N_{1i} - N_{2i} - КМД,$$

$$I_i = I_{1i} - I_{2i},$$

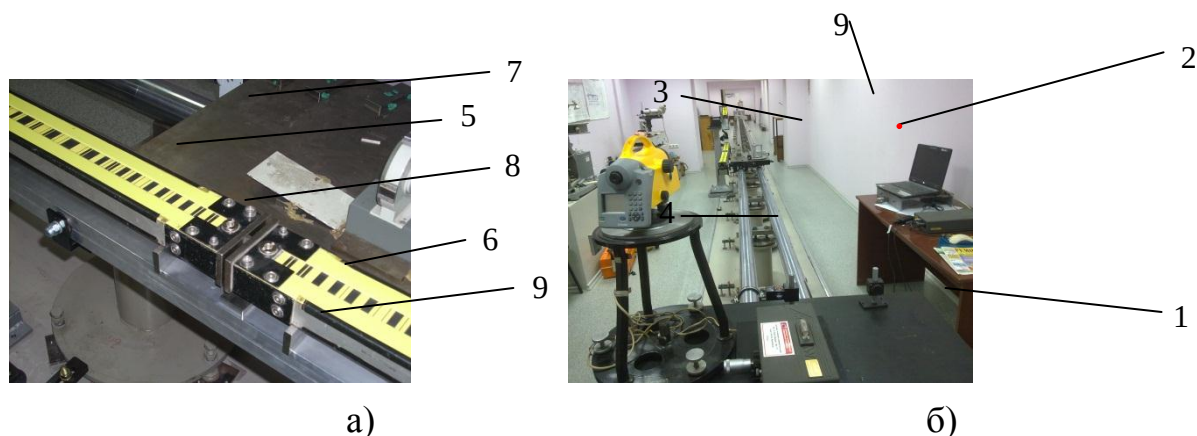
где N_{1i} и N_{2i} – отсчёты нивелира по рейкам; $КМД$ – величина концевой меры длины; I_{1i} - I_{2i} – отсчёты по интерферометру.

По расхождениям этих разностей вычисляется СКП измерительной системы «Цифровой нивелир – кодовая рейка».

$$СКП_{пр, обр} = \sqrt{\Sigma \Delta_i^2 / n},$$

где $\Delta_i = N_i - I_i$; n – число измерений в ходе.

СКП измерительной системы ”нивелир-комплект реек” определяется как среднее из погрешностей $СКП_{пр, обр}$.



а) установка двух штрих-кодовых реек скреплённых КМД (5, 6 – кодовые рейки; 7 – каретка; 8 – КМД; 9 – ложемент)

б) общий вид установки (1 – лазерный интерферометр; 2 – уголкового отражатель с мишенью; 3- цифровой нивелир; 4 – подставка; 9 - зеркало)

Рис. 2. Лазерный интерференционный компаратор СГГА

Результат определения СКП измерительной системы ”нивелир-комплект кодовых реек” приведён на примере нивелира Trimble DiNi 03 и двух кодовых реек LD11 NEDO. По результатам измерений получены: $СКП_{пр} = 0.062567$ мм;

$СКП_{обр} = 0.021572$ мм; $СКП_{изм. сист.} = 0.042069$ мм.

© А.В. Куликов, В.Т. Новоевский, А.А. Ильин,
А.Н. Носов, К.В. Тукмачёв, 2012

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ МЕТРОВЫХ ИНТЕРВАЛОВ У ШТРИХ-КODOVЫХ РЕЕК НА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ КОМПАРАТОРЕ СГГА

Александр Викторович Куликов

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий метрологической лабораторией, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Александр Алексеевич Ильин

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий лабораторией кафедры высшей геодезии вы, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Виктор Тимофеевич Новоевский

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий лабораториями кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Для поверки инварных штрих-кодовых реек был выбран метод калибровки измерительной системы «нивелир - рейка» путем сравнения разностей отсчетов, взятых по рейке цифровым нивелиром, с эталонными разностями, полученными с помощью лазерного интерференционного компаратора СГГА.

Ключевые слова: средняя длина метра, штрих-кодовая рейка.

DETERMINATION OF METRE INTERVALS AVERAGE LENGTH ON GRADUATE CODE RODS WITH A SSGA INTERFERENCE COMPARATOR

Alexander V. Kulikov

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of the metrological laboratory, tel. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Aleksandr A. Ilyin

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of laboratory, department of higher geodesy, tel. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Victor T. Novoyevsky

Siberian State Academy of Geodesy, 10, Plakhotnogo, st, Novosibirsk, 630108, Head of laboratorys, department of nanosystems and optoengineering, tel. (383) 344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

The method of colibration of a measuring system «level-rod» by comparings realings difference taken with a digital level and standart differences received with SSGA laser interference comparator has been chosen for invar graduated – code rods calibration

Key words: metre average length, graduated – code rod.

В настоящее время на рынке есть четыре разных типа цифровых нивелиров (Leica, Sokkia, Topcon и Trimble [ранее Zeiss]). Кодовые рейки и нивелир образуют нивелирную систему. Обычно используются 3-метровые рейки, на инварной полосе которых вытравлены коды. Для всесторонней коррекции отсчетов высоты должна быть известна индивидуальная величина масштаба рейки раньше был термин *средняя длина метра рейки*.

Авторами статьи рассматривается горизонтальный интерференционный компаратор СГГА для определения масштаба реек.

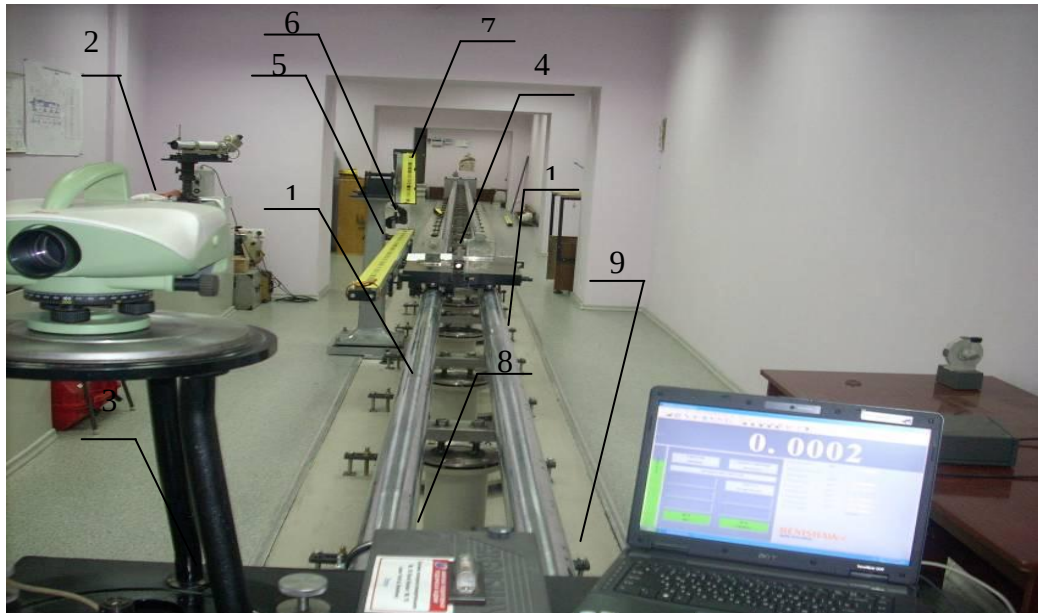
Температура ($\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) и влажность ($\sim 45\text{ }\%$) в лаборатории контролируются с погрешностями $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $5\text{ }\%$ соответственно блоком компенсации измерения параметров окружающей среды. «Сердцем» лаборатории является дорога, выполненная в виде двух труб (основной и вспомогательной), представляющие собой направляющие компаратора длиной 25 м с подвижной кареткой, перемещение которой контролируются уголкового отражателем с мишенью лазерного интерферометра ML 10 GOLD фирмы RENISHAW. Направляющие установлены на 26 регулируемых опорах, жестко закреплённых на специальном виброзащитном фундаменте. Для регулировки рейки в положении, параллельном лазерному лучу интерферометра, используется автоколлимационный контроль направляющих. В метрологической службе СГГА имеется методика контроля и регулировки параметров направляющих компаратора в процессе его эксплуатации. Контроль и регулировка параметров направляющих включает: прямолинейность основной направляющей. Перемещение каретки по направляющим, одна из которых является основной, вторая вспомогательной во всём диапазоне 25 м в прямом и обратном ходе контролируется снятием отсчётов по автоколлиматору. Значения отсчетов не должны превышать $\pm 30''$; возвышения «В» основной направляющей относительно вспомогательной. Смещение пузырька ампулы уровня допускается не более 0,3 деления шкалы; отклонения межцентрового расстояния основной и вспомогательной направляющих. Отклонение межцентрового расстояния косвенно характеризует параллельность вспомогательной направляющей относительно основной. Отклонение показаний в пределах $\pm 0,25\text{ мм}$ свидетельствует об удовлетворительном состоянии направляющих.

Для обеспечения отсчитывания по горизонтально расположенной рейке в системе используется зеркало размером (12x120x600) мм, волновые aberrации которого, возникающие из-за погрешностей изготовления, не превышают двадцатой части длины волны света ($\lambda/20$). Расстояние между зеркалом и рейкой $\sim 0,5\text{ м}$. При таких параметрах в системе не происходит ограничения поля зрения приемного канала нивелира зеркалом и обеспечивается возможность проводить измерения нивелиром по всей длине рейки, т.е. нивелир «видит» рейку в её рабочем вертикальном положении. [1].

Среднюю длину метровых интервалов (масштаб рейки) у инварных штрих – кодовых реек определяют на интерференционном компараторе СГГА (рис. 1).

У штрих – кодовых реек последовательно измеряют всю длину шкалы рейки от пятки до последнего штриха кода (например, из-за окантовки верха

трёхметровой рейки обычно ограничиваются штрихом, соответствующим 2,9 м). Рейка устанавливается в ложементе на каретке и поддерживается в «наилучших точках (на точки Бесселя)», что приводит к минимальному изменению в длине инварной полосы.



1 - направляющие лазерного интерференционного компаратора; 2 - цифровой нивелир Leica DNA – 03; 3 - подставка; 4 - каретка с ложементом и уголковым отражателем с мишенью; 5 - кодовая рейка Leica GPSL 3; 6 - микроскоп; 7 - зеркало; 8 - лазерный интерферометр модели ML 10 GOLD фирмы RENISHAW; 9 – интерфейсный набор DX 10 USB с блоком компенсации измерения параметров окружающей среды EC 10

Рис. 1. Внешний вид горизонтального интерференционного компаратора СГГА

С одной стороны направляющей монтируется оптический микроскоп. Каретка передвигаются с установленной рейкой ниже микроскопа, которым производится наведение на край всех кодовых элементов рейки.

Процедура определения метровых интервалов состоит из двух отдельных ходов «прямо и обратно». Перемещение каретки контролируется интерферометром с погрешностью 10 мкм [2].

Подробности о конструкции интерференционного компаратора СГГА и достижимой точности обсуждались на научном конгрессе [3].

После приведения системы в рабочее положение обнуляется отсчёт интерферометра и выполняется серия из 10 отсчётов по нивелиру в режиме высокоточных измерений (дискретность отсчитывания 0,01 мм). Затем перемещается рейка, фиксируется отсчёт по интерферометру (дискретность отсчитывания 0,001 мм) и повторяется серия отсчётов по нивелиру. Таким образом, для трёх метровой рейки получаем четыре серии отсчётов по нивелиру с регистрацией положения рейки в каждой серии по отсчётам интерферометра. Далее измерения повторяются, рейка перемещается в обратном направлении.

