

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2009

Т. 5

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ,
ТЕПЛОФИЗИКА, МИКРОТЕХНИКА

ч.2

Сборник материалов
V Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2009

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:

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

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

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

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

Доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой физики СГГА, Новосибирск
В.В. Чесноков

С 26 ГЕО-Сибирь-2009. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2: сб. матер. V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апреля 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 263 с.

ISBN 978-5-87693-328-7 (т. 5, ч. 2)

ISBN 978-5-87693-320-1

В сборнике опубликованы материалы V Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2009» направления «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника».

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

УДК 681.2:006:

ISBN 978-5-87693-328-7 (т. 5, ч. 2)
ISBN 978-5-87693-320-1

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Костюченко В.Я., Протасов Д.Ю. Параметры рекомбинационных центров в пленках р-hg1-xcdxte с $x = 0,22$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.....	8
Рубанович М.Г. Исследование тепловых режимов аттенюатора в тонкопленочном исполнении	14
Кошелев А.В., Миценко И.Д., Костына Ю.Г., Скипа Ю.В., Морозов А.А., Кочкарев Д.В. Скорость распространения фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере.....	18
Синякин А.К., Кошелев А.В., Матуско В.Н. Перспективы применения квантовых стандартов частоты в системах GPS-ГЛОНАСС	24
Сырнева А.С., Чесноков В.В. Проблемы спектроскопии излучения терагерцового диапазона	27
Голубцов С.Г., Орлов С.Г., Коняев С.И. О методах формирования периодических структур в полимерных волноводах для терагерцового диапазона.....	33
Барсуков Г.А. Проект малогабаритной магнетронной распылительной системы получения пленок металлов	38
Михайлова Д.С., Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Исследование оптических характеристик световолоконного спектрометра мономолекулярных слоев	42
Флора С.А., Чесноков В.В. Микромеханический преобразователь с электрополевым управлением	47
Корнеев В.С., Чесноков В.В., Чесноков Д.В. Особенности спектральных характеристик микромеханической управляемой дифракционной решетки	53
Шойдин С.А. К вопросу сжатия голографической информации	59
Батомункуев Ю.Ц. Теория аберраций объемного рентгеновского голограммного оптического элемента.....	62
Лузин А.Н. Приведение некоторых формул курса физики к виду, визуально анализируемому в окрестности точки перегиба	70
Шергунова Н.А., Бритвин А.В., Поллер Б.В. Оценка влияния растительности и рельефа местности на оптические системы мониторинга.....	74
Савелькаев С.В., Устюгов М.Б., Григорьева Г.В. Трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель полевого транзистора с барьером Шоттки	80
Плетнёв П.М., Симонова Г.В., Степанова С.А. Связь микроструктуры функциональной керамики с её физико-техническими свойствами....	86
Шувалов Г.В., Ясырова О.А. Разработка барботажного метода определения плотности жидких сред	91
Шувалов Г.В., Ясырова О.А. Экспериментальные исследования прибора для измерения плотности горюче-смазочных материалов, используемых в судовых энергетических установках.....	98

Ильин А.П., Шувалов Г.В., Клековкин И.В., Коршунов А.В., Толбанова Л.О., Мостовщиков А.В. Особенности физико-химических свойств нанопорошков металлов	104
Шувалов Г.В., Клековкин И.В., Черепанов В.Я., Ильин А.П., Коршунов А.В., Толбанова Л.О. Теоретическое и экспериментальное обоснование системы тестирования нанопорошков металлов	107
Шувалов Г.В., Клековкин И.В., Ильин А.П., Коршунов А.В., Толбанова Л.О. Реакционная способность порошков в наносостоянии и параметры химической активности нанопорошков металлов	112
Попов А.А. Способ учёта потребления тепла в многоквартирных домах	116
Северин М.Ю. Учет тепла в многоквартирных домах	121
Курбатова Н.А., Троценко Д.П., Черепанов В.Я. Измерительная установка для исследований температурных и тепловых полей полости модели АЧТ.....	125
Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Бодров М.В. Алгоритмы вычисления скорости потока водонефтяной смеси в щелевом канале	128
Назаров А.Д. Поточный влагомер сырой нефти	134
Титова Ю.В. Измерения в спорте	140
Куницына Е.П. Самооценка в организации.....	145
Коробейникова О.В. Сертификация услуг в сфере туризма	150
Хороших О.В. Коммерческий учет массы нефти.....	156
Теплых А.Н. Разработка и исследование способов определения метрологических характеристик эталонных динамометров цифровым нивелиром	161
Теплых А.Н. Разработка и исследование способов определения деформации различных образцов металлоконструкций цифровым нивелиром	167
Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Бодров М.В. Определение текущего значения вязкости нефтеводяной эмульсии.....	174
Симонова Г.В., Хлебникова Е.П., Симонов Д.П. Использование структурных признаков при цифровой обработке изображения.....	179
Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Повышение точности воспроизведения и передачи температурной шкалы на основе миниатюрных реперных точек.....	183
Могильницкий Б.С. Интерферометр Фабри-Перо как анализатор импульсного излучения	186
Могильницкий Б.С. Современные лазерные технологии для метрологических применений	192
Носков М.Ф., Кузнецов М.М. Метод выделения экстремумов полос путем нелинейной фоторегистрации интерференционной картины	198
Макаров И.Е. Новые результаты исследования алгоритмов синхронизации пространственно-разнесённых часов по навигационным сигналам .	201
Гривастов Д.А., Крылов В.С. Автоматизированное построение алгоритмов учета потерь в элементах электрической сети	206

Крылов В.С. Точность измерений времени в АИИС КУЭ.....	211
Толстиков А.С., Бояркеева О.В. Программный имитатор измерительной информации, поступающей с КА ГЛОНАСС и КА GPS	218
Чугреев И.Г., Жилкин А.М., Авхадеев В.Г., Былинушкин К.Н., Герасимов И.М., Савостин П.И., Власенко Е.П., Федоров К.С. Исследования и разработка лазерной системы для измерений поперечных смещений инженерных сооружений.....	225
Воробьёва Л.Б. Изучение выхода компонентов силикатных стёкол в водные растворы	231

CONTENTS

Kostyuchenko V.Ya., Protasov D.Yu. The parameters of recombination centers in films p-hg _{1-x} cdxte with x = 0,22 grown by molecular-beam epitaxy.....	8
Rubanovich M.G. Research of thin-film design attenuators thermal modes.....	14
Koshelev A.V., Micenko I. D., Kostyna Yu.G., Skipa Yu.V., Morozov A.A., Kochkarev D.V. Propagation velocity of femtosecond laser pulses in atmosphere	18
Sinyakin A.K., Koshelev A.V., Matusko V.N. Perspectives of the using of quantum frequency standards in systems GPS-GLONASS	24
Syrneva A.S., Chesnokov V.V. Problems spectroscopy of radiation terahertz of a range	27
Golubtsov S.G., Orlov S.G., Konyaev S.I. About of the methods fabrication periodic structures in polymeric waveguides for terahertz range	33
Barsukov G.A. Project of compact magnetron scattering system receiving metal films-structure	38
Mikhaylova D.S., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Research of optical characteristics световолоконного of the spectrometer of monomolecular layers	42
Flora S. A., Chesnokov V.V. Micromechanical tnsformer with electro-field control.....	47
Korneev V.S., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. The feature spectral characteristics of micromechanical controllable grating array	53
Shoydin S.A. The compression of holographic information	59
Batomunkuev Yu. Ts. Theory of aberrations of volume x-ray holographic optical element	62
Luzin A.N. Adduction of some physical formulas to type, visually analysed in point of bend.....	70
Shergunova N.A., Britvin A.V., Poller B.V. Estimation of the influence of vegetation and hypsography on the optical systems of monitoring.....	74
Savel'kayev S.V., Ustugov M.B., Grigor'eva G.V. Three-section drift-diffusional mathematical model of the field transistor with barrier Schottky	80
Pletnev P.M., Simonova G.V., Stepanova S.A. The connection microstructure of functional ceramics with it physical-technical properties.....	86
Shuvalov G.V., Jasyrova O.A. Development barbotazhnogo method of the determination to density of the fluid ambiances	91
Shuvalov G.V., Jasyrova O.A. Experimental study of the instrument for measurement of density combustible-lubrificant, used in ship energy installation	98
Il'in A.P., Shuvalov G.V., Klekovkin I.V., Korshunov A.V., Tolbanova L.O., Mostovnikov A.V. Features of physical and chemical properties nanopowder of metals	104
Shuvalov G.V., Klekovkin I.V., Cherepanov V.Ja., Il'in A.P., Korshunov A.V., Tolbanova L.O. Theoretical and experimental motivation of the system of the testing nanopowder metal	107

Shuvalov G.V., Klekovkin I.V., Il'in A.P., Korshunov A.V., Tolbanova L.O. Reactionary ability of powders in millimicro and parameters of chemical activity nanopowder of metals	112
Popov A.A. The way the account of consumption of heat in multiroom houses	116
Severin M.Yu. Heat calculation in apartment house	121
Kurbatova N.A., Trocenko D.P., Cherepanov V.Ya. Measuring installation for researches of temperature and thermal fields of a cavity of absolutely black body	125
Serov A.F., Mamonov V.N., Nazarov A.D., Bodrov M.V. Calculation algoritms for velocity of water-oil flow in a slot channel.....	128
Nazarov A.D. Flow humidity meter for crude oil	134
Titova Yu.V. Measurements in sports.....	140
Kunitsina E.P. Self-evaluation of organization	145
Korobeinikova O.V. Certification of services in tourism.....	150
Khoroshikh O.V. The commercial account of weight of oil	156
Teplykh A.N. Development and research of ways of definition of metrological characteristics of reference dynamometers by the digital level.....	161
Teplykh A.N. Development and research of ways of definition of deformation of various samples of metallic structures by the digital level	167
Serov A.F., Mamonov V.N., Nazarov A.D., Bodrov M.V. Determination of a current viscosity of the water-oil emulsion.....	174
Simonova G.V., Hlebnikova E.P., Simonov D.P. Use of structural attributes at digital processing of the image	179
Brodnikov A.F., Cherepanov V.Ya. Increase of accuracy of reproduction and transfer of a temperature scale on the basis of tiny constant of points	183
Mogilnitsky B.S. Fabry-Perot interferometer as the analyser pulse illumination	186
Mogilnitsky B.S. Modern laser methods for metrological applications	192
Noskov M.F., Kuznetsov M.M. Method of selection of extremums of bars by nonlinear fotoregistracii of interference picture	198
Makarov I.E. New results of the study algorithm to synchronizing space- removed clocks on navigational signal	201
Grivastov D.A., Krulov V.S. Automation designing algorithm for calculation electric energy losses in electric network elements	206
Krulov V.S. AIIS KUE time-keeping accuracy.....	211
Tolstikov A.S., Boyarkeeva O.V. The program simulator of the measuring information, acting from SV GLONASS and SV GPS	218
Thugreev I.G., Gilkin A.M., Avchadeev V.G., Bulinuchcin K.S., Gerasimov I.M., Savostin P.I., Vlasenco E.P., Fedorov K.S. Research, development and preparation for realization of a new high-precision laser measurement system.....	225
Vorobieva L.B. A study of going out of the components of silica glasses into the water solutions	231

УДК 535.213

В.Я. Костюченко

СГГА, Новосибирск

Д.Ю. Протасов

ИФП СО РАН, Новосибирск

ПАРАМЕТРЫ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ В ПЛЕНКАХ P-HG1-XCDXTE С $x = 0,22$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

V.Ya. Kostyuchenko

SSGA, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

D.Yu. Protasov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pr. Lavrentieva, 13, 630090, Novosibirsk, Russia

THE PARAMETERS OF RECOMBINATION CENTERS IN FILMS P-HG1-XCDXTE WITH $x = 0,22$ GROWN BY MOLECULAR-BEAM EPITAXY

A values of E_t , N_t , C_n and C_p in vacancy-doped MBE MCT films with various density of major holes are determined at 77 K in this work. The parameters of recombination centers were founded via measurements of steady-state photoconductivity in magnetic filed for Faradey's geometry. The capture rates and ionization energy did not depend from density of major holes and their values are equal to $C_n=2.3 \times 10^{-12}$ m³/s, $C_p=8.2 \times 10^{-16}$ m³/s, $E_t=53$ meV, but the centers density in samples is various. Correspondence of received values with published data and a nature of recombination centers are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Время жизни носителей заряда в тройном сплаве $Cd_xHg_{1-x}Te$ (кадмий-ртуть-теллур, КРТ), где x – мольное содержание Cd, является важным параметром, определяющим работу фотоприёмников на основе этого материала [1]. При рабочих температурах фотоприёмников ($T \sim 77$ K) время жизни в КРТ р-типа ограничено механизмом рекомбинации Шокли-Рида и определяется такими параметрами рекомбинационного центра, как энергия залегания E_t и концентрация N_t , коэффициенты захвата электронов C_n и дырок C_p .

Для определения параметров рекомбинационных центров обычно используется метод DLTS. Однако в случае КРТ с $x \sim 0.22$ применение этого метода затруднено следующими причинами: во-первых, малая ширина запрещённой зоны требует использования гелиевых температур; во-вторых, трудно изготовить на этом материале р-п переход, который не имел бы туннельного пробоя при низких температурах. Кроме того, значения параметров рекомбинационных центров сильно зависит от технологии роста образцов.

В работе определены значения E_t , N_t , C_n и C_p в плёнках $Hg_{1-x}Cd_xTe$ p-типа с $x = 0.22$ при 77 K, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs, с разной концентрацией основных носителей заряда, обусловленных вакансиями ртути. Параметры рекомбинационных центров находились по измерениям фотопроводимости (ФП) в магнитном поле для геометрии Фарадея [2], что позволяло разделить вклады в ФП неравновесных электронов $U_{ph}^n(B)$ и дырок U_{ph}^p , найти как подвижность неосновных электронов μ_n , так и отношение их времен жизни τ_p/τ_n .