Аналогичные действия проводим со второй рейкой комплекта.

При поверке за истинное (эталонное) значение принимается величина перемещения рейки, определяемая с помощью лазерного интерферометра. Истинное значение сравнивается с величиной, полученной как разность отсчетов по рейке, измеренных цифровым нивелиром.

Среднюю длину метра шкалы рейки (масштаб рейки) вычисляем по формуле [2]:

$$l = \frac{L}{L_0},$$

где L – сумма интервалов, полученных по измерениям системы “нивелир-рейка”; L_0 – номинальное количество интервалов в поверяемой шкале (сумма интервалов, полученных из измерений по интерферометру).

Среднюю длину метра (масштаб) комплекта реек получаем как среднее арифметическое из масштабов обеих реек.

Обработка результатов измерений выполнена на примере цифрового нивелира DNA 03 фирмы Leica (№ 334374) и комплекта двух инварных штрих-кодовых трёх метровых реек GPSL3 Leica (№ 52158 и № 52607).

Средняя длина метра рейки № 52158 составляет 999,97 мм, средняя длина метра рейки № 52607 составляет 999,98 мм. Средняя длина метра комплекта реек равнялась 999,98 мм.

Из полученных результатов можно сделать вывод о пригодности использования указанного оборудования для выполнения определённого класса и разряда нивелирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Травкин С. В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: 2007.
2. Спиридонов А. И. Нивелиры. Конструкция, сервис, ремонт, эксплуатация: Практическое пособие для вузов. – М.: Академический проект; Фонд «Мир», 2010. – 205 с.
3. Л.Г. Куликова, В. Д. Лизунов, В. А. Середович, В. Т. Новоевский, А.В. Куликов. Особенности построения интерференционного компаратора для исследования и поверки геодезических СИ // Научный конгресс «ГЕО-Сибирь-2005». – Т. 6 «Сб. материалов научн. конгр. г. Новосибирск 25-29 апр., 2005 г. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 217-222.

© А.В. Куликов, А.А. Ильин, В.Т. Новоевский, 2012

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОЕВЫХ НОЖЕЙ (НОЖЕЙ ВЫЖИВАНИЯ) РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ВС РФ

Виктор Владимирович Фармагей

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, старший преподаватель кафедры «Вооружение и военная техника», тел. 89134526654, e-mail: shamanov007@mail.ru

В последние десятилетия на вооружение разведывательных подразделений Вооружённых сил России поступили: боевой специальный нож (далее по тексту – СН-01 «Клён»), комплект средств выживания (далее по тексту – КСВ «Эльф»), армейский нож 6Х6.

Ключевые слова: боевой нож, клинок, заглушка.

COMPARATIVE DESCRIPTION OF COMBAT KNIVES (SURVIVAL KNIVES) OF THE RECONNAISSANCE UNITS OF THE RF ARMED FORCES

Viktor V. Farmagey

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, senior teacher, department the «Armament and Military Equipment», tel. 89134526654, e-mail: shamanov007@mail.ru

The article deals with the main characteristics of the combat knives СН-01 «Maple» and 6Х6 and the survival kit КСВ «Elf». Their performance characteristics, design details, purposes are considered. The author focuses on the advantages and disadvantages of the weapons.

Key words: combat knife, sword, blind.

В последние десятилетия на вооружение разведывательных подразделений Вооружённых сил России поступили: боевой специальный нож (далее по тексту – СН-01 «Клён»), комплект средств выживания КРАГ.332559.002 (далее по тексту – КСВ «Эльф»), армейский нож 6Х6.

Боевой специальный нож предназначен для поражения и уничтожения живой силы, служебных животных противника с помощью мускульной силы военнослужащего способом контактного удара и метания различным хватом ножа на дальность 2 - 12 метров.

Нож СН-01 «Клён» состоит из клинка, рукояти, гарды, навершия и комплектуется ножнами.

Исполнение клинка ножа соответствует 1,5-лезвийному «кинжалу» с четырехгранным острием. Клинок ножа имеет твердость 48...54 НRC. Клинок имеет антибликовое покрытие.

Для предотвращения соскальзывания пальцев руки с рукояти на передней части рукояти имеется двухсторонняя гарда, а на задней части – металлическое навершие.

КСВ «Эльф» предназначен для поражения противника в рукопашном бою, а также обеспечения жизнедеятельности военнослужащих в боевых и походных условиях.

КСВ «Эльф» включает нож, ножны, упаковку с набором средств выживания (марганцевокислый калий; спички, терка; игла, нитки; рыболовный крючок, леска, грузила; грифель; лейкопластырь; пленка лавсановая аммонизированная) и три отрезка капронового шнура длиной $(0,5 \pm 0,1)$, $(0,8 \pm 0,15)$ и $(5,0 \pm 0,5)$ м.

Нож КСВ состоит из клинка, рукояти и заглушки. Исполнение клинка соответствует типу «нож» с заточенным скосом обуха с четырехгранным острием. Клинок имеет зубья на обухе, заточен односторонне и служит для прокалывания остриём и резания обеими гранями. На наружную поверхность ножа наносится двухслойное полуматовое покрытие черного цвета или однослойное покрытие тёмно-коричневого цвета. Покрытие препятствует развитию коррозии, исключает блики, снижает трение при прокалывании и резании.

Рукоять имеет водонепроницаемую полость, в которой размещена упаковка с набором средств выживания.

В состав армейского ножа 6Х6 входят основные сборочные единицы и детали: нож в сборе, компас в сборе, пенал с элементами жизнеобеспечения, чехол в сборе, пила, гарпун, шнур-линь.

Нож 6Х6 в сборе состоит из клинка, полый рукояти с гардой и резьбовой крышки рукояти. Исполнение клинка ножа соответствует асимметричному 1,5-лезвийному «кинжалу» с четырёхгранным острием. Клинок ножа имеет твердость 54...57 HRC. Клинок имеет антибликовое покрытие темно-серого цвета. Для предотвращения соскальзывания пальцев руки на клинок ножа передняя часть рукояти выполнена в виде двухсторонней гарды.

Рукоять имеет водонепроницаемую полость, в которой размещена упаковка с набором средств выживания.

Чехол в сборе состоит из пластмассовых ножен (верхних и нижних) и основания для шнура-линя, шарнирно соединенных между собой. Верхние и нижние ножны фиксируются подпружиненным фиксатором и имеют внутренние прямоугольные полости для размещения ножа в верхних ножнах и гарпуна с пилой в нижних ножнах. Нож и гарпун с пилой фиксируются в полости упругими пластмассовыми элементами на внутренней стороне стенок ножен. На верхних ножнах имеются глухое резьбовое отверстие для компаса и брусочки для заточки ножа, а на нижних ножнах – подвеска для поясного ремня с устройством для быстрого отделения чехла от поясного ремня и ремешком для удержания ножа от выпадения. На конце чехла имеются резак для перекусывания проволоки и гнездо для установки пилы.

Шнур-линь выполнен в виде витого шнура и размещен на основании, шарнирно установленном на оси ножен. Верхний конец основания фиксируется скобой подвески и дополнительно закрепляется концом шнура-линя за петлю подвески.

Пила имеет двухстороннюю насечку зубьев: с одной стороны для распиловки древесины, а с другой – для распиловки металла. В задней части пилы выполнены паз и две лунки для фиксации пилы в гнезде чехла. Передняя часть пилы с одной стороны отполировала до зеркального блеска и служит сигнальным зеркалом. Пила имеет хромовое покрытие.

Гарпун представляет собой легкий нож с двухсторонней заточкой на одной стороне и двумя зубьями (жалами) на другой. Гарпун имеет выемку на заднем конце, предназначенную для открывания бутылок. В средней части гарпуна выполнены гаечный ключ переменных размеров (до 6 мм) и отверстия для крепления гарпуна к древку. На заднем конце выполнено лезвие отвертки. Гарпун имеет хромовое покрытие.

По результатам сравнительных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Нож СН-01 (в том числе в комплекте с ножнами) по массе превосходит нож 6Х6 и находится практически на одном уровне с ножом КСВ.

2. Длина ножа СН-01 больше длины армейского ножа 6Х6 на 19 мм, КСВ – на 17 мм.

3. По глубине проникания клинка после прокалывания стального листа толщиной 1 мм и тканевых защитных экранов БЖ 6Б11, 6Б12 и 6Б13 нож СН-01 превосходит штатные ножи 6Х6, КСВ.

4. Нож СН-01 имеет лучшие поражающие свойства при ударах в древесину с поперечным расположением волокон по сравнению с ножами 6Х6, КСВ, но уступает этому показателю ножам 6Х6 и КСВ при ударах в древесину с продольным расположением волокон.

5. По прочности и упругости клинка при изгибе в диапазоне нагрузок от 0 до 100 кГс нож СН-01 находится на уровне ножей 6Х6, КСВ.

6. По степени заточки нож СН-01 уступает штатным ножам 6Х6, КСВ, но находится на одном уровне с ними по удобству и безопасности хвата за рукоять при строгании.

7. По рубящим свойствам нож СН-01 находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

8. По режущим свойствам нож СН-01 находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

9. Нож СН-01 выдерживает нагрузку массой 100 кг при закреплении его на всю длину клинка, может быть использован в качестве опоры для ноги или руки и по этому показателю находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

10. По удобству и возможности использования в качестве молотка для раскалывания полимерного стекла нож СН-01 находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

11. Нож СН-01 обеспечивает рыхление грунта при нормальных климатических условиях и при температуре минус 50⁰С и по этому показателю находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

12. По удобству метания нож СН-01 превосходит ножи 6Х6, КСВ.

13. По стойкости к внешним климатическим факторам и специальным средам нож СН-01 находится на одном уровне с ножом КСВ и по этому показателю превосходит нож 6Х6.

14. По стойкости к внешним механическим факторам (при сбрасывании с высоты 1 м на бетонное основание) нож СН-01 находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

15. Дальность демаскирования пользователя ножом СН-01 при воздействии солнечного излучения при наблюдении невооруженным глазом в 2 раза, а при наблюдении в средства разведки (бинокль) – в 4 раза выше, чем у ножей КСВ и 6Х6.

При наблюдении в ночной прицел при ночной освещённости и подсветке прожектором в ИК области спектра явных демаскирующих признаков у представленных ножей не выявлено, но у ножей 6Х6 и КСВ с тёмным покрытием полотна ножа распознавание как типа оружия более высокое, чем у ножа СН-01.

16. Нож СН-01 обеспечивает размещение на ременной системе ЖТ 6Ш92-5 из КБИЭ «Бармица», извлечение его из ножен (кармана), в том числе при работе одной рукой, надёжно фиксируется в ножнах, не вызывает у военнослужащих неудобства при преодолении типовых препятствий и по этим показателям находится на одном уровне с ножами 6Х6, КСВ.

17. Нож СН-01 наиболее удобен и травмобезопасен при выполнении приёмов рукопашного боя по сравнению с ножами 6Х6, КСВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Начальника ГРАУ МО РФ № 363 от 28 апреля 2008 года, Москва.
2. Фармагей В.В. Обучение и формирование готовности офицеров и курсантов подразделений специального назначения для выполнения специальных задач с использованием холодного оружия: учебно-методическое пособие. – Новосибирск: 2010. с. 100.
3. Жуковский В.В. Боевые ножи. – М.: ИД Гелеос, 2002.
4. Касьянов Т.Р. Руководство по метанию ножей. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2007.
5. Макивой Г.К. Метание ножей: Практическое руководство. – М.: Астрель: АСТ, 2007.
6. Макивой Г.К. Метание ножей и томагавков. Искусство мастеров. – М.: Астрель: АСТ, 2005.
7. Семериков С.К. Метание ножей: Основы теории и практики. – М.: Старклайт, 2005.
8. Травников А.И. Как метать ножи. Практическое руководство. – Ростов н/Д: Феникс, 2007.
9. Травников А.И. Метание холодного оружия по системе спецназа КГБ. – Ростов н/Д: Феникс, 2005.
10. Трубников Б.Г. Метательное оружие: Словарь – справочник. – СПб.: Амфора, 2004.
11. Метание лассо. Метание ножа. – М.: АСТ; СПб.; Ост, 2006.