Образцы и методы исследования

Исследовались три образца, изготовленные из одной пленки толщиной 10 мкм, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из GaAs ориентации (013). После роста плёнка имела n-тип проводимости. Для получения образцов p-типа разделенную на части плёнку отжигали в нейтральной атмосфере гелия или азота при $T = 200$ °C. В зависимости от продолжительности отжига, концентрация основных дырок, обусловленных вакансиями ртути, изменялась в диапазоне от $4 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ до $3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Для измерения ФП в геометрии Фарадея ($\vec{k} \parallel \vec{B}$ и $\vec{k} \perp \vec{E}$, где $\vec{k}$ – волновой вектор излучения, $\vec{B}$ – индукция магнитного поля, $\vec{E}$ – напряженность тянущего электрического поля) вырезались образцы в виде прямоугольных полосок длиной 10 мм и шириной 1,5 мм. Образцы укрепляли на сапфировой подложке, и к ним делали индиевые контакты.

Концентрация p_0 и подвижность μ_p основных носителей заряда (дырок) определялась из измерения эффекта Холла и магнитосопротивления методом «спектра подвижности» [3].

Экспериментальная установка для измерения ФП описана в работе [2].

Метод определения параметров рекомбинационных центров

На рис. 1 представлена магнитополевая зависимость сигнала ФП $\Delta U_{ph}(B)$, которая описывается выражением:

$$\Delta U_{ph}(B) = \frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta n}{e} \cdot \frac{\mu_n}{p_0^2 \mu_p^2 (1 + \mu_n^2 B^2)} + \frac{c \cdot I}{w \cdot d} \cdot \frac{\Delta n}{e} \cdot \frac{K}{p_0^2 \mu_p} = \frac{\Delta U_{ph}^n(0)}{1 + \mu_n^2 B^2} + \Delta U_{ph}^p, \quad (1)$$

где c – длина, w – ширина и d – толщина образца, I – ток через образец, e – заряд электрона, Δn – концентрация неравновесных электронов, μ_n – подвижность неосновных электронов, $K = \tau_p/\tau_n + 1$, $\Delta U_{ph}^n(B)$ – зависящая от магнитного поля электронная составляющая, ΔU_{ph}^p – составляющая, обусловленная неравновесными дырками, величина которой не изменяется в магнитном поле. Несмотря на достаточно низкую подвижность ($\mu_n/\mu_p = 100$), тяжелые дырки дают заметный вклад в сигнал ФП, так как при наличии большого числа рекомбинационных центров концентрация неравновесных дырок превышает концентрацию неравновесных электронов: $\Delta p > \Delta n$.

По измеренной магнитолевой зависимости $\Delta U_{ph}^n(B)$ находится подвижность неосновных электронов как:

$$\mu_n = \frac{1}{B_{II}}, \quad (2)$$

где B_{II} (Тл) – величина магнитной индукции, соответствующей уровню сигнала $\Delta U_{ph}^n(0)/2$. По величине дырочной и электронной составляющей ФП определяется отношение времени жизни электронов и дырок:

$$\frac{\tau_p}{\tau_n} = \frac{\mu_n}{\mu_p} \frac{U_{ph}^{sat}}{U_{ph}^n(0)}. \quad (3)$$

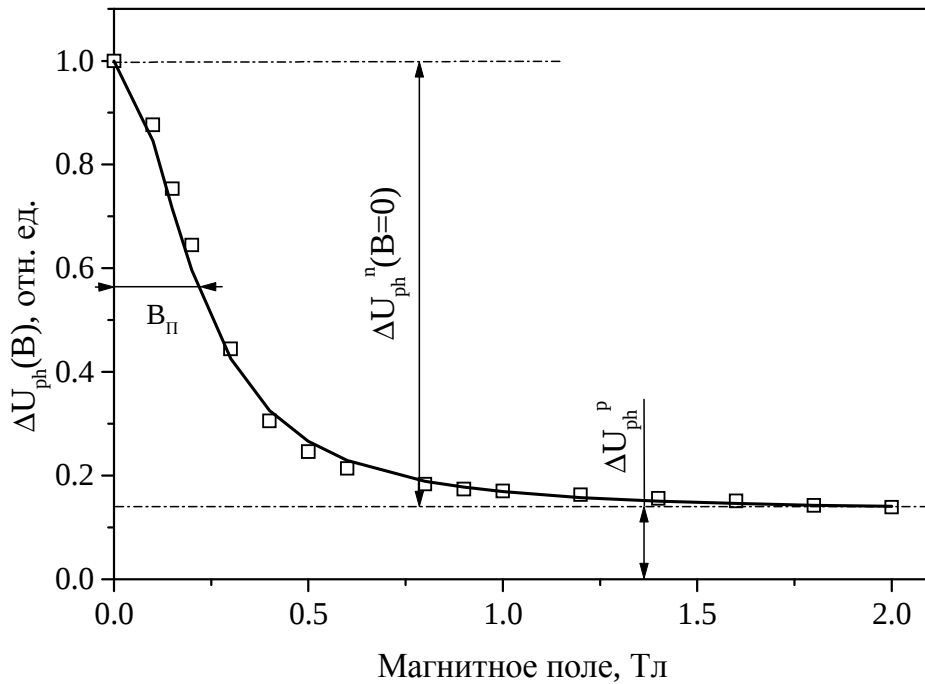


Рис. 1. Зависимость ФП в геометрии Фарадея от магнитного поля. Символы – экспериментальные данные, линия – расчет

Далее экспериментальные значения τ_p/τ_n интерпретировались аналитическими выражениями [4], описывающими значения времени жизни электронов и дырок в р-КРТ с учетом таких механизмов рекомбинации, как радиационного, Оже-7 и Шокли-Рида. Параметры E_t , C_n и C_p использовались в качестве подгоночных, а для концентрации рекомбинационных центров было предложено выражение:

$$N_t = \frac{p_0 + (C_n/C_p)N_1}{(C_n/C_p)} \left(\frac{\tau_p}{\tau_n} + 1 \right), \quad (4)$$

где N_1 – эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости, приведенная к уровню рекомбинационного центра.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны экспериментальные магнитополевые зависимости ФП в геометрии Фарадея для трех исследованных образцов. Уровень сигнала ФП, показанный на рис. 2, увеличен для образцов 2 и 3 в 2 и 8 раз, соответственно. Сигнал ФП для трех образцов был измерен при одних и тех же условиях (одинакова интенсивность света, через образцы пропускался одинаковый ток, отношение длины к ширине образцов $c/w \approx 3$). Поэтому, согласно выражению (1), различие в поведении магнитополевых зависимостей обусловлено разными значениями времени жизни и подвижности неосновных и основных носителей заряда в образцах, а также их различной темновой проводимостью $\sigma_0 = e\mu_0\mu_p$. Определенные по измерениям эффекта Холла и магнитосопротивления параметры основных дырок, а также подвижность неосновных электронов и отношение времен жизни дырок и электронов приведены в таблице. В результате подгонки теоретических выражений [2] под экспериментальные данные получено, что энергия залегания центра E_t , коэффициенты захвата на этот центр электронов C_n и дырок C_p не зависят от концентрации основных носителей и равны следующим значениям: $E_t = 53$ мэВ, $C_n = 2.3 \times 10^{-12}$ м³/с, $C_p = 1 \times 10^{-20}$ м³/с. Энергия E_t лежит близко к середине запрещенной зоны ($E_t/E_g = 48$ %), что согласуется с опубликованными данными [5,6]. Отношение полученных коэффициентов захвата $C_n/C_p > 10^3$, что более чем на порядок превышает значения, приведенные в работах [5,6] для объёмных образцов и эпитаксиальных плёнок, выращенных методом эпитаксии из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений. Как известно из литературы [7], для образцов р-КРТ значения времени жизни (и, следовательно, параметры рекомбинационных центров) сильно зависят от способа получения образцов и их термической обработки.

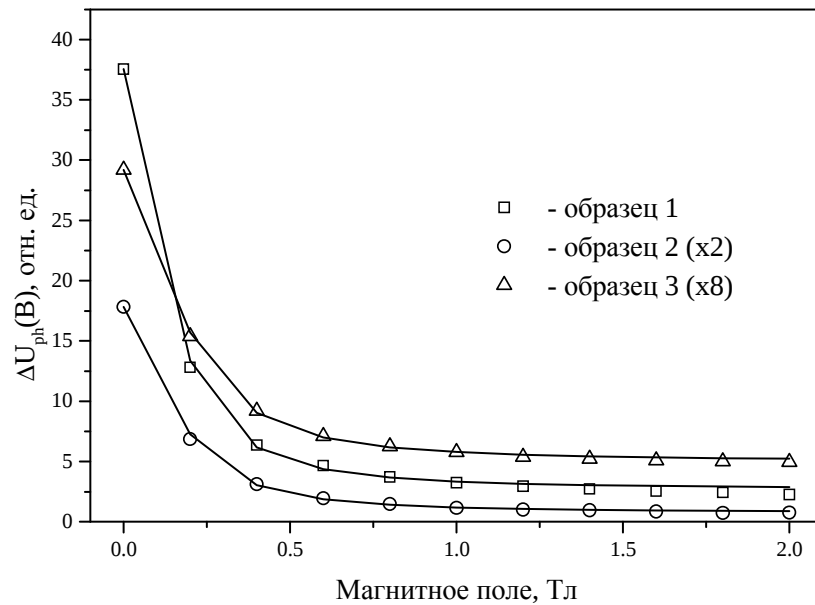


Рис. 2. ФП в геометрии Фарадея для образцов 1,2 и 3.
Символы – экспериментальные данные, линия – расчет

Таблица. Электрофизические параметры исследованных образцов

№	$p_0, \text{м}^{-3}$	$\mu_p, \text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\mu_n, \text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$\left(\frac{\tau_p}{\tau_n}\right)_{\text{exp}}$	$\left(\frac{\tau_p}{\tau_n}\right)_{\text{theor}}$	$\tau_n, \text{нс}$	$\tau_p, \text{нс}$	$N_t, \text{м}^{-3}$
1	$4,7 \times 10^{21}$	0,036	7,5	15,3	14,0	12	166	$4,0 \times 10^{19}$
2	$8,3 \times 10^{21}$	0,045	6,4	5,1	6,1	17	105	$2,5 \times 10^{19}$
3	$2,5 \times 10^{22}$	0,026	5,6	43,3	40	0.8	32	$5,3 \times 10^{20}$

Так как считается [7], что в вакансионно-легированных образцах КРТ рекомбинационные центры связаны с вакансиями ртути, то концентрация N_t в таких образцах должна увеличиваться с ростом концентрации основных носителей заряда. Однако пропорциональная зависимость наблюдается лишь при концентрациях, больших $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, при меньших концентрациях четкой зависимости N_t от p_0 нет [5,6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирован новый метод определения рекомбинационных параметров плёнок р-КРТ. Метод основан на измерении магнитолевой зависимости ФП в геометрии Фарадея. Показано, что в плёнках МЛЭ р-КРТ полученные значения энергии залегания рекомбинационного центра E_t близки к опубликованным значениям, коэффициенты захвата электронов C_n и дырок C_p превышают опубликованные на порядок, а концентрация центров N_t не зависит от p_0 в области значений $(4 \div 8) \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Метод может применяться в качестве стандартного контроля при выборе материала для изготовления фотоприёмников с предельными характеристиками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рогальский, А. Инфракрасные детекторы / А. Рогальский; пер. с англ., – Новосиби.: Наука, 2003. – 636 с.
2. Подвижность неосновных носителей заряда в пленках p-HgCdTe / В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, В.Н. Овсяк, Д.Ю. Протасов // ФТП. – 2004. – Т. 38, №. 5. - С. 532 – 537.
3. Beck, W.A. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent Hall technique// W.A. Beck, J.R. Anderson // J. Appl. Phys. – 1987. - V. 62. - P. 541 - 554.
4. Lopes, V.C. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride / V.C. Lopes, A.S. Syllaios, M.C. Chen // Sem. Sci. Technol. – 1993. - V. 8. - P. 824-841.
5. Fastow, R. Shockley-Read recombination and trapping in p-type HgCdTe / R. Fastow, D. Goren, Y. Nemirovsky // J. Appl. Phys. – 1990. - V. 68. - P. 3405 – 3412.
6. Barton, S.C. Determination of Shockley-Read trap parameters in n- and p-type epitaxial $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / S.C. Barton, P. Capper, C.J. Jones // Sem. Sci. Technol. – 1996. - V. 11. - P. 1163-1167.
7. Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds / EMIS Datareviews Series., edited by P. Capper. – IEE, London. – 1994. - N. 10.

© В.Я. Костюченко, Д.Ю. Протасов, 2009

УДК 642.354.12
М.Г. Рубанович
СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АТТЕНЮАТОРА В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ИСПОЛНЕНИИ

M.G. Rubanovich
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), Novosibirsk

RESEARCH OF THIN-FILM DESIGN ATTENUATORS THERMAL MODES

In the submitted report the problem of experimental definition of temperature field distribution for a case of one, two and three resistors located on a copper with sizes of 180x110 mm was solved. The size of film resistors is 20x20x4 mm. Film resistors differently placed in relation to each other.

Использование плёночных резисторов для производства мощных широкополосных аттенюаторов требует решения не только электрической, но и тепловой задачи, так как при максимальной входной мощности имеет место максимальный нагрев резистора, который выполнен напылением резистивной плёнки на подложке из бериллиевой керамики. Если все подложки с напылёнными на них резисторами свести максимально близко, реактивные паразитные параметры, ограничивающие широкополосность аттенюатора минимальны, но при этом появляются точки на резистивной плёнке с явно выраженным перегревом. Это ограничивает максимальную входную мощность. Чтобы исключить появление таких точек необходимо резисторы разнести между собой на определённое расстояние. В докладе представлены результаты экспериментального исследования температурного нагрева на резистивной плёнке резисторов. Исследовалась зависимость температурного нагрева в зависимости от расстояния между резисторами при максимальной рассеиваемой на них мощности. Сделаны выводы и даны рекомендации.

Для реализации всех температурных режимов была создана экспериментальная установка. Её внешний вид приведен на рис. 1, а конструктивное исполнение показано на рис. 2.

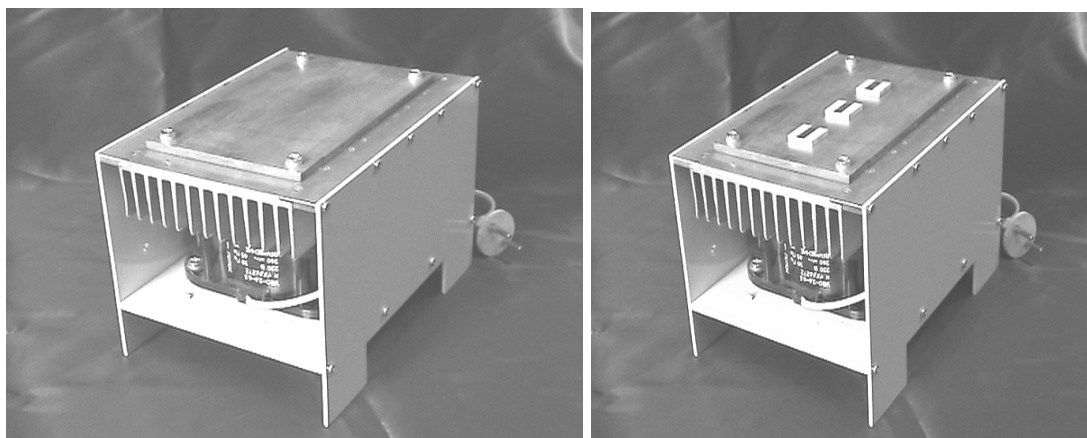


Рис. 1 Рис. 2

На рис. 2 видим: 1 – тонкоплёночные резисторы на подложке из бериллиевой керамики размером $(20 \times 20 \times 4)$ мм; основание, медь, размер $(180 \times 110 \times 6)$ мм; 3 – боковины; 4 – радиатор с продольными ребрами, прокат алюминиевый ПС 885 – 1195 -122 размером (220×122) мм, высота рёбер – 32 мм, количество рёбер – 13; 5 – вентилятор обдува 1.25ЭВ – 2,8 – 6 – 327ОУ4, производительность – $280 \text{ м}^3/\text{час}$, установлен на горизонтальной панели. Медное основание с припаянными к нему тонкоплёночными резисторами притягивается к радиатору четырьмя винтами $M5 \times 20$ мм с прослойкой из теплопроводящей пасты КПТ – 8 толщиной примерно 0,5 мм.

Главной задачей перед началом экспериментов была калибровка температурного режима основания, т. е. определение топологии неравномерного температурного поля сноса тепловой энергии с медной пластины основания. Причинами неравномерного сноса тепловой энергии могут быть центрально – симметричное расположение вентилятора обдува и малое расстояние от плоскости ветроколеса вентилятора до вершин рёбер радиатора (15 мм). Эти два фактора вызывают неравномерность воздушного потока при протекании его вдоль рёбер радиатора, т. е. его турбулентность, что может вызвать появление «мёртвых зон», где движение воздуха в продольном направлении вдоль рёбер радиатора отсутствовало бы или было бы незначительным. Это может привести к отсутствию сноса тепловой энергии с части рёбер радиатора и локальным перегревам медного основания и, соответственно, резистивных элементов.

Для калибровки температурного режима основания был выбран метод локального точечного разогрева участка основания резистивным элементом малых размеров при постоянном стабилизированном значении подводимой электрической мощности и непрерывным контролем при этом его температуры, как не требующего сложного оборудования и имеющего возможность повторить измерение в любой точке основания в любой момент времени. Для увеличения чувствительности метода площадь поверхности резистивного элемента, имеющая тепловой контакт с основанием, должна быть минимальной, а тепловая мощность, отдаваемая им в основание, должна быть максимально допустимой для данного

резистивного элемента. Это необходимо для получения максимально возможных для данного резистивного элемента температур его поверхности с целью четкой фиксации в процессе измерения их различия от точки к точке на поверхности основания измерительным устройством с достаточно малой разрешающей способностью (в пределах $1\text{ }^{\circ}\text{C}$) и уменьшения влияния на результат измерений внешних возмущающих факторов (конвективные и сторонние горизонтальные воздушные потоки и т. п.). В качестве резистивного элемента был выбран тонкоплёночный резистивный элемент на подложке из бериллиевой керамики размером $(7,5 \times 4,5 \times 2)$ мм, имеющий максимально допустимую мощность рассеивания 50 Вт. Результаты эксперимента показали, что при наличии медной пластины, выступающей буфером между радиатором с вентилятором и резисторами температура на резисторе изменяется в пределах $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. То есть можно считать, что температура на медной пластине распределена равномерно.

При реализации фиксированных аттенюаторов на основе плёночных резисторов, резисторы располагаются на медной поверхности. Размер плёночных резисторов $(20 \times 20 \times 4)$ мм. Если все резисторы, реализующие фиксированный аттенюатор расположены слишком близко друг от друга, то возникает перегрев на резистивной плёнке плёночного резистора. Снижается допустимая мощность рассеяния на таком резисторе. Слишком разнесённые резисторы по медной поверхности обеспечивают минимальную температуру на каждом плёночном резисторе, но габариты медной пластины растут. Таким образом задача имеет оптимум габарита поверхности медного основания при котором перегрева на каждом резисторе ещё нет и плёночные резисторы рассеивают заданную мощность.

В данной работе решалась задача определения температурного поля для случая одного, двух и трёх резисторов расположенных на медной пластине размером $(180 \times 110 \times 6)$ мм. Медная пластина установлена на алюминиевом радиаторе рёбрами вниз. Рёбра радиатора обдуваются с низу вентилятором. В случае одного резистора ставилась задача определения максимальной мощности при которой нагрев в самой горячей точке не превосходит допустимых 120°C . Максимальная мощность варьировалась от $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от места расположения плёночного резистора. Такой разброс можно объяснить не совсем равномерным обдувом вентилятором радиатора со стороны рёбер. Второй эксперимент состоял из нагрева двух резисторов, расположенных вдоль широкой стенки медной пластины на расстоянии от 60 мм между ними до стыковки резисторов боковыми стенками. Температура в самой горячей точке менялась от $88\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $123\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от расстояния между резисторами. Можно отметить, что при минимальном расстоянии между резисторами самая горячая точка на пределе допустимой температуры. В третьем эксперименте резисторы установлены по одной линии вдоль длинной стенки медной пластины на расстоянии 20 мм друг от друга. Мощность крайнего правого резистора менялась от 0 Вт до 150 Вт. На двух других резисторах мощность была установлена фиксировано 150 Вт. Самая горячая температура была на среднем резисторе и менялась от 95

°C при 0 Вт на крайнем правом резисторе до 117 °C при 150 Вт на нём. То есть максимально допустимая выделяемая мощность на трёх резисторах расположенных через 20 мм друг от друга не более чем по 150 Вт на каждом. В четвёртом эксперименте резисторы расположены треугольником. Два резистора расположенные вдоль длинной стенки медной пластины на расстоянии 20 мм между собой и нагревались до 200 Вт каждый. Третий резистор располагался между ними ниже по уровню на 20 мм, 40 мм и 60 мм ниже. При 20 мм перегрев наступал при 50 Вт на третьем резисторе. Температура в точке максимального нагрева при этом равнялась 127 °C. При 40 мм перегрев происходил при 100 Вт на третьем резисторе. При 60 мм перегрев происходил при 150 Вт. Если мощность на всех трёх резисторах по 150 Вт максимальный нагрев не превышает предельно допустимой температуры 120 °C при расположении третьего резистора ниже первых двух на 40 мм.

Выводы. В использованной установке один резистор может рассеять мощность не менее 290 Вт, два резистора можно устанавливать стык в стык и выделять мощность по 200 Вт на каждом, при этом температура в самой горячей точке не превосходит максимально допустимого значения. При использовании на одном медном основании трёх резисторов максимальная выделяемая мощность на каждом резисторе должна быть не более 150 Вт при расстоянии между резисторами не менее 20 мм.

© М.Г. Рубанович, 2009

УДК 528.2/.3

*А.В. Кошелев, И.Д. Миценко, Ю.Г. Костына,
Ю.В. Скипа, А.А. Морозов, Д.В. Кочкарев*
СГГА, Новосибирск

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ

*A.V. Koshelev, I. D. Micenko, Yu.G. Kostyna,
Yu.V. Skipa, A.A. Morozov, D.V. Kochkarev*
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

PROPAGATION VELOCITY OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN ATMOSPHERE

The author offers algorithms for calculating the velocity of single wide-band femtosecond laser pulses in dispersion atmosphere, taking into account the group velocity of their spectrum components. The presented formulas allow to calculate the transfer velocity as concerns energy centre of femtosecond pulses with regard to dispersion and selective Earth atmosphere absorption.

Использование фемтосекундных импульсов в лазерных дальномерах, построенных по классической схеме с применением высокоточных измерителей временных интервалов, дает возможность обеспечить высокую точность измерений с большей дальностью действия, чем фазовые светодальномеры. За рубежом и в России ведутся работы по использованию сверхкоротких лазерных импульсов пикосекундного и фемтосекундного диапазона для высокоточного измерения расстояний и определения среднеинтегрального показателя преломления дисперсионными методами [1–3].

В существующих методах расчета скорости распространения сверхкоротких лазерных импульсов в атмосфере для огибающей импульсов используется понятие групповой скорости, а для несущего излучения используется понятие фазовой скорости. В работе [4] сделан вывод, что фазовой скорости в диспергирующих средах не существует. В настоящей работе предлагаются новые алгоритмы, позволяющие определять скорость распространения энергетических центров фемтосекундных импульсов по групповым скоростям их спектральных составляющих, без расчета групповой скорости огибающей, что позволяет автоматически определять как изменение длительности импульсов, так и искажение их формы.

Известно, что при распространении сверхкоротких импульсов в диспергирующей атмосфере происходит расплывание их длительности, а в средах с селективным поглощением понятие групповой скорости с сохранением

формы излучаемого импульса теряет смысл, так как может происходить существенное искажение формы излучаемых импульсов [5]. Эти факторы могут служить источниками дополнительных погрешностей дальномерных измерений. В данной работе предложены алгоритмы расчета скорости распространения энергетического центра фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере с учетом изменения их длительности и произвольным искажения формы.

Использование групповой скорости обусловлено тем, что у реального излучения лазера амплитуда, фаза и частота меняются по случайному закону, обусловленному физической природой света. В результате излучение даже высокостабильного лазера можно представить узкополосным (или квазимонохроматическим) случайным процессом

$$\dot{L}(t) = \dot{L}_0(t) \cos[\omega(t) \cdot t + \phi_0(t)], \quad (1)$$

где $E_0(t)$, $\omega(t)$, $\phi_0(t)$ – случайные функции изменения амплитуды, частоты и начальной фазы соответственно [5]. При этом будем считать, что мгновенные изменения частоты $\omega(t)$ ограничены очень узкой полосой частот $\Delta\omega$.

Следует отметить, что изменения амплитуды $U(t)$, частоты $\omega(t)$ и фазы $\phi(t)$ происходят медленно в масштабе периода колебаний световой волны, но они происходят чрезвычайно быстро в масштабе времени требуемого для регистрации света фотоприемником дальномера [6]. Известно, что фотоприемники реагируют на световой поток Φ , который пропорционален среднему значению квадрата электрического поля световой волны

$$\Phi \sim \langle E^2(t) \rangle.$$

Здесь скобки $\langle \rangle$ означают, усреднение по времени t , которое даже для сверхскоростных фотоприемников может достигать тысяч и более периодов световой волны. Поэтому для учета влияния атмосферы на распространение фемтосекундного импульса в случае стационарности оптических полей и без потери общности, мы можем воспользоваться усредненными значениями флуктуаций амплитуды $\langle E_0(t) \rangle = E_0$, частоты $\langle \omega(t) \rangle = \omega_0$ и начальной фазы $\langle \phi_0(t) \rangle = 0$ [6]. Тогда для упрощения расчетов несущее электрическое поле световой волны $E(t)$ представим уравнением

$$E(t) = E_0 \cos \omega_0 \cdot t. \quad (2)$$

Пусть модуляция несущего излучения (2) осуществляется импульсом гауссовой формы, имеющим вид

$$A(t) = \exp[-\pi \cdot t^2], \quad (3)$$

где t – текущее время, соответствующее длительности излучения ФС импульса. Другими словами, упрощенно работу фемтосекундного лазера одиночных импульсов можно представить, как открытие фемтосекундного затвора коэффициент пропускания которого изменяется в соответствии уравнением (3) для излучения лазера генерирующего оптическое излучение, выраженное уравнением (2). В этом случае уравнение электрического поля

фемтосекундного лазерного импульса $E_{\phi u}(t)$ рис.1, можно записать зависимостью

$$\dot{L}_{\delta c}(t) = \dot{L}(t)A(t) = \dot{L}_0 \cos(\omega_0 \cdot t) \cdot \exp[-\pi \cdot t^2].$$

Спектральный анализ электрического поля фемтосекундного лазерного импульса $E_{\phi u}(t)$ выполним с помощью преобразования Фурье. Для этих целей воспользуемся комплексной спектральной плотностью $S(\omega)$ волны источника излучения $E_{\phi II}(t)$, полученной с использованием преобразования Фурье.

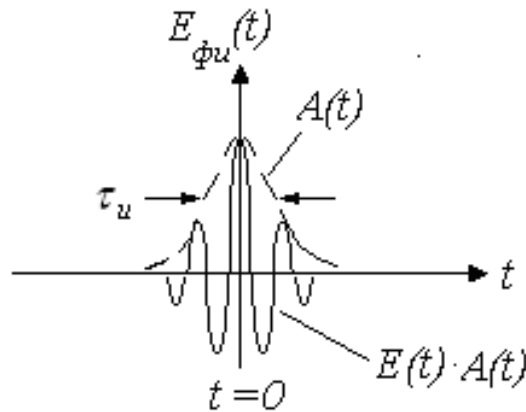


Рис. 1. Временная диаграмма электрического поля фемтосекундного импульса

Поскольку излучение фемтосекундного лазера будет входным в диспергирующую атмосферу, то его спектральную плотность обозначим

$$S_{ex}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\phi u}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (4)$$

где $j = \sqrt{-1}$. Спектральная плотность фемтосекундного импульса $S_{ex}(\omega)$ рис. 2 с длительностью импульса τ_u характеризует зависимость амплитуд спектральных составляющих импульса от частоты ω и занимает диапазон частот

$$2\Delta\omega_{\phi u} \approx \frac{4\pi}{\tau_u},$$

где $\Delta\omega_{\phi u}$ полоса частот огибающей фемтосекундного импульса. Отметим, что ширина спектра $\Delta\omega_{\phi u}$ примерно 10^{12} раз больше, чем этот же параметр для несущего излучения $\Delta\omega$.