ПЛАНШЕТ СНАЙПЕРА

Кирилл Витальевич Конорев

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, курсант 3 курса факультета «Специальной Разведки», тел. 89833032137, e-mail: konorev2005@rambler.ru

В статье рассматривается методика применения планшета при проведении групповых занятий по изучению правил стрельбы из снайперской винтовки.

Ключевые слова: планшет, снайпер.

SNIPER PLOTTING BOARD FOR DELIVERING ACCURATE FIRE

Kirill V. Conorev

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, a third year student of the faculty «Special Intelligence», tel. 89833032137, e-mail: konorev2005@rambler.ru

In this paper the technique of holding the tablet in the group sessions to study the rules of fire from a sniper rifle.

Key words: tablet, a sniper.

При ведении боевых действий снайперы в зависимости от обстановки действуют парами или в одиночку. Наиболее часто применяются снайперские пары. Иногда несколько пар снайперов объединяются в группу. Как правило, один снайпер пары наблюдает (наблюдатель), другой ведет огонь (истребитель). Через 20-30 минут снайперы меняются ролями, так как непрерывное длительное наблюдение, в особенности при помощи бинокля, чрезвычайно утомительно. При отражении атаки и в других условиях, когда на поле боя имеется большое количество целей, а также при внезапном столкновении с противником огонь ведут оба снайпера пары — и истребитель и наблюдатель.

Обычно, получив боевую задачу от командира подразделения, снайперы самостоятельно выбирают позиции в указанной им полосе (направлении), занимают и оставляют их и при ведении огня действуют, сообразуясь с полученной задачей и обстановкой.

Задача снайперов в бою заключалась в основном в том, чтобы отыскивать и уничтожать огнем наиболее важные цели: офицеров противника, снайперов, наблюдателей, связных, пулеметные, минометные и орудийные расчеты, тем самым, способствуя успеху боевых действий своих подразделений.

Независимо от того какую задачу получил снайпер, основной задачей будет уничтожение целей с первого выстрела на максимальную дальность. Исходя из этого при подготовке к выполнению боевой задачи снайперская пара должна провести ряд подготовительных мероприятий.

Что же они включают в себя.

1. Перед выходом на позицию:
 - Тщательно подготовь оружие и экипировку, исходя из боевой задачи;
 - Уточнить температуру, давление, направление и скорость ветра (могут помочь артиллеристы, летчики);
 - Уточнить по карте: высоту над уровнем моря, углы места целей;
 - Кроме снайперских патронов взять трассирующие (можно бронебойные и зажигательные);
 - Подготовь радиостанцию, уточнить у командира роты позывные и частоты (основные и запасные), если есть необходимость разработать и довести до кого необходимо переговорную таблицу;
 - Обговори все вопросы со своим напарником, командиром отделения и роты, организовать взаимодействие с другими огневыми средствами;
 - Продумать план отхода и эвакуации;
 - Идя на задание - имей четкий алгоритм своих действий.
2. На огневой позиции.
 - Составь схему ориентиров и карточку огня;
 - Нанести ориентиры, определить дальность до них, углы места цели;
 - Определить исходные установки для стрельбы по каждому ориентиру и записать их на карточке огня;
 - Наблюдать.
3. Исходные данные для стрельбы включают:

Поправки вертикальные, горизонтальные на

1. Продольный ветер, выше - ниже в см.
2. Температуру воздуха, выше - ниже в см.
3. Давление, выше - ниже в см.
4. Угол места цели, дальше - ближе в м.

Поправки суммарные:

1. Деривацию
2. Боковой ветер
3. Движение цели

По таблице характеристик рассеивания пуль определить, сколько необходимо выстрелов для поражения цели.

Если нет возможности определить все метео данные для стрельбы, при возможности дать команду напарнику произвести пристрелку трассирующей пулей на такой же дальности, но по другой цели.

Расчет поправок при стрельбе в условиях, если они отклоняются от нормальных процесс довольно сложный и длительный. Перед нами была поставлена задача, как можно более упростить и ускорить этот процесс, при том, не прибегая к дорогим техническим средствам (компьютеры, ноутбуки и т.д.) в связи с низкой устойчивостью их к поломкам при боевом применении, малой автономностью и дороговизной. Проблема была всесторонне

исследована. В результате было предложено несколько планшетов для определения исходных установок в полевых условиях. Все представленные модели адаптированы для использования в полевых условиях, имеют размеры для переноски в полевой сумке, а люминесцентная подсветка позволяет использовать их и при недостаточном освещении. Планшеты просты в использовании, что позволяет обучить работе на них в течение нескольких занятий.

Таблица снайпера 7,62 мм винтовка СВД.

Деривация (м)	Дальность	ветер		ветер		При ветре 4м/с			
		4 м/с	8 м/с	4 м/с	8 м/с	Движение цели	Движение цели	Движение цели	Движение цели
						10м/с	10м/с	10м/с	10м/с
0,01	200	-	-	-	-	0-04л	0-04л	0-04л	0-04л
	300	0-00,5л	0-01,3л	0-00,5л	0-01,3л	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л
	400	-	-	-	-	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л
	500	0-01л	0-02л	0-01л	0-02л	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л
0,02	400	0-01л	0-02л	0-01л	0-02л	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л	0-04,5л
	500	-	-	-	-	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л
	600	0-01,5л	0-03,6л	0-01,5л	0-03,6л	0-06л	0-06л	0-06л	0-06л
	700	-	-	-	-	0-05л	0-05л	0-05л	0-05л
0,04	600	0-02л	0-04,7л	0-02л	0-04,7л	0-07л	0-07л	0-07л	0-07л
	700	-	-	-	-	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л	0-05,5л
	800	0-02,5л	0-06л	0-02,5л	0-06л	0-08л	0-08л	0-08л	0-08л
	900	-	-	-	-	-	-	-	-
0,06	1000	-	-	-	-	0-08,5л	0-08,5л	0-08,5л	0-08,5л
	1100	0-04л	0-09л	0-04л	0-09л	0-10,5л	0-10,5л	0-10,5л	0-10,5л
	1200	-	-	-	-	0-06,5л	0-06,5л	0-06,5л	0-06,5л
	1300	0-04л	0-10л	0-04л	0-10л	0-10,5л	0-10,5л	0-10,5л	0-10,5л
0,07	1200	-	-	-	-	0-07л	0-07л	0-07л	0-07л
	1300	0-04,5л	0-11,4л	0-04,5л	0-11,4л	0-11,5л	0-11,5л	0-11,5л	0-11,5л
	1400	-	-	-	-	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л
	1500	0-05л	0-12,5л	0-05л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л
0,08	1300	-	-	-	-	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л
	1400	0-05л	0-12,5л	0-05л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л
	1500	-	-	-	-	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л	0-07,5л
	1600	0-05л	0-12,5л	0-05л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л	0-12,5л

Рис. 1. Вариант планшета

Пересечение линии дальности (по горизонту) и поправок (линия повертикали) дает прицельную марку (ПМ). Для удобства линия по горизонту фиксируется контрольной линейкой. На обратной стороне располагаются памятка снайпера, карточка огня и другие материалы по необходимости.

2 вариант планшета.

Планшет представляет собой две круговые диаграммы с перемещающимися относительно друг друга кругами. При перемещении круга дальности, контрольная линия выдает поправку (ПМ) на круг поправок притом относительно направления ветра.

В настоящее время оба варианта планшетов проходят испытания при проведении полевых занятий на войсковом стрельбище филиала ВУНЦ, рассматривается также методика применения данных планшетов при проведении групповых занятий по изучению правил стрельбы из снайперской винтовки.

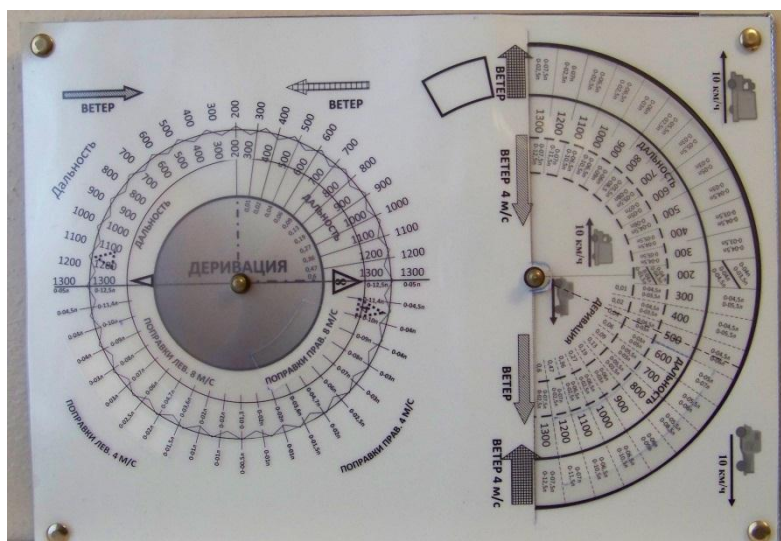


Рис. 2. 2 вариант планшета

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огневая подготовка мотострелковых подразделений // М.: Воениздат, 2008.
2. Правила стрельбы из стрелкового оружия и вооружения боевых машин // - М.: Воениздат, 1992.
3. Огневая подготовка // Учебник под общ.ред. Миронченко В. - М.: Воениздат, 2008.
4. Наставление по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия// - М.: Воениздат.
5. Наставление по стрелковому делу. 7,62-мм снайперская винтовка Драгунова (СВД) //- М.: Воениздат, 1987.
6. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибра 5,45 мм и 7,62 мм // М.: Воениздат, 1977.

© К.В. Конорев, 2012

ПРОВЕРОЧНАЯ МИШЕНЬ ДЛЯ ПРОВЕРКИ БОЯ И ПРИВЕДЕНИЕ К НОРМАЛЬНОМУ БОЮ 9,00-ММ СПЕЦИАЛЬНОЙ СНАЙПЕРСКОЙ ВИНТОВКИ «ВСС»

Сергей Александрович Арзамасцев

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, курсант 4 курса факультета «Специальной Разведки», тел. 89232409223, e-mail: shamanov007@mail.ru

Владимир Александрович Лазарев

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, старший преподаватель кафедры «Вооружение и Военная Техника», тел. 89134526654, e-mail: shamanov007@mail.ru

В данной статье рассматривается способ ведения боя среди подразделений специального назначения при приведении к нормальному бою снайперской винтовки ВСС.

Ключевые слова: бой, мишень, снайперская винтовка.

TEST TARGET FOR VERIFICATION OF FIGHT AND FIGHT REDUCTION TO NORMAL 9.00-MM SPECIAL SNIPER RIFLE «VSS»

Sergey A. Arzamastsev

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, a forth year student of the faculty «Special Intelligence», tel. 89232409223, e-mail: shamanov007@mail.ru

Vladimir A. Lazarev

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, senior teacher, department the «Armament and Military Equipment», tel. 89232409223, e-mail: shamanov007@mail.ru

This article describes a way of fighting among the units of a special purpose for bringing the fight to the normal VSS sniper rifle.

Key words: fight, target, sniper rifle.

Настоящий снайпер невидим, беспощаден и неуловим. Игнорировать снайпера нельзя. От него не спасают ни расстояние, ни бронезилет. Снайпер способен в корне изменить обстановку на поле боя, поставить нужную точку в политическом процессе и с точностью хирурга обезвредить террориста. Но даже при отличной стрелковой, физической и психологической подготовке снайпера, качество его стрельбы зависит от оружия. Винтовка любой известной марки не поразит ни одной мишени, если не будет приведена к нормальному бою и её прицел не будет выверен.

Качество приведения оружия к нормальному бою и выверки оптических прицелов оказывает существенное влияние на результаты стрельбы. Поэтому все оружие, находящееся в подразделениях, должно быть всегда исправно,

приведено к нормальному бою, и иметь выверенные прицелы. Стрельба из оружия, не приведенного к нормальному бою, и с невыверенными прицелами категорически запрещается, ибо это приводит не только к низким результатам стрельбы, но и наносит большой ущерб личному составу, вызывая у него неверие в качественное состояние своего оружия.

Проверка боя оружия (выверка прицелов) производится:

- При поступлении оружия в подразделение;
- После ремонта, замены частей, которые могли бы изменить бой оружия;
- При обнаружении во время стрельбы отклонений пуль, не удовлетворяющих требованиям нормального боя.

В боевой обстановке должны быть использованы все возможности для периодической проверки боя оружия (выверки прицелов) и приведения его к нормальному бою. Кроме того, выверку прицелов рекомендуется производить перед каждой стрельбой.

9,00-мм специальная снайперская винтовка ВСС, появившаяся в войсках специального назначения в 80-х годах прошлого века, за годы своего боевого применения стала оружейной легендой. Её в больших количествах закупают США и другие страны. В боевом применении «Винторез» на порядок результативнее всех известных образцов оружия такого класса и назначения. Практичные американцы широко разрекламированным натовским системам предпочитают бесшумную и невидимую смерть российского производства.

При проверке боя винтовки мы столкнулись с определенными трудностями, которые успешно устранили. Об этой проблеме и путях её устранения я хочу поделиться.

Согласно наставлению по стрелковому делу специальная снайперская винтовка «Винторез» приводится к нормальному бою проверочной мишени в форме круга радиусом 15 см. При этом точкой прицеливания и контрольной точкой является точка на нижнем краю цели. Прицел на механическом прицеле выставляется-10, на оптическом-1. При использовании данной мишени прицеливание и отклонение средней точки попадания от контрольной точки крайне неудобно. Из-за этого часто возникают ошибки при определении отклонения СТП от контрольной точки и корректировка боя оружия.

Я решил изменить порядок приведения к нормальному бою ВСС и разработать новую мишень. Расчётно-опытным путём я получил следующие данные. При стрельбе на 100 метров с механическим прицелом (прицел-15), превышение контрольной точки над точкой прицеливания составляет 32 см, а при стрельбе на ту же дальность с оптическим прицелом (прицел-1,25) превышение составляет 16 см. Зная эти данные мы, можем приводить винтовку к нормальному бою выбрав точку прицеливания, при стрельбе открытым прицелом (прицел-15) на 32 см ниже контрольной точки, а при стрельбе с оптическим прицелом (прицел-1,25) на 16 см ниже контрольной точки. Учитывая всё это необходимо сделать мишень высотой 50 см с контрольной

точкой на 32 см выше нижнего края мишени и тремя кругами вокруг контрольной точки (4, 5 и 6 см) для определения точности стрельбы.

Предлагаю также изменить форму мишени не круг, а прямоугольник (считаю, что в этом случае прицеливание более точно, чем по кругу).

Теперь мне необходимо рассчитать ширину мишени таким образом, чтобы целясь через открытый прицел, толщина мушки совпадала с толщиной мишени для удобства прицеливания. Зная, что расстояние от глаза до прицельной планки в среднем составляет 360 мм, от прицельной планки до мушки 320 мм, толщина мушки 2 мм, а расстояние до мишени 100 м, для расчётов мы можем воспользоваться формулой «тысячной» и определить:

$$Ш=100*0,002/(0,32+0,36)=0,29\text{м}$$

(где Ш ширина мишени.)

Имея проверочную мишень, рассчитанную, таким образом мы можем производить приведение к нормальному бою следующим образом:

1. Производим 4 выстрела по нашей проверочной мишени (дальность 100 м, прицел-15 на механическом прицеле, ТП - нижний край цели, расстояние от контрольной точки до точки прицеливания 32 см).

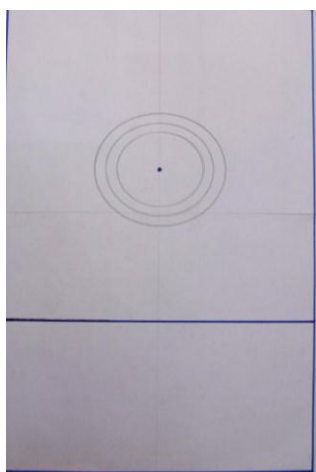


Рис. 1. Мишень для проверки боя

Проверяем кучность боя оружия (все пробойны должны уместиться в круг радиусом 15 см). Если кучность удовлетворяет, то находим СТП и проверяем точность боя оружия. Допустимое отклонение СТП от КТ не более 6см (большой круг). При необходимости вводим поправки и повторяем стрельбу.

2. После приведения к нормальному бою с механическим прицелом производим выверку оптического прицела.

3. Подгибаем мишень по линии таким образом, чтобы её нижний край был ниже контрольной точки на 16 см.

4. Далее производим четыре выстрела с оптическим прицелом (дальность 100 м, прицел-1,25, ТП - нижний край цели).

5. Если кучность (15 см) и точность боя (4 см- малый круг) удовлетворяет условия, винтовка готова к боевому применению.

Данный способ был неоднократно опробован на практике и уже пользуется большой популярностью среди подразделений специального назначения из-за минимизации ошибок при приведении к нормальному бою снайперской винтовки ВСС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огневая подготовка мотострелковых подразделений// - М.: Воениздат, 2008.
2. Наставление по стрелковому делу. 9-мм специальная снайперская винтовка (ВСС)// - М.: Воениздат, ГРУ ГШ ВС РФ, 1994.

© С.А. Арзамасцев, В.А. Лазарев, 2012

КОНФОРМНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ КВАЗИОПТИКА: ОТ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН ДО ФОКУСИРОВКИ УДАРНЫХ ВОЛН

Игорь Владиленович Минин

630092, Новосибирск, пр. Маркса 92, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры защиты информации, тел. 83833460853, e-mail: prof.minin@gmail.com

Олег Владиленович Минин

630092, Новосибирск, пр. Маркса 92, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры защиты информации, тел. 83833460853, e-mail: prof.minin@gmail.com

Приведен краткий обзор физических методов преобразования волновых фронтов трехмерными (конформными) дифракционными элементами миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Рассмотрены некоторые перспективные области их применения от электромагнитных волн до механики сплошных сред.

Ключевые слова: дифракционная квазиоптика, миллиметровые волны, дифракция.

CONFORMAL DIMENSIONAL DIFFRACTIVE QUASI-OPTICS: FROM MILLIMETER WAVE TO SHOCK WAVE FOCUSING

Igor V. Minin

Novosibirsk State Technical University, professor of information protection department, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Novosibirsk State Technical University, professor of information protection department, e-mail: prof.minin@gmail.com

The brief review of physical methods of transformation of wavefronts by the three-dimensional (conformal) diffractive elements of millimeter and submillimeter waves is discussed. Some perspective fields of application from electromagnetic waves up to a continuous mechanics are considered.

Key words: diffractive quasioptics, millimeter wave, diffraction.

Во многих областях науки для различных приложений существует необходимость получать различного рода преобразования волнового фронта, в том числе с целью получения изображений, с помощью волновых полей. При решении таких задач требуется формировать волновое поле с заданными пространственными характеристиками. Класс задач такого рода чрезвычайно широк – это задачи распознавания образов, построения изображений трехмерных объектов, построения дифракционных элементов, предназначенных для фокусировки излучения в заданную трехмерную область

пространства, дифракционной томографии, синтеза многолучевых сканирующих антенн, в том числе на трехмерных поверхностях и т.п.

В оптическом диапазоне длин волн классической задачей обработки изображений является улучшение качества. Эта задача впервые возникла в оптике и всегда решалась построением все более совершенных оптических систем, т.е. методами оптической обработки с применением рефракционных систем – линз и зеркал.

В то же время осуществить заданное преобразование волновых полей возможно на основе явлений дифракции. Характерной особенностью таких элементов является то, что их толщина сопоставима с длиной волны излучения, эти элементы очень «тонкие»: путем перехода от традиционного рефракционного элемента, толщина которого составляет несколько тысяч длин волн, к тонкому оптическому элементу фаза последнего приводится к интервалу $[0, 2\pi)$, вследствие чего толщина дифракционного элемента оказывается чрезвычайно малой. Кроме того, такая операция приводит к тому, что фокусирующие свойства элементов становятся зависящими от длины волны падающего излучения. Свойства элементов дифракционной квазиоптики (хроматизм) стали рассматриваться не как источники погрешностей и недостатков, а как дополнительная степень свободы, предоставляющая новые возможности для фокусировки излучения или коррекции волнового фронта [1]. В то же время дифракционный принцип управления волновыми фронтами позволяет создавать элементы со свойствами, принципиально недостижимыми при классических, рефракционных подходах [2].

Развитие дифракционных методов преобразования волновых фронтов не только открыло совершенно новые возможности в задачах видения (стало возможным принципиальное улучшение качества трехмерного изображения), но оно открыло и целый ряд новых научных направлений на стыке информатики, радиофизики и радиооптики. Дифракционная квазиоптика служит стимулом развития таких дисциплин, как теория квазиоптических систем и приборов, геометрическая и волновая оптика, дифракционная теория распространения излучения и формирования изображения, иконика и информатика. К этим дисциплинам принадлежит и конформная (трехмерная) дифракционная квазиоптика, в которой российским ученым принадлежит мировой приоритет. Конформные ДОЭ обладают целым рядом преимуществ, отсутствующих у плоских элементов: широкоугольное сканирование луча без изменения его характеристик, регулируемая полоса пропускания, совмещение излучательной поверхности с поверхностью различных объектов и т.п.

Значительное количество научных групп и исследователей в институтах Российской Академии наук, в университетах занимается проблемами дифракционного преобразования волновых фронтов. Следует упомянуть школы Нижнего Новгорода, Самары, Казани, Воронежа, Новосибирска, ученых из МГУ, ИАиЭ СО РАН, ГОИ и других. В то же время абсолютное большинство работ в этих коллективах выполнялось применительно к оптическому диапазону, который принципиально отличается от миллиметрового. Достаточно сказать, что диаметр квазиоптического элемента в оптическом диапазоне,

выраженный в длинах волн, на несколько порядков больше, чем на СВЧ. Кроме того, одной из основных характеристик дифракционного элемента является его дифракционная эффективность, которая в оптике определяется как отношение потока световой энергии, собираемой элементом в главном фокусе (в первом порядке дифракции), ко всему потоку, прошедшему через элемент. В оптике это приближение справедливо, поскольку прошедшая через элемент энергия практически не отличается от падающей на его поверхность. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн существенны эффекты поглощения излучения в материале дифракционного элемента (тангенс угла потерь на 3–4 порядка больше, чем в оптике) и его дифракционную эффективность следует определять, как отношение энергии, собираемой элементом в главном фокусе (в первом порядке дифракции), ко всему потоку, падающему на поверхность элемента [1, 2]. Эти обстоятельства и ряд других зачастую не позволяют использовать весь арсенал разработанных в оптике методов проектирования, синтеза и оптимизации соответствующих плоских элементов и систем.