Здесь важно подчеркнуть, что, используя уравнение (2) для определения $S_{ex}(\omega)$ в уравнении (4) мы получаем непрерывный спектр фемтосекундного импульса пренебрежимо мало отличающийся от того, который мог быть получен с использованием формулы (1). Основной смысл формулы (1) в данной работе заключается в обосновании использования групповой скорости для спектральных составляющих в $S_{ex}(\omega)$.

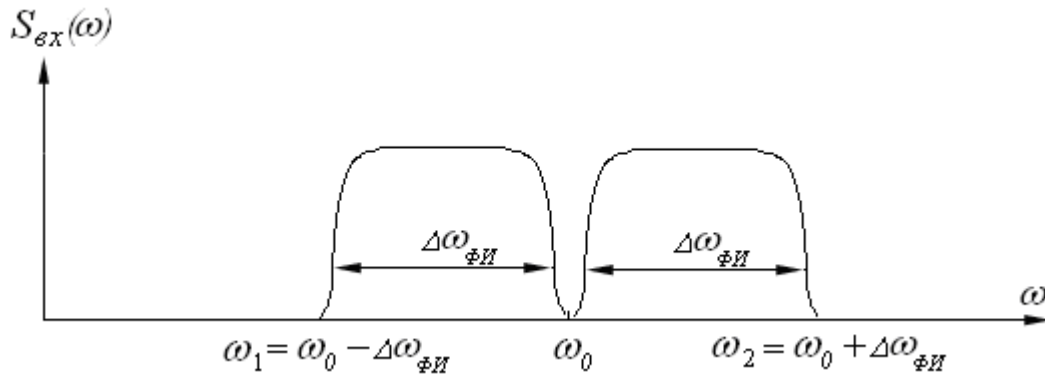


Рис. 2. Спектральная плотность электрического поля излучения фемтосекундного лазера для положительных частот

Расчет влияния диспергирующей атмосферы на распространения фемтосекундного импульса выполним в два этапа. На первом этапе, рассчитаем дисперсионное расплывание сверхкоротких импульсов, что приводит к увеличению их длительности. На втором этапе, выполним учет селективного неравномерного поглощения спектральных составляющих сверхширокополосного излучения фемтосекундного импульса, приводящего к изменению формы, а следовательно, и скорости распространения энергетического центра. Другими словами на втором этапе будет выполнен учет искажения энергетического спектра излучаемых импульсов. Важно отметить, что каждая спектральная составляющая ω в полосе частот $2\Delta\omega_{\phi H} = \omega_2 - \omega_1$, где $\omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega_{\phi H}$, а $\omega_2 = \omega_0 + \Delta\omega_{\phi H}$ распространяется в ДС с групповой скоростью $v_g(\omega)$, а не с фазовой, как это излагается в существующей литературе.

Для расчета увеличения длительности фемтосекундного импульса воспользуемся методами теории линейных систем [5]. Пусть входной сигнал, имеющий комплексную спектральную плотность $S_{ex}(\omega)$ в соответствии с уравнением (4), распространяется вдоль измеряемой линии в диспергирующей среде с групповым показателем преломления $n_{gr}(\omega)$ рис. 3. При этом учтем, что в дальномерных измерениях определяется время распространения импульса до отражателя и обратно, что соответствует прохождению им удвоенного измеряемого расстояния $2D$.

Спектральная плотность излучения на выходе диспергирующей среды определяется уравнением

$$S_{вых}(\omega) = S_{ex}(\omega) \cdot \chi(\omega),$$

где $\chi(\omega) = \exp[-j \cdot k_{gr}(\omega) \cdot 2D]$ – частотный коэффициент передачи диспергирующей среды, $k_{gr}(\omega) = \frac{\omega}{c} n_{gr}(\omega)$ – волновое число спектральной составляющей с частотой ω . Здесь

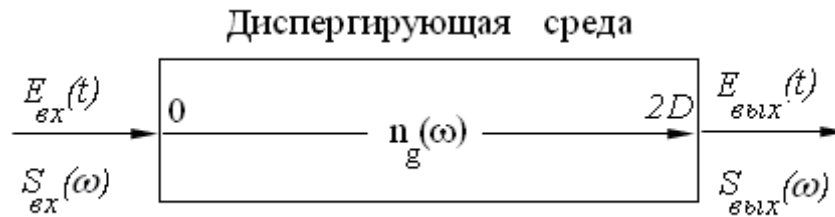


Рис. 3. Входной и выходной сигналы и их спектры, распространяющиеся в диспергирующей среде

Тогда электрическое поле импульса на выходе диспергирующей среды можно определить по формуле

$$E_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{ex}}(\omega) \cdot \chi(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{вых}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Зная временную зависимость выходного излучения, можно определить увеличение длительности фемтосекундного импульса, приводящей к изменению крутизны фронта фемтосекундного импульса, ухудшающего точность фиксации измеряемого интервала времени.

Поскольку излучение фемтосекундного импульса имеет очень широкий спектр, то в процессе распространения излучения происходит селективное поглощение амплитуд спектра с коэффициентом пропускания атмосферы $\tau_{\Pi}(\omega)$ в зависимости от частоты излучения ω , что приводит к изменению энергетического спектра и формы импульса. В этом случае, скорость распространения энергетического центра $v_{\text{эц}}$ фемтосекундного импульса, можно определить по формуле

$$v_{\text{эц}} = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \tau_{\Pi}(\omega) \cdot S_{\text{вых}}(\omega) \cdot v_{gr}(\omega) d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \tau_{\Pi}(\omega) \cdot S_{\text{вых}}(\omega) d\omega}.$$

В настоящей работе рассмотрено лишь воздействие атмосферного канала на потенциальные точностные характеристики фемтосекундных импульсов для лазерной дальнометрии. С помощью предлагаемого подхода, аналогичным образом, могут быть учтены задержки и искажения сигнала в передающих и приемных оптических системах дальнометра, а также оценен вклад в искажения импульса из-за селективной спектральной чувствительности фотоприемника [6] в процессе преобразования светового сигнала в электрический.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байконур-INFO, 2007. Русский свет в космосе. http://www.baikonur-info.ru/proekt_5.htm.

2. Патент RU 2228517. Фемтосекундный лазерный дальномер, G 01 C 3/08 от 10.01.2000.

3. Голубев, А.Н. Разработка новых методов высокоточных геодезических линейных измерений в оптическом диапазоне спектра. Автореферат на соискание уч. ст. д.т.н. – М., 1987.– 39 с.

4. Кошелев А.В., Карпик А.П., Ушаков О.К., Кошелев В.А., Синякин А.К., Савченко М.П. Определение показателя преломления оптических волн при выполнении геодезических измерений. См. статью в настоящем сборнике.

5. Бутиков, Е.И. Оптика / Е.И. Бутиков. – С-Петербург, 2003.– 480 с.

*©А.В. Кошелев, И.Д. Миценко, Ю.Г. Костына,
Ю.В. Скипа, А.А. Морозов, Д.В. Кочкарев, 2009*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМАХ GPS-ГЛОНАСС

A.K. Sinyakin, A.V. Koshelev, V.N. Matusko

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

PERSPECTIVES OF THE USING OF QUANTUM FREQUENCY STANDARDS IN SYSTEMS GPS-GLONASS

The analysis of the basic technical characteristics of quantum frequency standards in satellite navigating systems GPS and GLONASS are executed.

В современных спутниковых радионавигационных системах (GPS-ГЛОНАСС) космические аппараты представляют собой автономные радиотехнические станции. Источниками формирования сигналов в этих станциях являются квантовые стандарты частоты (КСЧ). Эти генераторы обладают высокой стабильностью частот, случайные относительные погрешности оцениваются величинами $10^{-13} - 10^{-14}$. Каждый спутник содержит преимущественно цезиевые квантовые датчики частот, в наземных станциях используются водородные стандарты частоты.

Цезиевый стандарт частоты представляет собой атомно-лучевую трубку, функциональное устройство которой представлено на рис. 1 [1].

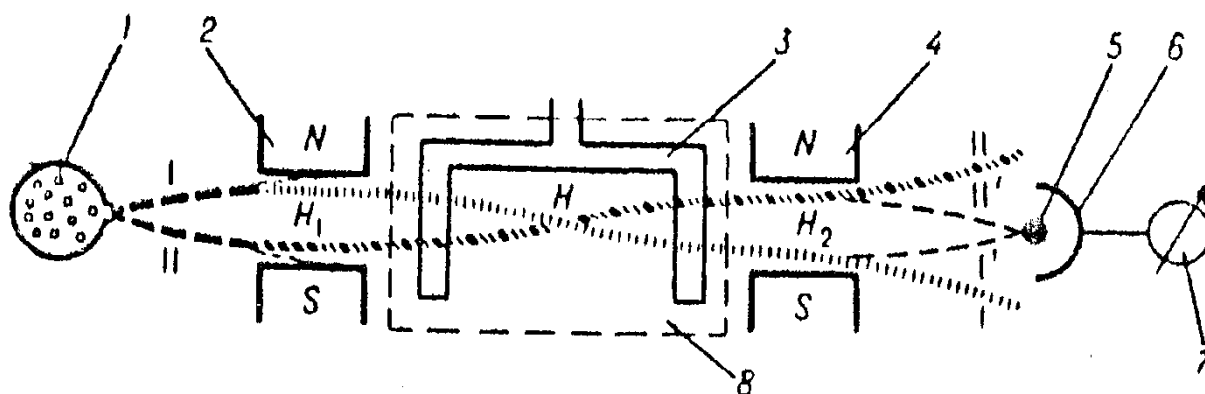


Рис. 1. Схема атомно-лучевой трубки: 1 – источник пучка; 2 и 4 отклоняющие магниты неоднородных полей H_1 и H_2 ; 3 – объемный резонатор; 5 – вольфрамовая проволока; 6 – коллектор; 7 – измерительный прибор; 8 – область однородного магнитного поля

Основным элементом в схеме является объемный резонатор 3. Именно в его электромагнитном поле формируется переход между двумя подуровнями

атомов цезия с частотой 9 192 631 770,0 Гц. Относительная нестабильность частоты составляет $1 \cdot 10^{-13}$.

Водородный генератор работает на пучках атомов водорода. Атомарный водород получают при помощи электрического разряда, приводящего к распаду молекул водорода. Атомы водорода подобно атомам цезия обладают магнитными моментами. Поэтому работа водородного генератора основывается на формировании частоты перехода между магнитными подуровнями атомов водорода. Схема устройства водородного генератора приведена на рис. 2.

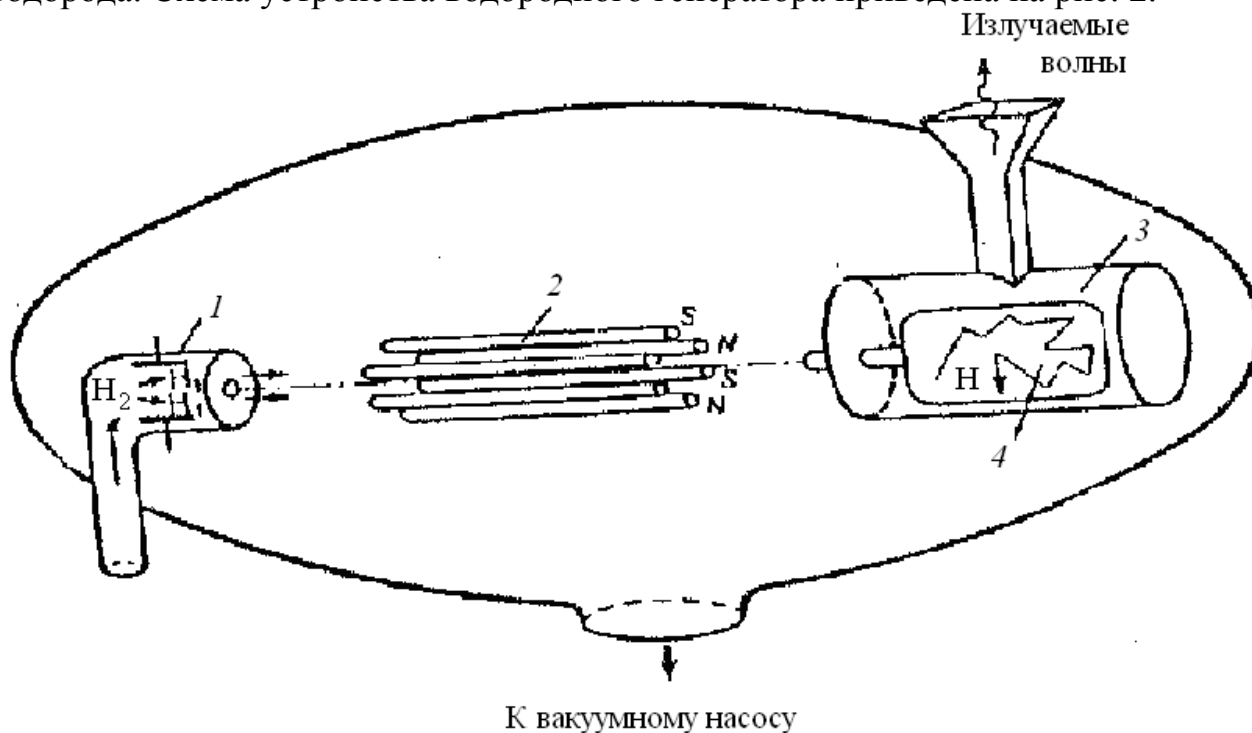


Рис. 2. Устройство водородного генератора: 1 – источник пучка; 2 – сортирующая магнитная система; 3 – резонатор; 4 – накопительная колба

В объемном резонаторе генератора формируется излучательный переход атомов водорода с частотой 1 420 405 751,7880 Гц. Относительная нестабильность частоты составляет $1 \cdot 10^{-14}$ Гц.

Колебания, сформированные на выходе квантовых стандартов частот, обладают малой мощностью – 10^{-10} Вт. Частота колебаний имеет высокостабильное, но жестко фиксированное значение, которое необходимо изменить при использовании в радиотехнических системах. Для обеспечения перестройки частоты квантового стандарта на заданную величину применяют схемы автоподстройки частоты. Схема обеспечивает увеличение мощности колебаний с сохранением стабильности частоты квантового стандарта. Преобразование частоты определяется коэффициентом преобразования $1/(n + 1)$. Вид упрощенной функциональной схемы с автоподстройкой частоты приведен на рис. 3.

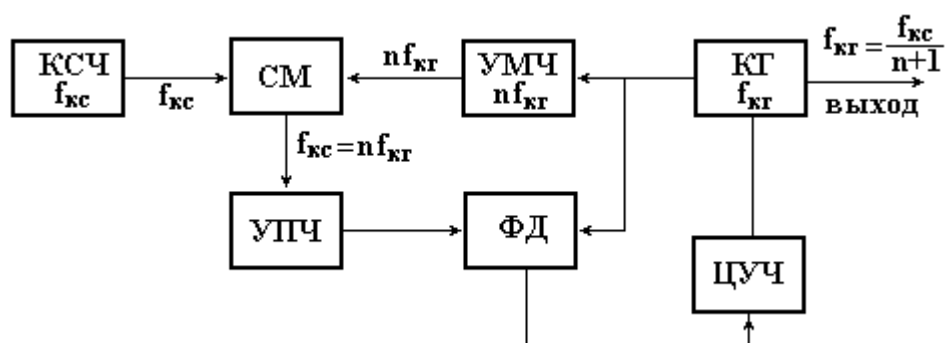


Рис. 3. Схема фазовой автоподстройки частоты: КСЧ – квантовый стандарт частоты; СМ – смеситель; УМЧ – умножитель частоты; КГ – кварцевый генератор; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; ФД – фазовый детектор; ЦУЧ – цепь управления частотой

Схема автоподстройки частоты обеспечивает формирование опорных колебаний на выходе бортового хронизатора для:

- GPS с частотой 10,23 МГц;
- ГЛОНАСС с частотой 5,11 МГц.

На основе этих колебаний формируются несущие сигналы, сигналы генераторов Р- и С/А кодов, сигналы служебной информации космических аппаратов. Кратковременная нестабильность частот на выходе хронизатора поддерживается на уровне $5 \cdot 10^{-13}$, но квантовые стандарты частот обладают систематическими уходами частот от номинала, что создает проблемы в отклонении бортовой шкалы времени спутника от системного времени.

Сдвиг бортовой шкалы в течении суток для цезиевого стандарта составляет 25,4 нс [2], т. е. фактически 1 нс на интервале 1 часа.

Средствами контрольно-измерительного комплекса ведется постоянное наблюдение за бортовым эталоном для каждого спутника, рассчитывается индивидуальный алгоритм коррекции. Допустимый уход шкалы составляет для GPS -10 нс; ГЛОНАСС – 20 нс.

При использовании абсолютного метода измерений эти искажения временной шкалы вызывают дополнительные погрешности в определении местоположения потребителя до 10...15 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барашенков, В.В. Цифровые радионавигационные устройства [Текст] / В.В. Барашенков, А.Е. Лутенко, Е.М. Скороходов и др. – М: Сов. радио, 1980. – С. 151–156.
2. Яценков, В.С. Основы спутниковой навигации [Текст] / В.С. Яценков – М: Горячая линия – Телеком, 2005 – С. 101–110.

УДК 681.785

А.С. Сырнева, В.В. Чесноков

СГГА, Новосибирск

ПРОБЛЕМЫ СПЕКТРОСКОПИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

A.S. Syrneva, V.V. Chesnokov

SSGA, Novosibirsk, aleksandra-syrneva@yandex.ru

PROBLEMS SPECTROSCOPY OF RADIATION TERAHERTZ OF A RANGE

The problem of a filtration of radiation in terahertz spectroscopy is extremely sharp. In the given work the state-of-the-art review of possible spectral devices terahertz a range is spent.

Введение

Терагерцовое излучение занимает отрезок в электромагнитном спектре между ИК и СВЧ-диапазонами. Сейчас уже производят различные устройства, способные генерировать и детектировать терагерцовое излучение, однако возможностей для управления этим излучением очень немного. Это затрудняет разработку многих перспективных приложений в электронике и фотонике.

Электромагнитные волны терагерцового диапазона (100 ГГц – 100 ТГц) поглощаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину. Его можно использовать в тех же применениях для просвечивания предметов, где сейчас используется рентген, однако, в отличие от рентгеновских лучей, Т-лучи не опасны, поскольку не производят ионизацию среды и повреждение биомолекул. Терагерцовые частоты примерно соответствуют колебательным частотам молекул. Отраженные, поглощенные в среде или прошедшие сквозь нее терагерцовые волны несут в себе богатейшую информацию об объекте. Все это определяет потенциально широкий спектр применения этого излучения. Однако этот частотный диапазон до сих пор у физиков называется «черной дырой». Связано это с трудностью генерации и детектирования этих волн.

Обзор устройств терагерцовой спектроскопии

В данном разделе будут рассмотрены следующие типы фильтров: сеточные фильтры; дисперсионные фильтры; интерферометры Фабри-Перо и монохроматоры.

Используемые конструкции

Сетчатые фильтры.

В работе [1] рассмотрены два типа металлических сеток, используемых в длинноволновых фильтрах. По аналогии с пропусканием линейных эквивалентных цепей они называются индуктивными и емкостными и имеют дополняющие друг друга характеристики отражения и пропускания. Емкостная

сетка дает максимальное пропускание на низких частотах, где индуктивная сетка является прекрасным отражателем; поэтому в качестве низкочастотных фильтров используется только емкостная сетка. Полосовые фильтры можно получить используя любой тип сеток.

Сетки бывают в виде плетеных проволочных полотен, гальванических никелевых сеток, золотых решеток и изготовленных методом фотолитографии медных сеток на кварцевых и майларовых подложках. Основные характеристики их спектров пропускания близки друг к другу: очень низкое коротковолновое пропускание, резкое возрастание пропускания до максимального значения и постепенный завал в сторону более длинных длин волн до практически нулевого пропускания. Плетеные проволочные полотна, конечно, отличаются сильной неплоскостностью. Фотолитографические сетки на кварцевых и майларовых подложках, естественно, являются строго плоскими. Другими параметрами, влияющими на пропускание и отражение сетки, являются коэффициент преломления подложки (если она имеется) и окружающей среды, а также электропроводность металла.

Фотолитографические сетки можно легко делать с различным значением a (шириной металлических полосок) для одного и того же периода g .

Порошковые фильтры с высоким пропусканием [1].

Использовался метод включения непрозрачных зерен материалов в пропускающую подложку. Лучшее для этого подошел порошковый кварц. Кварц растирается в очень тонкий порошок и тщательно перемешивается с сажей и полиэтиленовым порошком. Затем смесь прессуется между нагретыми пластинами гидравлического пресса. Добавление таких компонент в основную смесь фильтра позволило получать фильтры с высоким пропусканием, граничной частотой в широком диапазоне длин волн и с очень крутым спадом частотной характеристики.

Интерферометры Фабри-Перо [1].

Узкополосные фильтры можно получить, разделяя две и более сетки параллельными прокладками. Такие решетки прозрачны для излучения с длиной волны, превышающей постоянную решетки, поляризованного так, что электрический вектор перпендикулярен проволочкам решетки.

В работе [2] были исследованы оптические свойства одной сетки, которая в дальнейшем использовалась как отражающая пластинка в интерференционном фильтре. Сетка имела постоянную $g = 50$ мкм при ширине полосок $2a \approx 12$ мкм и их толщине около 6 мкм. Измерения проводились как с медными, так и с никелевыми сетками указанной геометрии без какой-либо подложки. Существенного различия в поведении медных и никелевых сеток не наблюдалось. Максимальное пропускание составило около 0,97 от $\lambda/g = 1$ почти до $\lambda/g = 1,15$.

Из металлической сетки (указанной выше) был изготовлен интерференционный фильтр с рабочей площадью диаметром более 6 см. Максимум пропускания в интервале длин волн от 100 до 800 мкм составил около 0,6. Сетка укреплялась на рамке. К сетке прижимается кольцо, которое плотно натягивало ее.

В статье приведены данные об отражающих и пропускающих свойствах металлических сеток и показана их высокая эффективность в качестве отражающих фильтров с чрезвычайно резкой границей пропускания для наиболее далекой инфракрасной области (от 100 мкм до 800 мкм).

Использованные металлические сетки были изготовлены из латунной проволоки; диаметр проволоки a менялся от 39 мкм до 177 мкм и расстояние d между центра соседних проволочек от 95 мкм до 384 мкм.

В работе [3] качестве примера характерных свойств металлической сетки рассмотрено пропускание и отражение сетки плотностью 100 меш в спектральной области от 10 до 800 мкм при угле падения 15° . В области коротких длин волн отражение мало и круто возрастает около 300 мкм, достигая постоянного значения, равного 95 %, при длинах волн выше 450 мкм. Пропускание имеет максимальное значение, составляющее около 70 %, при $\lambda = 280$ мкм.

В работе [4] рассматривается устройство, являющееся сетчатым интерферометром Фабри-Перо (ИФП). Данный интерферометр является распространенным устройством в дальнем инфракрасном и субмиллиметровом диапазоне. Главные его преимущества: простота, высокая разрешающая способность и эффективность; к недостаткам можно отнести маленький свободный диапазон дисперсии, угловая чувствительность. Главные принципы работы ИФП таковы конструкция с неподвижным расстоянием между двумя измеренными сетками имеет хорошую стабильность и нуждается только в одной калибровке. Прибор состоит из: сетки, опорного кольца, кольцо корпуса, сменного покрытия и поворотного стола. Пропускание интерферометра составляет $\tau = 70$ %, относительный свободный спектральный диапазон $S = 2,9 \cdot 10^{-2}$, разрешающая способность $R = 600$ и длина волны $\lambda = 120$ мкм.

Монохроматор с дифракционной решеткой.

В работе [5] описывается создание монохроматора с дифракционной решеткой, предназначенного для исследований в области физики твердого тела. Для удаления нежелательных дифракционных порядков и рассеянного коротковолнового излучения использовался большой набор фильтров. Он состоял из двух дифракционных решеток, используемых в нулевом порядке; черных поглощающих фильтров из полиэтилена толщиной 0,25 мм; фильтра из скипидарной или камфорной сажи; пластин отражения остаточных лучей.

Дифракционные решетки использовались для измерений спектров поглощения сверхпроводящих и обычных металлов, где требовался очень низкий уровень шума.

Особенности выбора материалов оптических устройств с излучением в терагерцовом диапазоне. Работа [6] посвящена расчетам прохождения терагерцового излучения через плоскопараллельные пластинки и пленки. Все численные расчеты выполнены для диапазона длин волн 30 – 300 мкм (частотный диапазон 10 – 1 ТГц). В работе представлены параметры ряда прозрачных материалов, пригодных служить оптическими элементами в терагерцовом диапазоне. К таким материалам относятся, например,

полипропилен, полистирол, тефлон, кремний, германий, алмаз [7], кристаллический кварц [7]. Одним из более перспективных светоделителей в терагерцовом диапазоне по совокупности механических и оптических свойств является полипропилен.

В работе [6] показан коэффициент отражения, пропускания и поглощения полипропиленовой пленки для р- и s-поляризаций при угле падения 45° . Также в данной работе показаны зависимости коэффициента пропускания для лавсаной пленки.

На рис. 2 и рис. 3 приведены расчетные зависимости пропускания, отражения и поглощения излучения как функции длины волны при нормальном падении на 100-микронную кремниевую (сплошная линия) и германиевую (пунктирная линия) пластинки высокой частоты.

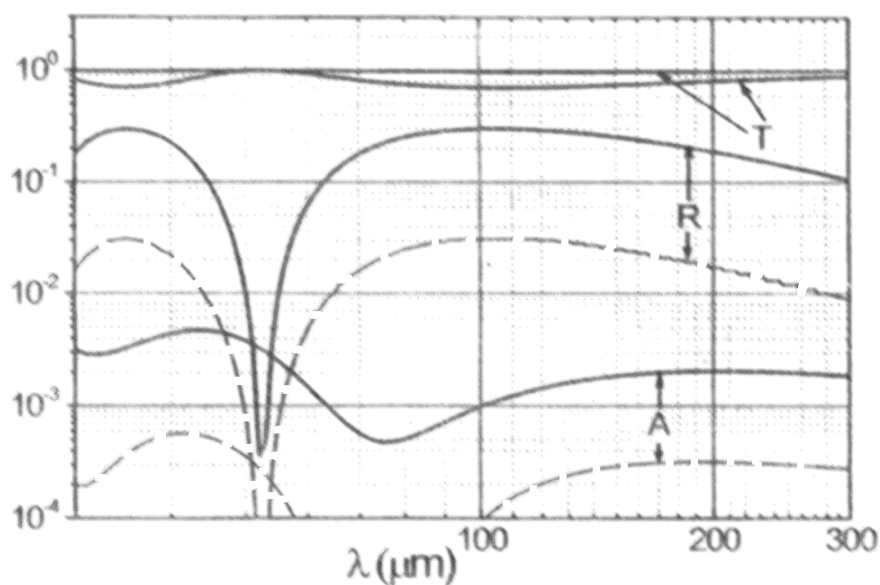


Рис. 2. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения полипропиленовой пленки толщиной 20 мкм при угле падения 45° : р-поляризация (пунктирная линия), s-поляризация (сплошная линия)

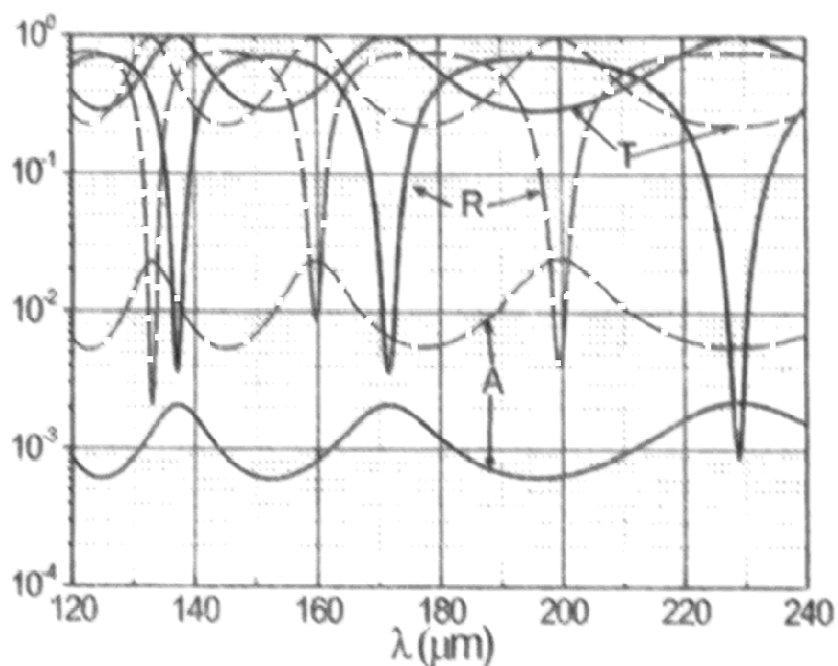


Рис. 3. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения при нормальном падении для 100 мкм пластинки: из кремния (сплошная линия) и германия (пунктирная линия)

Сравнительный анализ спектроскопических устройств терагерцового диапазона.