Кроме того, вопросы дифракционного анализа структуры поля в области фокусировки ДОЭ ММДВ представляют значительный самостоятельный интерес в силу возможности моделирования соответствующих новых элементов интегральной оптики, где подобные прямые исследования крайне затруднены. При этом в ММДВ появляется уникальная возможность изготовления и исследования ДОЭ с предельно высоким оптическим качеством (отступление формы изготовления ДОЭ от заданной не превышает $\lambda/120$), что не достижимо в настоящее время в оптическом и лазерном диапазонах длин волн [1, 2].

Нами была поставлена задача создания дифракционных квазиоптических элементов с широкими функциональными возможностями, и она формулируется как обратная задача теории дифракции, которая в данном случае решается относительно границ, профиля зон и профиля поверхности дифракционного элемента. Причем ограничения, как правило, являются такими: задано распределение интенсивности; задано распределение фазы; задано и то, и другое, причем в существенно трехмерной области фокусировки. Отметим, что в научных публикациях соответствующий приоритет отдается российским исследованиям. Подробно эти вопросы были изложены в изданных за рубежом монографиях [4, 11-12], инициатива издания которой принадлежит бывшему директору Georgia Technology Institute (USA), Dr. James Wiltse.

Оказалось [1, 4, 5], что дифракционные элементы, рассчитанные по законам геометрической оптики и предназначенные для фокусировки электромагнитного излучения, с успехом могут применяться и для фокусировки ударных волн, причем давление в области фокусировки сравнимо или больше давления предельного однократного сжатия среды, и в этом случае акустическое приближение не применимо. Такие системы могут найти широкое применение, например, в медицине для разрушения камней в почках, создания новых систем звуковидения, для направленного изучения экстремальных свойств материалов, геофизике, при разработке ресурсосберегающих технологий освоения недр и т.п. (рис.1).

С практической (технологической) точки зрения гораздо выгоднее сформировать рельеф дифракционного элемента на поверхности вращения, так как это помогает уменьшить пространственные частоты структуры ДООЭ [11]. Направление синтеза дифракционных оптических элементов на вогнутых или выпуклых поверхностях вращения, появившееся позднее, чем в СВЧ диапазоне [6], позволяет создавать принципиально новую оптику лазерных систем, оптических и рентгеновских телескопов, систем многоканальной связи.

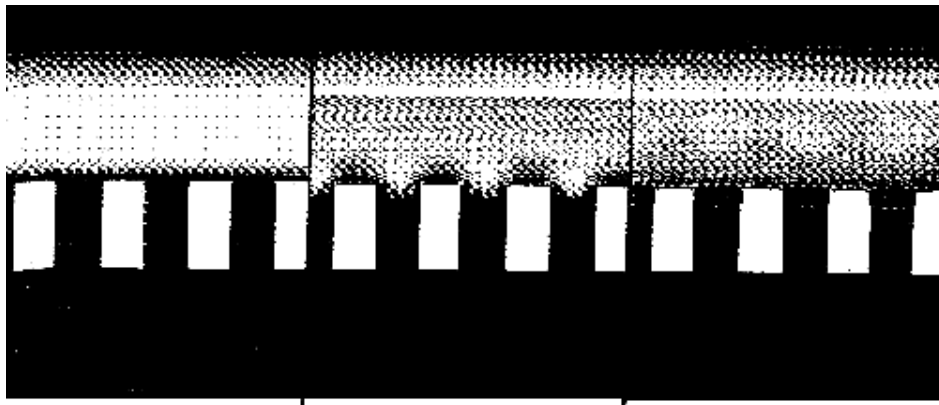


Рис. 1. Динамика взаимодействия ударной волны с дифракционной решеткой

Следует отметить направление синтеза дифракционных элементов с глубоким фазовым рельефом. В этом случае такие элементы могут совмещать в себе достоинства рефракционной оптики и возможности дифракционной, что позволяет осуществить, в том числе, синтез ахроматичных дифракционных элементов [7]. Фазовая структура таких элементов должна иметь рельеф поверхности глубиной около десятка длин волн. Работа ДООЭ на частотных гармониках позволяет путем выбора числа уровней квантования фазы использовать такой элемент в качестве либо фильтра, либо многодиапазонного элемента на кратных длинах волн. Кроме того, использование излучения с частотными гармониками более 5...7 позволяет рассматривать такой дифракционный элемент как ДООЭ с глубоким фазовым профилем. Это свойство позволяет создавать элементы для работы в крайне широком спектре с ахроматическими и апохроматическими свойствами (операция квантования фазы позволяет получить частичную ахроматизацию ДООЭ, если глубина рельефа много больше 2π). В этом случае одновременно для нескольких длин волн спектра глубина фазового профиля будет кратна 2π , но с различным коэффициентом кратности. Такой высокопорядковый ДООЭ будет иметь высокую эффективность фокусировки излучения в окрестности этого набора длин волн. Однако в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне реализация высокопорядковых ДООЭ приводит к снижению дифракционной эффективности из-за потерь энергии в материале ДООЭ. В оптике такое направление появилось позднее, чем в технике СВЧ [8].

Проблема дифракционного преобразования СВЧ волновых полей, безусловно, относится к информационным технологиям. Данная проблема

является типичным примером рассмотрения интегрального научного направления, построенного на основе оптики, акустики, радиофизики, механики сплошной среды. Поэтому по мере углубления в изучение природы изображений и методов преобразования волновых полей, проблемы управления пространственно-временными характеристиками волновых полей, перед нами открывается все больше и больше новых задач.

Представляется существенным, что в исследованиях по рассмотренным выше и другим перспективным направлениям могут принимать участие и студенты ВУЗов, поскольку формализация и детализация конкретных задач позволяет разбить соответствующую научно-техническую проблему на совокупность более мелких подзадач, доступных для решения студентами и аспирантами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика. – Москва: ИнформТех, 1992. – 180 с.
2. Минин И.В., Минин О.В. Дифракционная квазиоптика и ее применения. – Новосибирск: СибАГС, 1999. – 382 с.
3. А.С.1617398 СССР, МКИ G02B27/42. Зонная пластина / Минин И.В., Минин О.В. Подано 26.09.1988. Опубликовано 21.09.1989 // Бюлл. изобрет. – 1989. – № 28. – Приоритет от 26.09.1988.
4. Minin O.V., Minin I.V. Diffractive optics of Millimeter waves. – IOP Publisher, London, 2004. – 465 p.
5. Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V. The dynamics of shock wave focusing with the elements of diffraction quasiotics. // Book of abstracts of the 18th Int. Symp.on SW, Sendai, July 21-26 1991, Japan. – P.90.
6. Churin E.G., Bayvel P., Shirnitskii V.B. et al. Concave grating and convex mirror double dispersion spectrograph for optical network applications // Appl. Opt., 1997. – V.36 – P. 7822 – 7825.
7. А.С. 1762651 СССР. Устройство для фокусировки излучения /Минин И.В., Минин О.В. Подано 5.07.1989. Опубликовано 21.09.1990 // Бюлл. изобрет. – 1990. – № 34. – Приоритет от 5.07.1989.
8. Faklis D., Morris M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses // Appl. Opt., 1995. – V.34 – P.2462 – 2468.
9. А.С. 1596417 СССР, МКИ H01Q15/12. Зонная пластина /Минин И.В., Минин О.В. Подано 28.3.1988. Опубликовано 30.09.1990 // Бюлл. изобрет. – 1990. – № 36. – Приоритет от 28.3.1988.
10. Minin I.V., Minin O.V. The Dielectric Non-Metallic Reflecting FZP Antennas. // Proceedings of the 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, September 12–15, 2000, Beijing, China. – P. 461–462.
11. Minin I.V., Minin O.V. Three Dimensional Fresnel Antennas. - Research Signpost, Kerala, India, 2005. – 25p.
12. Minin I.V., Minin O.V. Basic Principles of Fresnel Antenna Arrays. Springer, Series: Lecture Notes Electrical Engineering , Vol. 19, 2008. – 310P.

ЛИНЕЙКА ГАБАРИТНАЯ (ЛЛ-1) ДЛЯ ПРОВЕРКИ БОЯ ВИНТОВКИ ВСС

Владимир Александрович Лазарев

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, старший преподаватель кафедры «Вооружение и Военная Техника», тел. 89134526654, e-mail: shamanov007@mail.ru

Александр Владимирович Лесной

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, курсант 4 курса факультета «Специальной Разведки», тел. 89232565794, e-mail: shamanov007@mail.ru

В статье рассматривается специальная линейка для специализированной снайперской винтовки, которая была разработана и предложена для применения.

Ключевые слова: бой, мишень, снайперская винтовка.

OVERALL RULER FOR CHEKING SPECIALIZED SNIPER RIFLE COMBAT CAPABILITIES

Vladimir A. Lazarev

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, senior teacher, department the « Armament and Military Equipment », tel. 89134526654, e-mail: shamanov007@mail.ru

Alexander V. Lesnoy

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, a forth year student of the faculty «Special Intelligence», tel. 89232565794, e-mail: shamanov007@mail.ru

The article deals with a special line for a specialized sniper rifle, which was developed and proposed for use.

Keywords: fight, target, sniper rifle.

Американские исследователи подсчитали, что в войне во Вьетнаме для уничтожения противника американскому военнослужащему требовалось в среднем 20000 патронов. Во время Великой Отечественной Войны хорошо подготовленный Советский снайпер уничтожал в среднем от 100 до 500 немецких солдат, офицеров и десятки снайперов, и большинство из них с первого выстрела. Не стоит забывать, что один выстрел из снайперской винтовки вполне может изменить ход истории. К примеру, убийца Джона Кеннеди кардинально изменил направление внешней политики США всего одним нажатием на спусковой крючок.

Однако для точного попадания в цель необходима не только индивидуальная подготовка снайпера, но и подготовка его личного оружия – снайперской винтовки. Основой подготовки оружия к выполнению боевых

задач является проверка и приведения оружия к нормальному бою. Для проверки боя оружия и приведения его к нормальному бою используется габаритная линейка ЛГ-1. Данная линейка хорошо зарекомендовала себя при проверке боя таких образцов оружия как автоматы (АКС74, АК74 и т.д.), пулеметов (ПКМ, РПК и т.д.), однако она не обеспечивает правильных и точных действий снайпера при проверке боя 9.00 мм винтовки специальной снайперской ВСС «Винторез», так как была выпущена раньше, чем принята на вооружение данная винтовка. Для приведения к нормальному бою 9 мм винтовки снайперской специальной (ВСС) я разработал и предлагаю использовать специальную габаритную линейку. Предлагаемая габаритная линейка обеспечивает максимальную точность и быстроту действий снайпера при проверке и приведении к нормальному бою своего личного оружия, максимально исключает ошибки по вине снайпера. Линейка изготовлена (рис. 1) из прозрачного пластика, высокой прочности, она имеет четыре круга диаметрами 15 (габарит рассеивания), 12 (для механического прицела), 10 (для НСПУ-3) и 8 (для ПСО-1-1) сантиметров. Вверху и справа нанесена обычная линейка с шагом 1мм. Кроме того для расчета перемещения лимба прибора ПРБ по направлению вверх нанесена разметка в лимбах, а справа для смещения средней точки попадания (СТП) по высоте в оборотах мушки, для работы с прибором ПРБ (СБ-1). В левом нижнем углу имеется таблица с данными необходимыми для приведения ВСС к нормальному бою. Центр кругов обозначен пересечением вертикальной и горизонтальной линий. Длина линейки 20 сантиметров, ширина - 26 сантиметров, что позволяет переносить линейку в командирской сумке.