Для некоторых применений разрешение упомянутых устройств недостаточно, причинами этого могут быть поглощение излучения в материалах, недостаточная плоскостность сеток.

Для создания узкополосных фильтров терагерцового диапазона может быть применен эффект нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), который используется при разработках фильтров оптического диапазона [8]. Такой фильтр является фактически интерферометром Фабри-Перо, в котором зеркала могут иметь значение коэффициента отражения близкое к единице. Однако использование этого эффекта требует применения материалов, не поглощающих излучение. В работах [9, 10] проведен анализ возможных параметров такого фильтра. Он является микромеханическим устройством и состоит из двух призм, наложенных друг на друга гипотенузными гранями. Между двумя кремниевыми призмами расположена плоская кремниевая пластинка. Пластинка отделена от призм зазорами h_1 . Кремниевая пластина является резонатором Фабри-Перо, зеркалами которого служат зазоры h_1 . Разрешение светофильтра составляет $R \approx 1,5 \cdot 10^3$ при $h_1 = 50$ мкм и $R \approx 3 \cdot 10^5$ при $h_1 = 100$ мкм при толщине кремниевой пластинки $h = 65$ мкм и длине волны $\lambda = 100$ мкм; свободная спектральная область $\Delta\lambda/\lambda \approx 0,3 \dots 0,4$, пропускание в максимуме спектральной характеристики 0,6 (при условии просветления входной и выходной катетных граней кремниевых призм).

Результаты расчетов, приведенные в работе [9,10], показывают, что использование эффекта НПВО в фильтрах излучения терагерцового диапазона

дает возможность получить фильтры с высокими спектральными характеристиками. Показано, что недостатком использования кремния для призм фильтра является значительное отражение на гранях призм, что может ухудшить разрешающую способность.

Заключение

Проведен обзор известных публикаций о создании спектральных приборов терагерцового диапазона и показано возможное направление дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инфракрасные методы в космических исследованиях / Обзор современного уровня развития инфракрасных фильтров // С. Смит, Г. Хоула. – М.: Мир, 1977. – 384 с.
2. Длинноволновая инфракрасная спектроскопия / Интерференционные фильтры и интерферометры Фабри-Перо для далекой инфракрасной области // К. Ренк, Л. Генцель – М.: Мир, 1966. – 319 с.
3. Длинноволновая инфракрасная спектроскопия / Металлические сетчатые фильтры для далекой инфракрасной области // А. Митсуиши, И. Отсука, С. Фидзита и др. – М.: Мир, 1966. – 319 с.
4. Kolobanov, E.I., Kotenkov, V.V and oth. High resolution mesh Fabry-Perot interferometers in experiments on free electron and gas lasers // Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 2005. IRMMW-THz 2005. The Joint 30th International Conference. – 2005. – V. 1, – P. 26 – 27.
5. Длинноволновая инфракрасная спектроскопия / Применение интерферометрии высокой разрешающей силы с Фурье преобразованием в далекой инфракрасной области спектра // П. Ричардс – М.: Мир, 1966. – 319 с.
6. Герасимов, В.В., Князев, Б.А., Рудыч, В.С. и др. Френелевское отражение в оптических элементах и детекторах для терагерцового диапазона / В.В. Герасимов, Б.А. Князев, В.С. Рудыч и др. // Препринт, Институт ядерной физики им Г.И. Будкера. – 2006.
7. Справочник по инфракрасной технике / У. Волф, Г. Цисис. Т. 2. Проектирование оптических систем – М.: Мир, 1998. – 347 с.
8. Кард, П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок / П.Г. Кард. – Таллин: Валгус, 1971. – 233 с.
9. Чесноков, В.В. Расчетные характеристики узкополосного фильтра терагерцового диапазона спектра / В.В. Чесноков, Е.Н. Чесноков, А.С. Сырнева. // Сб. матер. III Междунар. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007». – Новосибирск, 2007 – Т.4., ч.1. – С.214-220.
10. Сырнева, А.С. Фильтры излучения терагерцового диапазона, использующие полное внутреннее отражение / А.С. Сырнева, В.В. Чесноков, Е.Н. Чесноков, А.И. Волохов // «Фотоника – 2008». – Новосибирск, 2008. – 170 с.

УДК 532.783

С.Г. Голубцов, С.Г. Орлов, С.И. Коняев

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

О МЕТОДАХ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛНОВОДАХ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

S.G. Golubtsov, S.G. Orlov, S.I. Konyaev

Institute of Laser Physics Siberian Branch Russian Academy of Science (ILP SB RAS)

ABOUT OF THE METHODS FABRICATION PERIODIC STRUCTURES IN POLYMERIC WAVEGUIDES FOR TERAHERTZ RANGE

The questions of forming of periodic structures are conceded in polymeric terahertz waveguides.

Новый метод генерации терагерцового (ТГц) излучения в нанокompозитах с жидкими кристаллами [1] представляет новые требования к полимерным волноводам для передачи ТГц излучения. Большие площади и угол расходимости излучения затрудняет ввод излучения в полимерные волноводы. Поэтому представляет значительный интерес сравнительный анализ эффективности ввода ТГц излучения, как в однородные полимерные волноводы, так и в волноводы с периодическими структурами на торце и вдоль его боковой поверхности как показано на рис. 1.

Известны методы стыковки стеклянных волноводов с лазерами, за счет создания микролинз на его торце.

В ТГц диапазоне размеры торцов полимерных волноводов намного больше длины волны (30–300 мкм) и превышает по площади десятки квадратных миллиметров.

Поскольку излучение в нанокompозите представляет собой смесь рассеянного и прямого сигналов, эффективность его ввода в волновод будет зависеть от формы торца волновода.

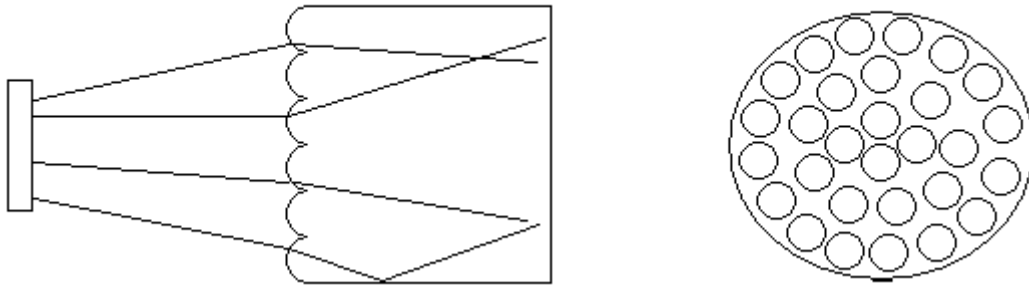
При плоской форме торца волновода часть излучения будет отражаться от него, а часть выходить в дальнейшем из волновода за счет вытекающих мод.

При периодических структурах на торце волновода открывается возможность уменьшить отражение от него и увеличить процент направляемых мод, как показано на рис. 2.

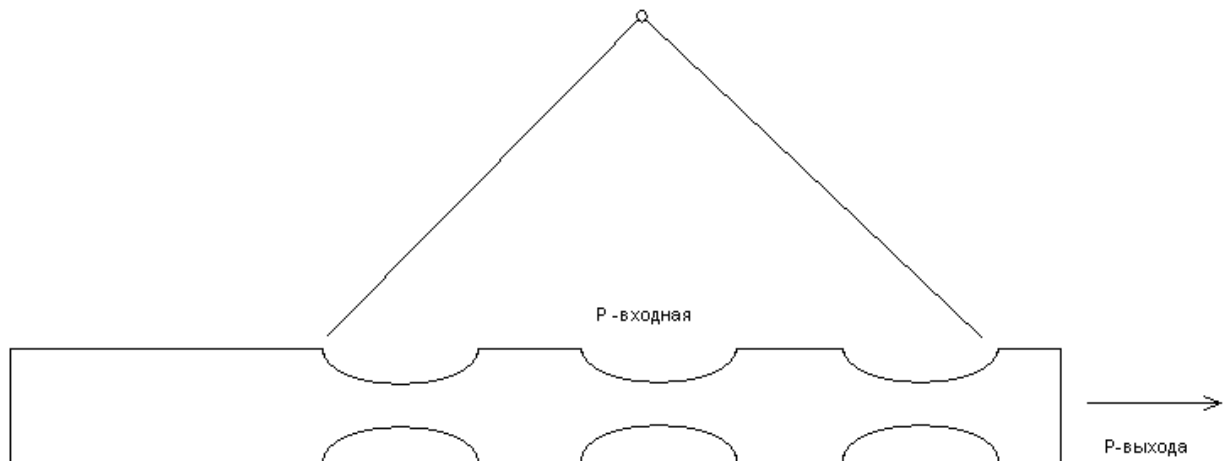
Для обеспечения согласования с апертурой ТГц волноводов в 0,25 [2], размеры микролинз 1, 2, 3 мм диаметром имеют фокусное расстояние f_1 – 3.813, 7.626, 11.538 мм соответственно.

Формирование периодической структуры на поверхности оптического волновода возможно различными методами, например с помощью оптической литографии, в частности рентгеновской или УФ.

Рентгеновская литография является разновидностью оптической бесконтактной печати, в которой длина волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0,4–5 нм.



а) волновод с периодической структурой на торце



б) ТГц волновод с перетяжками

Рис. 1. Схема ввода ТГц излучения в полимерные волноводы

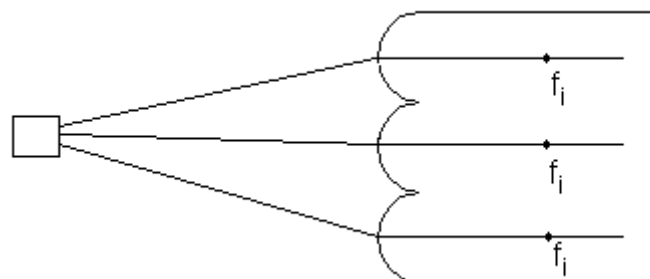


Рис. 2. Волновод с периодической структурой на торце, f_i – фокусное расстояние микроэлемента

Одним из преимуществ рентгеновской литографии является отсутствие влияния загрязнений на формирование дефектов рисунка, поскольку

рентгеновские лучи практически не поглощаются загрязнениями, состоящими из компонентов с малым атомным номером. Кроме того, вследствие низкого поглощения рентгеновского излучения рентгеновский толщину резист большой толщины может быть однородно экспонирован на всю, в результате чего в его объеме у окон формируются вертикальные стенки, точно повторяющие рисунок шаблона.

УФ литография аналогична рентгеновской литографии. Существует несколько методов УФ-литографии среди них такие как:

- Контактная печать, где пластина кремния, покрытая резистом, находится в непосредственном физическом контакте со стеклянным фотошаблоном.

- Метод бесконтактного экспонирования схож с методом контактной печати, за исключением того, что во время экспонирования между пластиной и шаблоном поддерживается небольшой зазор шириной 10–25 мкм. Этот зазор уменьшает (но не устраняет) возможность повреждения поверхности шаблона.

- Проекционная печать позволяет полностью исключить повреждения поверхности шаблона. Изображение топологического рисунка шаблона проецируется на покрытую резистом пластинку, которая расположена на расстоянии нескольких сантиметров от шаблона.

Из полимерных соединений используемых в рентгеновской и УФ-литографии и волоконной оптике наиболее применяемыми являются ПММА и полистирол [3].

Из всех этих методов самым эффективным и точным является рентгеновская литография, так как с её помощью можно создать точную структуру глубиной от 100 мкм. Методы УФ-литографии из-за дифракционного рассеяния и малой глубины засветки имеет меньшее применение. Для придания сферической формы периодическим можно их нагреть до температуры плавления материала.

Также формирование периодических структур возможно с помощью перетяжек на волоконном волноводе.

Формирование перетяжек из ПММА и полистирола производилось нами методом разогрева и растяжения вплоть до 10мкм.

Ярко выраженную периодическую структуру можно получить при вытягивании волокна из раствора ПММА. Полученная «нить» имеет чередование «бусинок» и гладких участков или только «бусинок» в зависимости от скорости вытягивания и вязкости раствора.

Одним из применений получаемых такими методами периодических структур является использование в качестве приемника ТГц излучения. Оценить эффективность сбора можно произведя расчет по формуле Френеля [4] аппроксимировав элемент периодической структуры в виде набора наклонных поверхностей рассчитав по формуле:

$$p_{\text{shar}}(x, z) := \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin \left[(x + z) - \left(\operatorname{asin} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(x + z) \right) \right) \right]^2}{\sin \left[(x + z) + \left(\operatorname{asin} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(x + z) \right) \right) \right]^2} + \frac{\tan \left[(x + z) - \left(\operatorname{asin} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(x + z) \right) \right) \right]^2}{\tan \left[(x + z) + \left(\operatorname{asin} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(x + z) \right) \right) \right]^2} \right],$$

где x падающий луч, z – угол поворота поверхности.

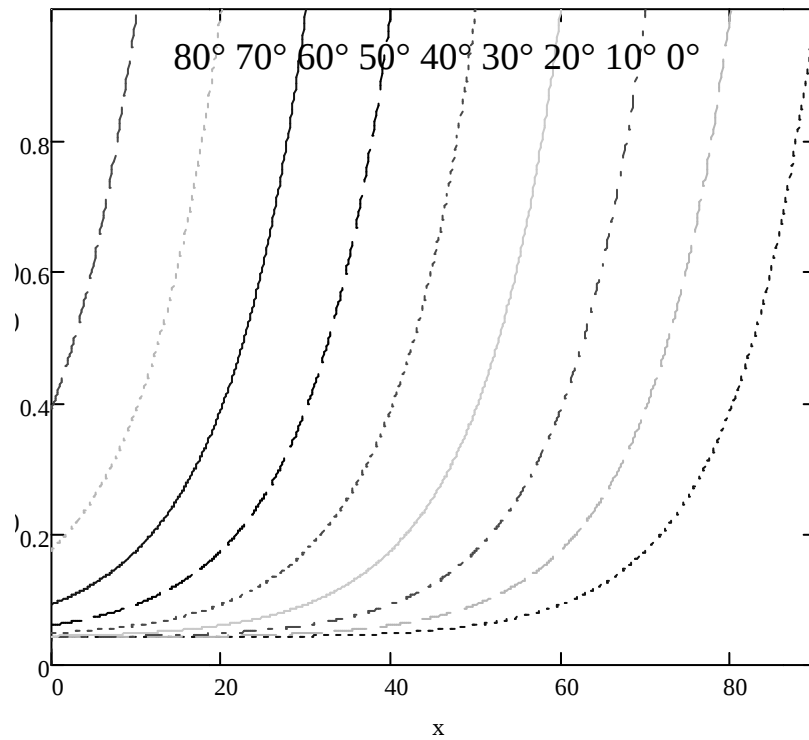


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от угла поворота поверхности

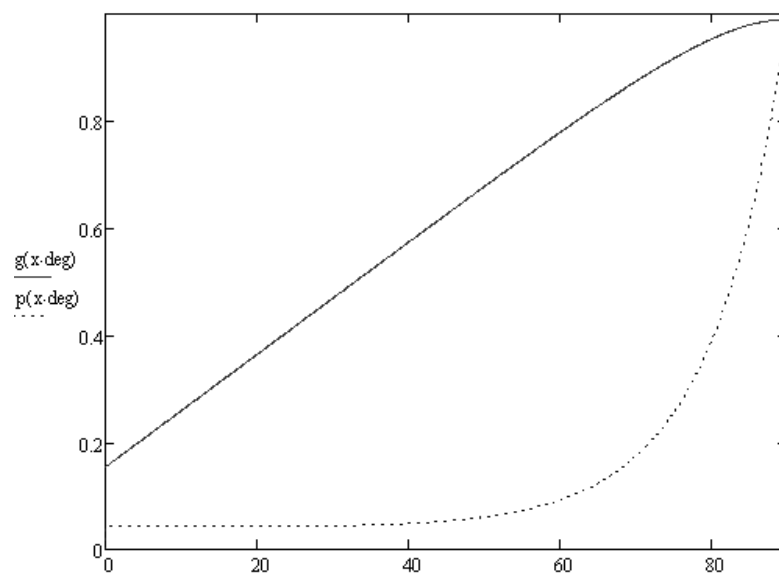


Рис. 4. Коэффициенты отражения от гофрированной и плоской поверхности

Надо учесть, что даже при нормальном падении луча отражается 4–6 % энергии [5]:

$$p := \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

где n' и n – показатели преломления сред.

Просчитав по формулам получаем, что гофрированная поверхность имеет больший коэффициент отражения, а равно и меньший световой сбор (без учета поглощения отраженных лучей), но меньшую зависимость от угла падения лучей на поверхность. Графическое построение показывает, что поглощение отраженных лучей будет иметь место при углах падения от 40 до 90 градусов уменьшая общие потери.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перспективы использования систем с жидкими кристаллами и полимерными волноводами в терагерцовом диапазоне для информационных систем / Б.В. Поллер, В.М. Клементьев, С.И. Трашкевич, А.В. Бритвин и др. // Сб. матер. IV Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008». – Новосиб., 2008. – Т.4, ч.2. – С. 34–36.
2. О характеристиках полимерных волноводов и преобразователей для терагерцовых информационных систем / Б.В. Поллер, В.М. Клементьев, С.И. Трашкеев и др.// Доклад на 15 междун.конф. «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2009.
3. Мир электроники. ВЧ МЭМС и их применение./ В. Вардан, К. Виной, К. Джозе; перевод с английского под ред. Ю.А. Заболотной. – М.: Техносфера, 2004. – 525 с.
4. Оптико-электронные приборы / А. В. Павлов. – М.:Энергия,1974. – 359 с.
5. Мир физики и техники. Техническая оптика/ Г.Шрёдер, Х. Трайбер; перевод с немецкого Р. Е. Ильинского. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.

© С.Г. Голубцов, С.Г. Орлов, С.И. Коняев, 2009

УДК 533.599

Г.А. Барсуков

СГГА, Новосибирск

ПРОЕКТ МАЛОГАБАРИТНОЙ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ

G.A. Barsukov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

PROJECT OF COMPACT MAGNETRON SCATTERING SYSTEM RECEIVING METAL FILMS-STRUCTURE

This is review report project construction of compact magnetron system receiving films-structure. It is oddon to standard vacuum coater.

Целью данной работы является обсуждение проекта малогабаритной магнетронной распылительной системы, являющаяся приставкой к стандартной вакуумной установке.

Еще сравнительно недавно основным методом нанесения тонкопленочных покрытий были испарение и конденсация веществ в высоком вакууме. Методы ионного распыления материалов вследствие низких скоростей осаждения и высоких радиационных воздействий на обрабатываемые структуры использовались ограниченно. Создание магнетронных распылительных систем, позволяющих наносить как тонкопленочные слои, так и пленочные покрытия толщиной в сотни микрон, позволили существенно расширить область применения ионного распыления материалов [1].

Магнетронные распылительные системы (МРС) имеют ряд преимуществ по сравнению с распылительными системами электронно-лучевого испарения, высокочастотного и термовакуумного распыления, в числе которых высокая скорость распыления, высокая адгезия пленок, возможность распыления тугоплавких материалов, металлов и сложных сплавов, низкий уровень радиационных дефектов, низкая температура подложек, возможность распыления магнитных и сверхпроводящих материалов, низкая пористость получаемых пленок и возможность реактивного распыления.

Благодаря этим качествам МРС существенно расширяют диапазон своего применения в различных областях науки, техники и промышленного производства. С помощью МРС получают сверхтонкие (менее 20 нм) прозрачные пленки для изготовления ЖК-кристаллов, тонкие пленки для фотошаблонов и рентгеношаблонов, пленки тугоплавких металлов для металлизации ИС, упрочняющие, износостойкие, защитные и декоративные покрытия и т. д. и т. п.

Ниже рассматривается малогабаритная магнетронная распылительная система получения пленок металлов, которая будет сконструирована в виде отдельной приставки к стандартной вакуумной напылительной установке, с использованием средств откачки этой базовой напылительной системы (рис. 1). Вместо заглушки стандартной вакуумной камеры, расположенной в ее боковой стенке, произведена установка механического вакуумного затвора (1), отделяющая при необходимости магнетронную приставку от базовой системы. Вакуумная труба (2) с помощью фланцев (3) с одной стороны герметично присоединяется к этому затвору, а с другой – к столику из нержавеющей стали (4), который является основой самой магнетронной камеры распыления (5). Внутри камеры устанавливается узел магнетрона с мишенью-катодом (6). Магнетрон окружен защитным экраном (8), соединенный с анодом, основной задачей которого является предотвращение паразитного разряда в газе по боковым сторонам мишени-катода. Предусмотрен натекаль (7), используемый для напуска в камеру рабочего газа (в нашем случае – аргона). Откачка всей этой системы производится с помощью вакуумного и форвакуумного насосов, входящих в состав вакуумной базовой установки (рис. 1).

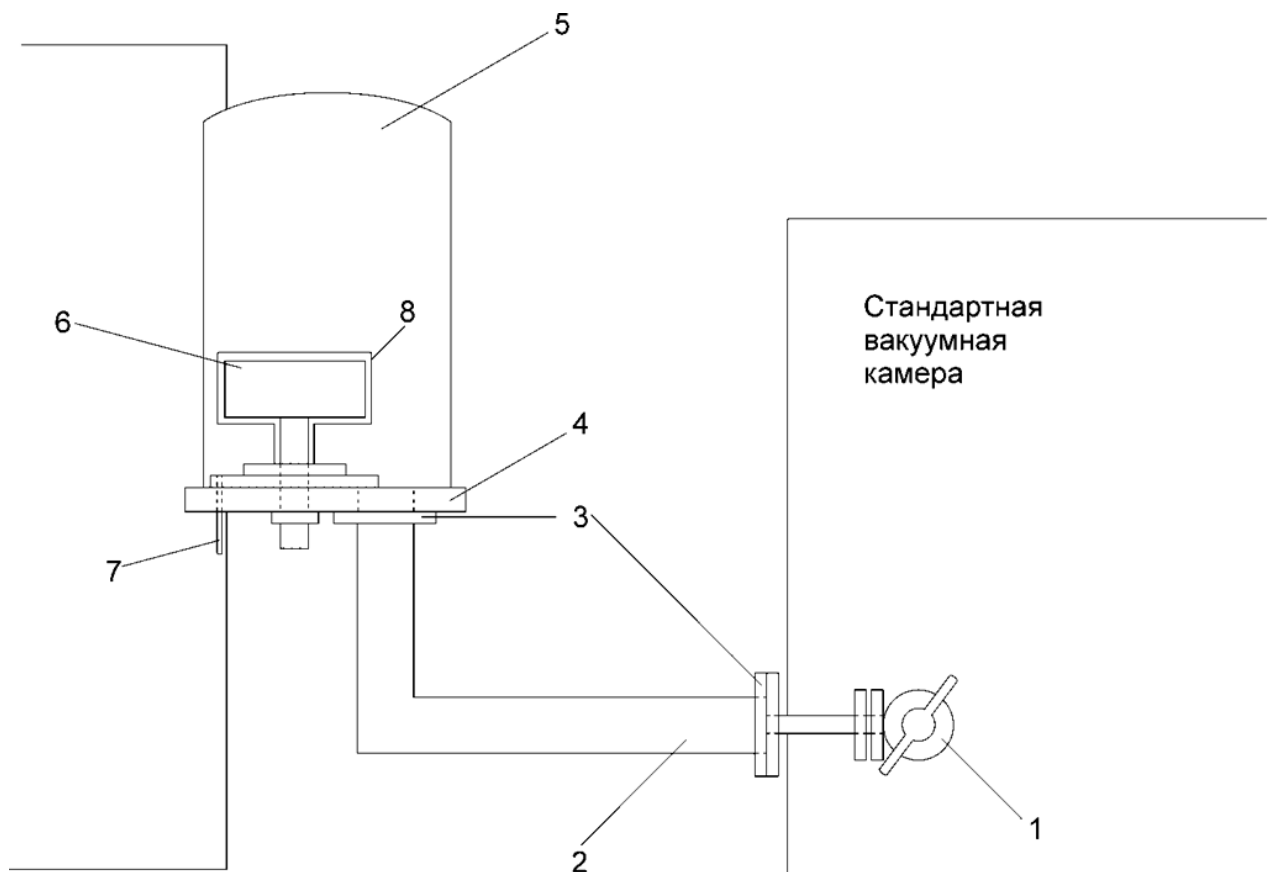


Рис. 1. Общий вид малогабаритной магнетронной распылительной системы получения пленок металлов на фоне базовой вакуумной системы

Магнетронный узел представляет собой устройство для создания в области разряда магнитного поля. Узел содержит блок магнитов с полюсным наконечником (магнитный блок), смонтированный в корпус из нержавеющей

стали, являющийся одновременно и держателем мишени-катода. Через указанный корпус пропускается охлаждающий поток воды. Анод с закрепленной подложкой расположен над катодом. В области разряда создается область скрещенных электрического и магнитного полей, что облегчает возбуждение плазмы при низких давлениях газа. Распределение магнитного поля характеризуется силовыми линиями, изображенными на рис. 2.

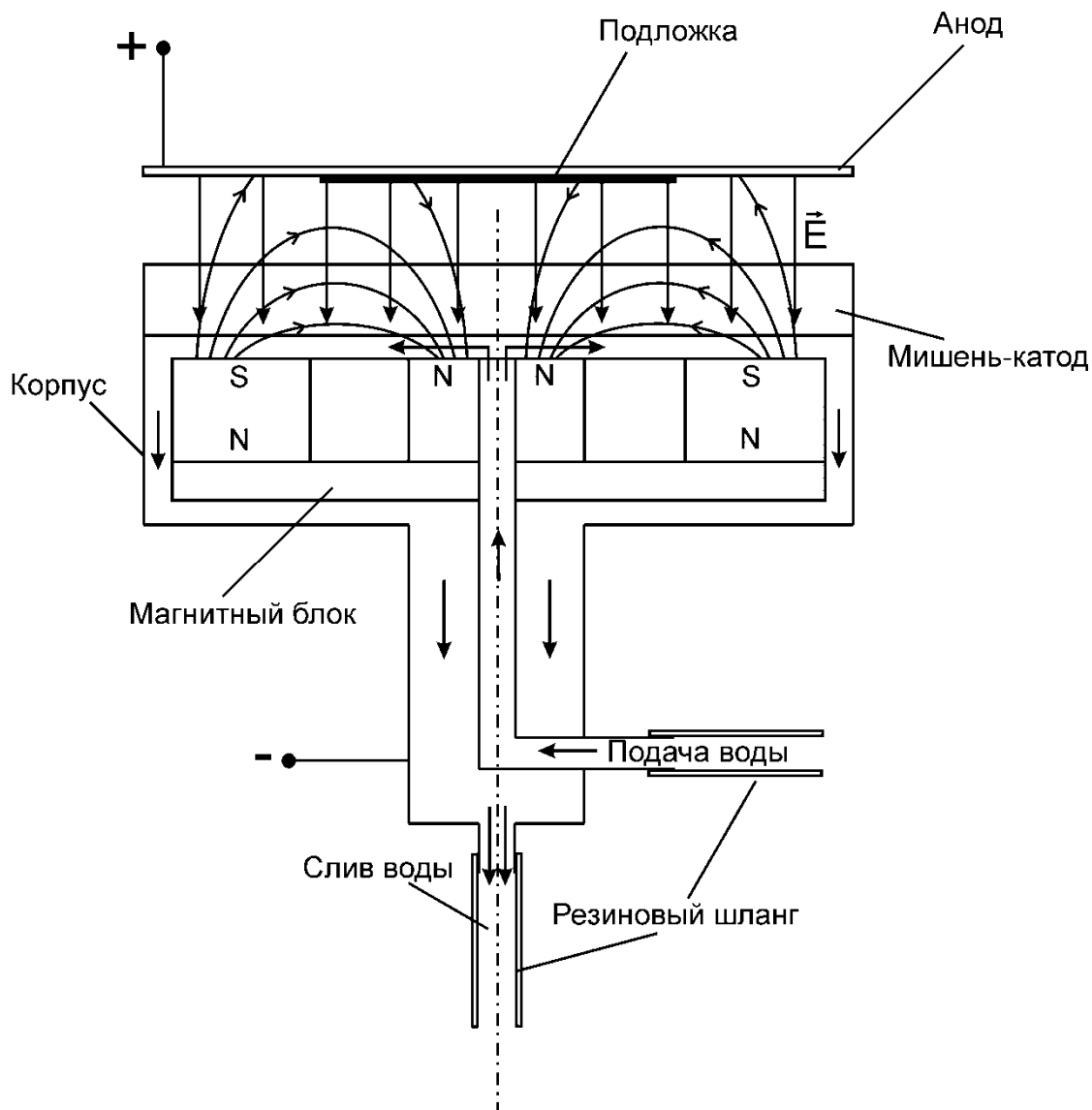


Рис. 2. Схема магнетронного узла в разрезе

Поскольку корпус магнетрона герметичен, охлаждение мишени производится непосредственной подачей внутрь него воды, и она окажется также под электрическим напряжением, как и корпус самого узла с мишенью. Вода, поднимаясь по тонкой трубке, заполняет свободные полости магнетронного узла и охлаждает его. Слив охлаждающей воды из системы производится в канализацию. Электрическую изоляцию системы охлаждения магнетронного узла от канализации обеспечивают включенные в систему подачи и слива воды резиновые шланги длиной около 1,5 метров.