Снайпер - человек особый, и подготовка снайпера должна носить индивидуальный характер. По моему мнению, целесообразно комплектовать винтовки данными линейками при поступлении в войска. Процесс проверки боя с использованием данной габаритной линейки уменьшает время подготовки оружия к бою и уменьшает вероятность внесения ошибок.

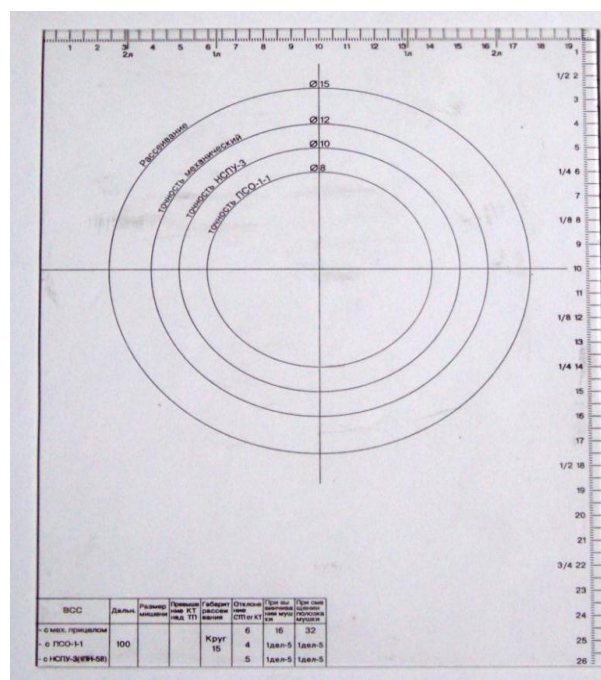


Рис. 1. Линейка габаритная для проверки боя 9.00 мм винтовки специальной снайперской ВСС (ЛЛ-1)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огневая подготовка мотострелковых подразделений. - М.: Воениздат, 2008.

2. Наставление по стрелковому делу. 9-мм специальный автомат (АС). - М.: Воениздат, ГРУ ГШ ВС РФ, 1994.
3. Наставление по стрелковому делу. 9-мм специальная снайперская винтовка (ВСС). - М.: Воениздат, ГРУ ГШ ВС РФ, 1994.
4. Наставление по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия. - М.: Воениздат.

© В.А. Лазарев, А.В. Лесной, 2012

ОРУЖИЕ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

Николай Николаевич Антоненчик

Новосибирское высшее военное командное училище, 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49, старший преподаватель кафедры «Вооружение и Военная Техника», тел. 89537979600, e-mail: shamanov007@mail.ru

В статье раскрываются образцы оружия работающие на новых принципах. Даётся их анализ и направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: оружие, противник.

ARMS ON NEW PHYSICAL PRINCIPLES

Nicholay N. Antonenchik

Novosibirsk Higher Military Command School, Novosibirsk, 630117, 49 Ivanova, senior teacher, department the « Armament and Military Equipment », tel. 89537979600, e-mail: shamanov007@mail.ru

The article describes examples of work-ing of weapons based on new principles. Provides analysis and directions for further development.

Key words: weapon, enemy.

Наряду с развитием традиционных видов оружия во многих странах большое внимание уделяется работам по созданию нетрадиционного оружия или, как более принято говорить, оружия на новых физических принципах.

Оружие на новых физических принципах (ОНФП) – это вид оружия, действие которого основывается на использовании направленных высокоэнергетических излучений и полей, нейтральных или заряженных частиц, а также на других нетрадиционных способах полного или частичного поражения живой силы, боевой техники, объектов или территории противника.

Некоторые типы такого оружия могут быть отнесены к оружию массового поражения. Его применение приведёт к новому опасному и революционному скачку в военном деле.

Лазерное оружие (ЛО) – вид оружия направленной энергии, основанный на использовании электромагнитного излучения высокоэнергетических лазеров. Поражающий эффект ЛО определяется в основном термомеханическим и ударно – импульсным воздействием лазерного луча на цель.

В зависимости от плотности потока лазерного излучения эти воздействия могут привести к временному ослеплению человека или к разрушению корпуса ракеты, самолета и др.

Основу комплекса составляет кислородно-иодистый лазер с мощностью выходного излучения несколько мегаватт. По оценкам специалистов он будет иметь дальность действия до 400 км.

Не прекращаются работы по исследованию возможности создания и рентгеновских лазеров.

По состоянию на начало 21-го века наиболее отработанным считалось тактическое лазерное оружие, обеспечивающее поражение оптико-электронных средств и органов зрения человека.

Ускорительное (пучковое) оружие - это оружие основано на использовании узконаправленных пучков заряженных или нейтральных частиц, генерируемых с помощью различных типов ускорителей как наземного, так и космического базирования.

Поражение различных объектов и человека определяется радиационным (ионизирующим) и термомеханическим воздействием. Пучковые средства могут разрушать оболочки корпусов летательных аппаратов, поражать баллистические ракеты и космические объекты путем вывода из строя бортового электронного оборудования. Предполагается, что с помощью мощного потока электронов можно осуществлять подрыв боеприпасов с взрывчатым веществом, расплавлять ядерные заряды головных частей боеприпасов.

Работы по ускорительному оружию на пучках заряженных частиц (электронов) ведутся в интересах создания комплексов ПВО кораблей, а также для мобильных тактических сухопутных установок.

Инфразвуковое оружие – один из видов ОНФП, основанного на использовании направленного излучения мощных инфразвуковых колебаний.

Прототипы такого оружия уже существуют и неоднократно рассматривались в качестве возможного объекта для испытаний.

По данным исследований, проводившихся в некоторых странах, инфразвуковые колебания могут воздействовать на центральную нервную систему и пищеварительные органы, вызывая паралич, рвоту и спазмы, приводить к общему недомоганию и болевым ощущениям во внутренних органах, а при более высоких уровнях на частотах в единицы герц – к головокружению, тошноте, потере сознания, а иногда к слепоте и даже смерти.

Опытные образцы инфразвукового оружия уже применялись в Югославии. Так называемая «акустическая бомба» производила звуковые колебания очень низкой частоты.

Радиочастотное оружие

В последние годы активизировались исследования по изучению биологического действия электромагнитных излучений. Главное место в исследованиях отводится воздействию на людей электромагнитного излучения в диапазоне радиочастот от крайне низких ($f = 3\text{—}30$ Гц) до сверхвысоких ($f = 3\text{—}30$ ГГц).

В результате проведенных в США экспериментов определено, что при однократном воздействии на человека излучений с определенными частотами в диапазоне радиочастот от 30 до 30000 МГц (метровые и дециметровые волны) при интенсивности более 10 МВт/см² отмечаются: головная боль, слабость, угнетенное состояние, повышенная раздражительность, чувство страха, нарушение способности принимать решения, ухудшение памяти.

Воздействие на головной мозг радиоволн в диапазоне частот 0,3–3 ГГц (дециметровые волны) при интенсивности до 2 МВт/см² вызывает ощущение свиста, жужжания, гудения, пощелкивания, исчезающие при соответствующем экранировании. Установлено также, что мощные электромагнитные излучения могут вызывать сильные ожоги, ослепление.

Геофизическое оружие – это оружие, поражающее действие которого основано на использовании в военных целях природных явлений и процессов, вызываемых искусственным путем. В зависимости от среды, в которой происходят эти процессы, оно подразделяется на атмосферное, литосферное, гидросферное, биосферное и озонное.

Атмосферное (погодное) оружие – наиболее исследованный на сегодня вид геофизического оружия. Применительно к атмосферному оружию его поражающими факторами являются различного рода атмосферные процессы и связанные с ними погодные и климатические условия, от которых может зависеть жизнь, как в отдельных регионах, так и на всей планете.

Литосферное оружие основано на использовании энергии литосферы, то есть внешней сферы «твердой» Земли, включающей земную кору и верхний слой мантии. При этом поражающее действие проявляется в виде таких катастрофических явлений, как землетрясение, извержение вулканов, перемещение геологических образований. Источником выделяющейся при этом энергии является напряженность в тектонически опасных зонах.

Проведение рядом исследователей опытов показали, что в некоторых сейсмоопасных районах Земли с помощью наземных или подземных ядерных взрывов относительно малой мощности можно инициировать землетрясения, которые могут привести к катастрофическим последствиям.

Гидросферное оружие основано на использовании в военных целях энергии гидросферы. Гидросфера – это прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твердой земной корой (литосферой). Она представляет собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод.

Использование энергии гидросферы в военных целях возможно при воздействии на гидроресурсы (океаны, моря, реки, озера) и гидросооружения не только ядерных взрывов, но и крупных зарядов обычного взрывчатого вещества. Поражающими факторами гидросферного оружия будут сильные волны и затопления.

Биосферное оружие (экологическое) основано на катастрофическом изменении биосферы. Биосфера охватывает часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы, которые взаимосвязаны сложными биохимическими циклами миграции веществ и энергии.

Искусственно вызванные эрозия почвы, гибель растительности, непоправимый ущерб флоре и фауне вследствие применения различного рода химических средств, зажигательного оружия может привести к катастрофическому изменению биосферы и, как следствие, массовому поражению людей.

Озонное оружие основывается на базе использования энергии ультрафиолетового излучения, испускаемого Солнцем. Экранирующий озонный

слой простирается на высоте от 10 до 50 км с максимумом концентрации на высоте 20–25 км и резким убыванием вверх и вниз.

Частичное разрушение озонового слоя над территорией противника, искусственное создание временных «окон» в защитном озоновом слое может привести к поражению населения, животного и растительного мира в запланированном районе Земного шара за счет воздействия больших доз жесткого УФ-И и других излучений космического происхождения.

Таким образом, анализ проводимых в последние годы исследований в области геофизического воздействия на окружающую среду свидетельствует о вероятности появления в XXI веке принципиально новых подходов к технологии создания некоторых видов геофизического оружия.

Генное оружие

Научно технические достижения в области биотехнологии в последние годы позволили выйти на новое направление развития этой науки, получившей название эволюционно молекулярная («генная») инженерия. В ее основе лежит технология воспроизведения в лабораторных условиях процессов адаптивной эволюции генетического материала.

Особым видом генного оружия является так называемое этническое оружие – оружие с избирательным генетическим фактором. Оно рассчитано на поражение прежде всего определенных этнических и расовых групп населения.

Аннигиляционное оружие — один из возможных, но пока гипотетических видов ОНФП, действие которого основывается на процессе аннигиляции (взаимопревращении) частиц с выделением большого количества энергии.

Кинетическое оружие

Западные специалисты в своих планах переоснащения вооруженных сил с целью повышения их мощи, мобильности и расширения боевых возможностей немаловажное значение среди исследуемых систем оружия на новых физических принципах придает созданию средств вооруженной борьбы на базе электродинамических ускорителей массы или электрических пушек, основной привлекательной особенностью которых является достижение гиперзвуковых скоростей поражения, в том числе без применения специальных боевых частей.

Несмертельное оружие.

Под оружием несмертельного (нелетального) действия понимаются средства воздействия на людей и технику, созданные на основе химических, биологических, физических и иных принципов, которые делают противника небоеспособным в течение определенного времени.

Несмертельное оружие, разработанное в странах НАТО, включает следующие виды.

Акустическое оружие – малогабаритные мощные генераторы, работающие в инфразвуковом и звуковом диапазонах частот. Предназначено для поражения людей, в том числе находящихся в укрытиях и технике.

Электромагнитное оружие – генераторы электромагнитного излучения СВЧ диапазона, предназначенные для поражения главным образом электрооборудования.

Ослепляющее оружие – источники когерентного и некогерентного оптического излучения для вывода из строя оптико электронной аппаратуры и поражения органов зрения.

Химические средства – аэрозольные рецептуры психотропных средств, различные пенообразующие, клейкие и быстротвердеющие составы, активные химические агенты, ингибиторы и активаторы реакций окисления, способные нарушать молекулярную структуру металлических сплавов, компонентов боеприпасов и резиновых изделий.

Биологические средства – микроорганизмы, модифицированные с помощью методов генной инженерии обладающие специфическими свойствами нарушать структуру металлических сплавов, компонентов боеприпасов и резиновых изделий, превращать горюче смазочные материалы в желеобразную массу.

Средства информационно психологического воздействия на личность и организованные коллективы.

Отдельные образцы несмертельного оружия применялись в вооруженных конфликтах в Сомали, на Гаити, в Ираке.

Средства информационной войны

Под термином «информационная война» понимается комплекс мероприятий, направленных на предотвращение несанкционированного использования, повреждения или уничтожения элементов собственной информационной инфраструктуры (ИИ), а также использование, нарушение целостности или уничтожение элементов ИИ противника в целях обеспечения информационного превосходства в мирное время, а также на различных этапах подготовки и ведения боевых действий.

В странах НАТО широко обсуждаются вопросы дальнейших разработок и принципов использования несмертельного оружия. Это связано со значительным расширением участия ВС стран блока в различного рода региональных конфликтах и миротворческих операциях. Сталкиваясь при этом с нерегулярными вооруженными формированиями, ведущими боевые действия нетрадиционными способами, подразделения либо не справляются с поставленными задачами, либо несут неоправданно большие потери.

© Н.Н. Антоненчик, 2012

КОЛЬЦЕВАЯ СХЕМА РЕЗОНАТОРА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий СГГА, тел.(913)462-10-75, e-mail: v.s.ayrapetyan@ssga.ru, e-mail: v.hayr100011@mail.ru.

Тамара Антоновна Широкова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА, тел.(913)922-76-06, e-mail: dept.asp@ssga.ru

Разработан и создан ИК - параметрический генератор света (ПГС), позволяющий плавную и/или дискретную перестройку частоты излучения в спектральном диапазоне 1,41 – 4,24 мкм. Выходная энергия излучения ПГС с кольцевым резонатором достигала до 50 мДж в импульсе. Ввод в резонатор эталона Фабри – Перо позволяет сузить спектральную ширину излучения ПГС до величины $0,7\text{см}^{-1}$.

Ключевые слова: параметрический генератор света, эталон Фабри – Перо, аналогово-цифровой преобразователь.

RING RESONATOR SCHEME OPTICAL PARAMETRIC OSCILLATOR

Valerik S. Ayrapetyan

Siberian State Geodesy Academy, Plohotnogo str. 10, professor, tel. (913)462-10-75, e-mail: v.s.ayrapetyan@ssga.ru, e-mail: v.hayr100011@mail.ru

Tamara A. Shirokova

Siberian State Geodesy Academy, Plohotnogo str. 10, professor, tel. (913)922-76-06, e-mail dept.asp@ssga.ru

A LiNbO_3 Optical Parametric Oscillator (OPO) having the possibility of continuous tuning in the spectral range of $1.42 \div 4.24\mu\text{m}$ and shifting up to 12nm is created and investigated. The OPO resonator ring circuit provided the output energy of up to 50 mJ. Radiation bandwidth narrowing of up to 0.7cm^{-1} by introducing the Fabry – Perrot etalon into the OPO resonator has been obtained.

Key words: Optical Parametric Oscillator, Fabry-Perrot etalon, Analog digital Converter.

1. Введение

Перестраиваемые лазерные источники света с длинами волн излучения от 1,4 до 4,3 мкм представляют большой практический интерес. В частности, они находят широкое применение в задачах спектроскопии при дистанционном зондировании компонентов атмосферы. Наибольшее внимание привлекают перестраиваемые лазеры на основе параметрической генерации света с использованием нелинейных кристаллов. Традиционно в качестве источника накачки ПГС применяются неодимсодержащие импульсные лазеры, а в качестве

преобразователя частоты используются нелинейные кристаллы (НК): KNbO_3 , LiNbO_3 , КТР, КТА и др.[1]. Важной характеристикой ПГС, используемых в дистанционном зондировании компонент атмосферы, является малая угловая расходимость, сочетающаяся с узкой спектральной шириной и высокой энергией выходного излучения ПГС.

К настоящему времени для изучения характеристик внерезонаторных ПГС на основе LiNbO_3 реализовано большое количество оптических схем [2-7]. Исследования простейших линейных схем резонаторов ПГС [3, 4] показали, что при удовлетворительных энергетических показателях расходимость излучения таких генераторов довольно высока и сильно возрастает с увеличением энергии накачки.

Использование конфокального неустойчивого резонатора ПГС [7, 8] обеспечивает высокое качество выходного пучка с расходимостью, близкой к дифракционной. Однако такие резонаторы особо чувствительны к разъюстировке и пригодны только для обеспечения генерации на фиксированной длине волны. Теоретические исследования оптических резонаторов ПГС [9] и их компьютерное моделирование [10] показывают, что резонаторы с вращением изображения обеспечивают высокое качество выходного пучка.

Результаты выполненных экспериментальных исследований [11], а также ряд работ, например [6], показывают, что кольцевая трехзеркальная схема резонатора ПГС обеспечивает низкую расходимость пучка при высоких энергетических характеристиках.

Цель данных исследований заключается в создании высокоэффективного ПГС, позволяющего осуществлять плавную и (или) дискретную перестройку длины волны выходного излучения в диапазоне от 1,41 до 4,24 мкм. Для обеспечения таких типов перестройки излучения ПГС был выбран НК LiNbO_3 , который обладает высокими нелинейными и электрооптическими коэффициентами. Выбор трехзеркального кольцевого резонатора обусловлен преимуществом данной оптической схемы по сравнению с линейными, так как он позволяет реализовать параметрическую генерацию в режиме бегущей волны. Трехзеркальный резонатор менее чувствителен к разъюстировке. В таком резонаторе нет стоячих волн и интенсивность излучения в нем существенно более однородна, чем в линейных резонаторах. Последнее обстоятельство особенно важно из-за относительно низкого оптического пробоя кристалла ниобата лития (300МВт/см^2). В трехзеркальном резонаторе после каждого обхода луча осуществляется вращение изображения, что существенно компенсирует неоднородность поперечной структуры пучка генерации ПГС, а также ослабляет влияние оптических неоднородностей пучка накачки на кристалл LiNbO_3 .

2. Экспериментальная часть

Для накачки ПГС используется излучение лазера с активным элементом YAG:Nd^{3+} размерами $\varnothing 6, 3 \times 100$ мм. Лазер накачки собран по схеме телескопического неустойчивого резонатора. Энергия излучения на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм в импульсе составляла 180 мДж, длительность импульса

излучения 10 нс. Оптимальная частота следования импульсов, при которой энергия незначительно отличалась от средней энергии в режиме редко повторяющихся импульсов, установилась на уровне $20 \div 30$ Гц. Следует отметить, что при повышении частоты повторения импульсов (> 30 Гц) происходит сильная энергетическая нестабильность (более 30%). Излучение линейно - поляризовано в горизонтальной плоскости. Распределение интенсивности пучка в сечении имеет вид концентрических колец.

На рис. 1 приведена оптическая схема трехзеркального кольцевого резонатора ПГС. Активный элемент из НК LiNbO_3 размерами $10 \times 10 \times 30$ мм ориентирован $\theta = 47^\circ$, $\varphi = -90^\circ$. НК установлен на вращательной платформе с шаговым двигателем и может вращаться вокруг вертикальной оси с точностью до 3 arcsec, обеспечивая плавную перестройку длины волны выходного излучения

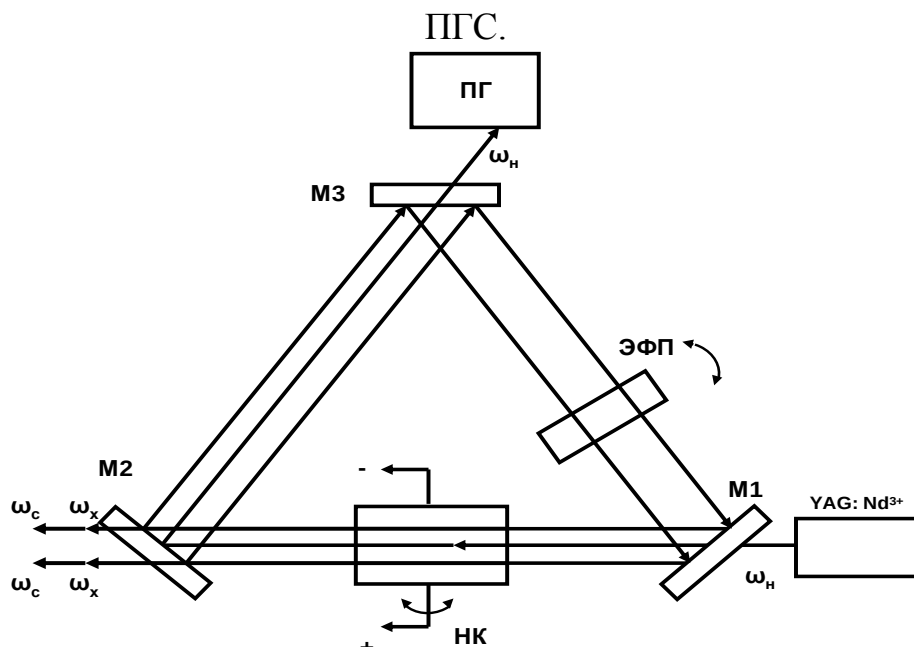


Рис. 1. Оптическая схема кольцевого резонатора ПГС:

YAG: Nd^{3+} - лазер накачки; НК – нелинейный кристалл из LiNbO_3 ; M1, M2, M3 – зеркала; ЭФП – эталон Фабри – Перо; ПГ – поглотитель излучения лазера накачки; ω_c , ω_x , ω_n – сигнальная и холостая частоты, и частота лазера накачки

Дискретная перестройка длины волны ПГС обеспечивается подачей постоянного электрического напряжения на нерабочие поверхности НК. Смещение длины волны излучения ПГС за счет температурного нагрева НК программно контролируется и компенсируется с погрешностью до $0,1^\circ\text{C}$. Дополнительное сужение спектральной ширины излучения ПГС достигается введением в резонатор ПГС ЭФП, также установленного на вращательной платформе. ЭФП действует непосредственно на сигнальную волну, автоматически сужая и холостую волну.

Настройка полосы пропускания ЭФП на необходимую спектральную линию осуществляется путем углового вращения его оси относительно направления падающего на него излучения. ЭФП устанавливается в той части резонатора ПГС, где отсутствует мощное излучение волны накачки. Таким образом, обеспечиваются наиболее благоприятные условия для его нормальной работы.

Регистрация, обработка и управление сигналами выполняется блоком управления (рис. 2). Для этой цели часть выходного излучения ПГС отражаясь от плоскопараллельной CaF_2 пластинки (менее 4%), направляется в узел калибровки и подстройки длины волны. Узел калибровки представляет собой диффузно-рассеивающую сферу с двумя идентичными фотоприемниками ФР-219 из PbSe . Первый фотоприемник используется для математического вычитания энергетических нестабильностей. На второй фотоприемник излучение падает через кювету с известным газом (в данном случае - метаном с чистотой 90% при давлении 1 атм.). Далее электрические сигналы от фотоприемников поступают на два входа аналого-цифрового преобразователя (АЦП), выход которого соединен с персональным компьютером (ПК). На экран монитора ПК выводится колебательно-вращательный спектр поглощения ν_3 полосы метана, центральная Q - ветвь которой является репером. Для калибровки длины волны ПГС на рассеивающей сфере предусмотрена возможность установления ИК – световода марки GF-F-160, через который лазерное излучение подается на входную щель монохроматора МДР-12. Такое решение позволяет автоматически настраивать длину волны излучения на заданную.

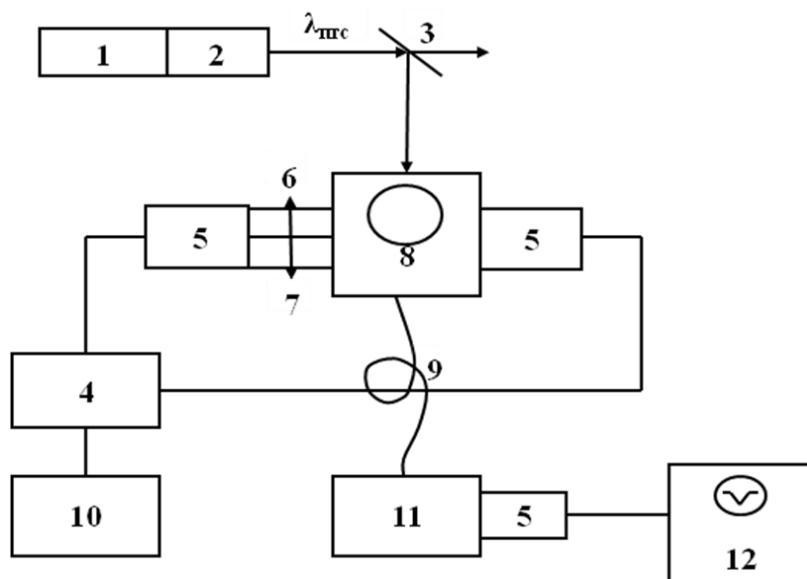


Рис. 2. Оптическая схема измерения длины волны и ширины спектра излучения:

1 – лазер накачки YAG:Nd^{3+} ; 2 – узел ПГС; 3 – плоскопараллельная пластинка из CaF_2 ; 4 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 5 – фотоприемник ФР-219 из PbSe с предусилителем; 6 – кювета с метаном; 7 – кювета с газом; 8 – диффузно-рассеивающая сфера; 9 – ИК-световод из CaF_2 ; 10 – ПК; 11 – монохроматор МДР-12; 12 – осциллограф С1-91

3. Результаты и их обсуждение

Исследования энергетических характеристик излучения ПГС были выполнены при предельных температурных режимах окружающей среды как в лабораторных условиях ($T = +30^{\circ}\text{C}$), так и в открытой атмосфере ($T = -10^{\circ}\text{C}$). В данных условиях после 30 минут работы лазера с частотой следования импульсов 25 Гц энергетическая нестабильность не превышала $\pm 6\%$.

На рис. 3 представлена зависимость энергии излучения ПГС от длин сигнальной ($\lambda = 1,42 \div 1,75$ мкм) и холостой ($\lambda = 2,9 \div 4,2$ мкм) волн.

Резкий спад энергии сигнальной волны в области $\lambda = 1,69$ мкм и отсутствие генерации холостой волны в области $\lambda = 2,85$ мкм связаны с сильным поглощением ниобата лития в области $\lambda = 2,85$ мкм. В реализованной схеме ПГС достигается суммарный коэффициент преобразования 27 %.

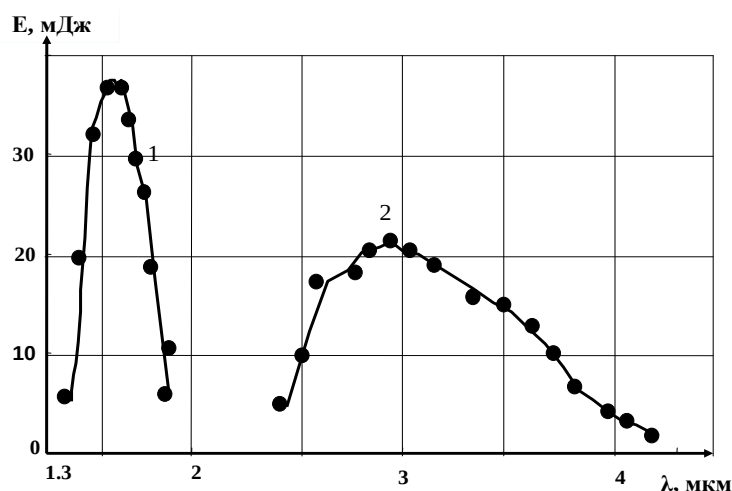


Рис. 3. Распределение энергии излучения ПГС в сигнальной и холостой волнах:

1 – сигнальная волна, 2 – холостая волна

Численное значение угловой расходимости пучка согласно [9] вычислялось как отношение d/l диаметра диафрагмы d , в которую попадает 86 % полной энергии импульса излучения ПГС, к фокусному расстоянию линзы l , причем диафрагма была установлена в плоскости линзы. Экспериментально полученные значения расходимости сигнальной и холостой волн излучения ПГС не превышали 3,5 мрад во всем диапазоне генерации (рис.3). Это значение существенно не изменялось при незначительном варьировании длины резонатора. Полученный результат совпадает со значением расходимости излучения, рассчитанным по методу M^2 [12].

На рис. 4. представлены спектры излучения ПГС, полученные для произвольной холостой волны.

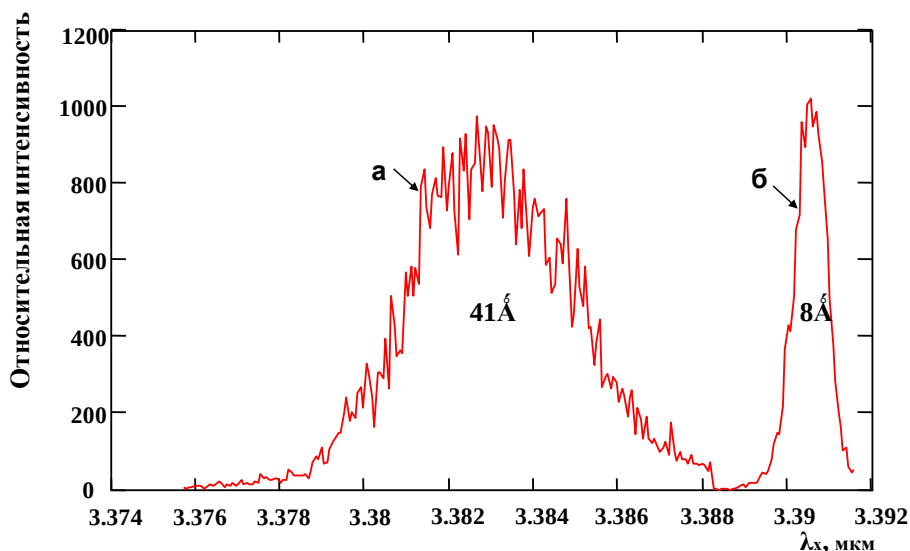


Рис. 4. Спектры излучения холостой волны ПГС:

- а) без ЭФП ($\lambda_{01} = 3,383$ мкм) $\Delta\nu = 3,6\text{см}^{-1}$
 б) с использованием ЭФП ($\lambda_{02} = 3,391$ мкм) $\Delta\nu_{\text{Э}} = 0,69\text{см}^{-1}$

Рис. 4а соответствует спектру излучения ПГС для резонатора без спектрального фильтра. Рис. 4б показывает насколько сужается спектр излучения ПГС при вводе в резонатор ЭФП. Аналогичные спектры были получены во всем диапазоне перестройки длин волн ПГС. При сужении полуширины спектра излучения ПГС от 4 до 5 раз изменение энергии излучения ПГС было незначительным.

4. Заключение

В заключении приведем некоторые основные параметры ИК – ПГС:

Область плавной перестройки	1,42 ÷ 1,85; 2,9 ÷ 4,2 мкм
Величина дискретной перестройки	0 ÷ 12 нм
Суммарная энергия в импульсе	до 50 мДж
Расходимость излучения	≤ 3,5 мрад
Спектральная ширина излучения	0,7 ÷ 0,9 см ⁻¹
Частота следования импульсов	25 ÷ 30 Гц
Длительность импульса	10 нс

Таким образом, по результатам исследований нелинейно-оптических свойств кристаллов LiNbO₃ и КТР, а также на основе использования современных технологических и компьютерно-программных разработок был создан и испытан ИК – ПГС с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения. Благодаря своим характеристикам данный ИК – ПГС может применяться как в лидарных комплексах, так и при решении различных спектроскопических задач фундаментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan, D. N. Nikogosyan "Handbook of Nonlinear Optical Crystals": 345 (Springer, New York, 1999).

2. M. D. Ewbank, M. J. Rosker, "Frequency tuning a mid – infrared optical parametric oscillator by the electro-optic effect": J. Opt. Soc. Am. B14, #3, p. 663-668, (1997)
3. A.V. Smith, W.J.Alford, T.D.Raymond, M.S. Bowers, "Comparision of numerical model with measurend performance of a seeded nanosecond KTP optical parametric oscillator" J. Opt. Soc. Am. B12, 2253(1995)
4. L. R. Marshal, A. D. Hay, R. Burnham. Tech. Dig. Papers Adv.CLEO' 90 postdeadline paper CDPO 35 – 1(1990).
5. A.H. Harutjunyan, G.A. Papyan, S.S. Sargsyan, T.K. Sargsyan, "High Efficiency Intricately Optical Parametric Oscillator based on a Litium Niobate Cristal" ICONO'91,I, PWH12, 163-167, Leningrad,1991.
6. В.Л. Наумов, А.М. Онищенко, А.С. Подставкин, А.В.Шестаков «Внерезонаторная параметрическая генерация света на $\lambda = 1,5$ и 2мкм с накачкой излучением лазеров на АИГ: Nd^{3+} », Квант. Электрон., 32, №3(2002) 225 – 228.
7. Л. И.Водчиц, Дашкевич, Н.С. Казак, В.К. Павленко, В.И. Покрышкин, И.П. Петрович, В.В. Руховец, А.С. Красковский, В.А. Орлович. «Безопасный для глаз источник излучения на основе параметрического генератора света», Журнал прикладной спектроскопии, т. 73, №2(2006) 255 – 259.
8. M.K. Brown, M.S. Bowers, "High Energy near diffraction limited output from optical parametric oscillators using unstable resonators" Solid State Laser VI, R. scheps, ed. Proc. SPIE 2986, 113, 1997.
9. Ю.А. Ананьев, Оптические Резонаторы и лазерные пучки. - М. Наука, (1990) 211.
10. A.V. Smith, M.S. Bowers 'Image – rotating cavity designs for improved beam quality in nanosecond optical parametric oscillators" J. Opt. Soc. Am. B18, #5, p.701-706, 2001.
11. V.S. Ayrapetyan, G.M. Apresyan, K.A Sargsyan, T.K. Sargsyan "Tunable OPO for differential absorption LIDAR's" Abstract of Conference LAT 2002, LMI 72, p. 87-89, Moscow, 2002.
12. N. Hodgson and H. Weber Optical Resonator: Fundamentals, Advanced, Concepts and Application, London, Springer - Verlage (1997) 226.