Важной задачей является оптимизация распределения магнитного поля над катодом магнетронного устройства. Известно, что при распылении материала мишени используемая доля площади рабочей области небольшая (порядка 20–30 %), что очень невыгодно при применении дорогостоящих мишеней. Для устранения этого недостатка необходимо подбирать форму полюсных наконечников в системе магнитов.

Возможен еще один вариант решения проблемы – сделать магнитный блок вращающимся относительно центра корпуса магнетронного узла. Эта разработка, возможно, поможет повысить долю использования мишени до 70 % [2]. Но она видится в дальнейшей перспективе.

Планируемые технические характеристики приставки:

- Диаметр мишени – 150 мм;
- Давление рабочего газа (аргона) – 0,1–1 Па;
- Мощность, выделяющаяся на катоде, – около 1 кВт;
- Диаметр базового фланца приставки – 300 мм;
- Габариты – 300х420 мм;
- Масса камеры в сборе – 20 кг.

Таким образом, как показано выше, предложенная система обладает несомненными преимуществами над промышленными аналогами: малыми габаритными размерами; небольшим, в сравнении с промышленными установками, весом; минимальными затратами на изготовление и эксплуатацию, при возможности обеспечивать стандартные режимы нанесения плёнок. Указанные преимущества обеспечиваются за счёт отсутствия в приставке собственных средств вакуумной откачки и использования откачных средств базовой вакуумной напылительной установки, предложенного в настоящей работе.

В настоящее время разработка малогабаритной системы находится в стадии проектирования: производятся технические расчеты установки, параллельно выполняется подготовка чертежей узлов магнетронной системы.

Научным руководителем работы является Чесноков В.В., д.т.н., проф.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилин Б.С. Магнетронные распылительные системы / Б.С. Данилин, В.К. Сырчин. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
2. Наноиндустрия: научно-техн. журн./ Под ред. П. Мальцева. – М.: Море, 2008. – 42 с.

© Г.А. Барсуков, 2009

УДК 535.3.53.082.539

Д.С. Михайлова, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков
СГГА, Новосибирск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВОЛОКОННОГО СПЕКТРОМЕТРА МОНОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СЛОЕВ

D.S. Mikhaylova, V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov
SSGA, Novosibirsk

RESEARCH OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE SPECTROMETER OF MONOMOLECULAR LAYERS

In article the developed philosophy of measurement of a spectrum absorptances nano films of the elementorganic compounds, based on use of the light guide measuring converter is described.

Элементоорганические соединения (ЭОС) давно и успешно используются в различных отраслях науки и производства, главным образом для получения металлической фракции нужного состава и формы: нано– и микропорошков, тонкопленочных покрытий и т. п. Перспективными являются исследования [1] в области лазерографии тонкопленочных рисунков на различных поверхностях из паров ЭОС, в том числе карбониллов металлов.

При изучении лазерного парофазного химического осаждения тонких пленок металлов выяснилось, что разложение паров ЭОС имеет место даже на поверхности подложек, прозрачных для лазерного излучения [2, 3] с длиной волны 334 нм. В этом случае излучение не поглощается подложкой и, следовательно, на ее поверхности не должно быть выделения тепла, вызывающего пиролиз.

В нашей работе [4] показано, что спектр поглощения карбонила рения в объеме не содержит полос поглощения, соответствующих лазерному излучению с длиной волны менее 350 нм, однако известно [5], что при адсорбции молекул на поверхность их энергетический спектр изменяется, и спектр поглощения вещества в адсорбированном состоянии может отличаться от спектра объемного материала.

Целью данной работы является разработка методики исследования поглощательной способности мономолекулярных слоев, адсорбированных на подложках. Для реализации поставленной задачи нами разрабатывается приставка к спектрофотометру, в которой анализируется поглощение слоев, адсорбированных на поверхности кварцевого световода.

Разрабатываемая методика основана на использовании эффекта нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Если

монохроматическое излучение направить вдоль световода, на поверхности которого располагаются в адсорбированном состоянии молекулы ЭОС, то последние оказываются в потоке излучения, оптически туннелирующего из световода в окружающее пространство. Адсорбированный монослой поглощают падающее излучение. Преимуществом метода измерений является возможность прохождения светового пучка не поперек, а вдоль осажденного слоя молекул ЭОС, что должно существенно увеличивать условную «толщину» слоя материала, через который проходит излучение. Хотя поглощательная способность не меняется, коэффициент поглощения растет до величины, позволяющей его измерить.

Метод реализован в виде приставки изображенной на рис. 1.

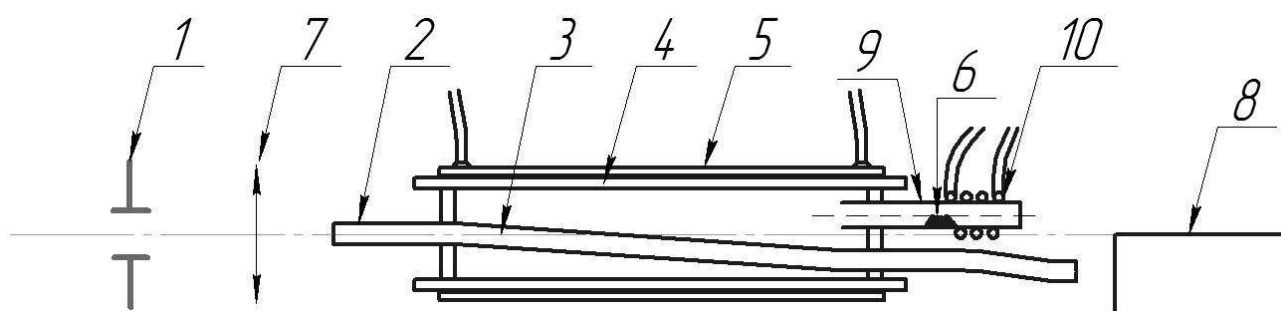


Рис. 1. Схема разработанной приставки

Сфокусированное линзой 7 излучение, выходящее через щель монохроматора 1, попадает в кварцевый световод 2. Участок 3 световода находится в камере 4. Камера 4 помещена в нагреватель 5.

Реагент 6 находится внутри трубчатого испарителя 9, имеющего нагревательный элемент 10. Излучение, вышедшее из световода, попадает на входное окно фотоумножителя 8. Давление пара p реагента определяется температурой T_1 испарителя. Давление одинаково в камере 4 и испарителе, если температура T_2 камеры больше температуры испарителя: $T_2 > T_1$.

Изменяя температуру T_2 , мы можем изменять поверхностную концентрацию молекул адсорбата на световоде. Если степень заполнения адсорбированными молекулами поверхностного монослоя мала, то справедливо уравнение адсорбции Ленгмюра [6]:

$$\theta = \frac{b \cdot p}{1 + b \cdot p}, \quad (1)$$

где

$$b \approx \frac{\exp\left(\frac{q}{k \cdot T}\right)}{k_0 (2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T)^{1/2}}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура световода, m – масса молекулы, q – энергия адсорбции одной молекулы, k_0 – константа.

Внутренняя поверхность камеры 4 и световод 3 имеют одинаковую температуру, поддерживаемую внешним нагревателем 5. Молекулы реагента 6

адсорбированы на поверхности участка кварцевого световода 3 в виде доли монослоя молекул. Используется кварцевый световод диаметром 1 мм и длиной 10 см. Температура камеры может регулироваться в диапазоне от комнатной до 100 °С, область спектральной чувствительности ФЭУ составляет 160–600 нм.

Излучение, туннелирующее сквозь поверхность оптоволокна наружу, занимает вблизи поверхности слой толщиной порядка длины волны излучения. Адсорбированные на поверхности молекулы имеют размеры много меньше длины волны. Можно считать, что интенсивность излучения в слое адсорбированных молекул примерно равна интенсивности с внутренней стороны поверхности световода. В случае использования многомодового световода распределение интенсивности излучения по сечению его сердцевины можно считать равномерным. Плотность мощности $P_{y\partial}$ излучения в световоде при этом равна:

$$P_{y\partial} = P_o / \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right), \quad (3)$$

где P_o – мощность введенного в световод излучения, D – диаметр световода.

Слой адсорбированных молекул, которые представлены на рисунке 2 в виде шаров диаметром d_m , в поперечном сечении имеет форму кольца и находится под воздействием излучения с мощностью:

$$P_m = P_{y\partial} \cdot \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot \frac{\pi \cdot D}{d_m} = P_{y\partial} \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot d_m \cdot D, \quad (4)$$

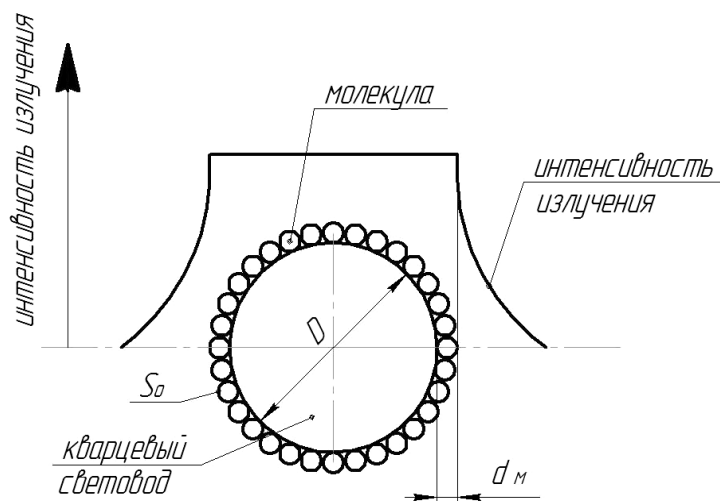


Рис. 2. Слой молекул, адсорбированных на световоде (показано поперечное сечение)

Та доля общей мощности излучения, введенного в световод, которая приходится на адсорбированный слой, определяется выражением:

$$\frac{P_m}{P_o} = \frac{\pi \cdot d_m}{D}. \quad (5)$$

Поглощенная адсорбированными молекулами мощность излучения равна:

$$P_{\text{м.погл}} = P_{\text{м}} \cdot k_{\text{м}} \cdot l = P_{\text{о}} \frac{\pi \cdot d_{\text{м}} \cdot k_{\text{м}} \cdot l}{D}, \quad (6)$$

где $k_{\text{м}}$ – коэффициент поглощения, l – длина области световода с адсорбированным слоем.

Приведенное выражение не имеет экспоненциальной зависимости от толщины слоя материала (в нашем случае его роль играет l), так как излучение в адсорбированный слой попадает из сердцевины кварцевого световода за счет туннелирования, а вдоль световода интенсивность идущего в нем излучения практически не меняется.

В спектроскопии часто исследуют вещество в виде тонких слоев, нанесенных на поверхность прозрачной подложки, которая размещена на пути потока перпендикулярно. Поглощенная в слое толщиной в одну молекулу мощность определяется выражением:

$$P_{\perp\text{погл}} = P_{\text{о}} \cdot k_{\text{м}} \cdot d_{\text{м}}. \quad (7)$$

Сравнение чувствительностей предложенной и традиционной методик проведем с помощью выражения:

$$\frac{P_{\text{м.погл}}}{P_{\perp\text{погл}}} = \frac{\pi \cdot l}{D}, \quad (8)$$

Полученное выражение показывает возможность существенного увеличения чувствительности спектральных измерений с использованием разрабатываемой методики в сравнении с традиционной. При длине световода $l = 10$ см и его диаметре, как в нашем случае, $D = 1$ мм выигрыш в чувствительности составит примерно 10^3 раз.

Фотография камеры 4 приставки к спектрофотометру показана на рис. 3.



Рис. 3. Фотография нагревательной камеры

Разрабатываемый метод будет использован для исследования спектров поглощения элементоорганических соединений в адсорбированном на поверхности состоянии, что поможет изучить явления, происходящие при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом для целей нано- и микротехнологий.

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. – 300 с.
2. Чесноков, Д.В. Пиролитическое выращивание пленок металлов на подложках в условиях открытой атмосферы, инициированное наносекундным лазерным излучением / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков // Материалы V международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000 (Россия, Новосибирск, 26–29 сентября 2000 г.): Труды, Т. 2. – Новосибирск: НГТУ, 2000. – С. 89–93.
3. Чесноков, Д.В. Проблемы лазерных наносекундных технологий осаждения пленочных микроструктур / В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, Е.Ф. Резникова // Материалы VII международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2004 (Россия, Новосибирск, 20–23 сентября 2004г.), Т. 2. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 69-78.
4. Михайлова, Д.С. Исследование спектров поглощения металлоорганических соединений, применяемых при фотоиндуцированном осаждении тонких пленок / Д.С. Михайлова, Д.В. Чесноков. – Новосибирск: ГеоСибирь, 2007.
5. Лазнева, Э. Ф. Лазерная десорбция / Э. Ф. Лазнева.– Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. – 198 с.
6. Флад, Э. Межфазовая граница газ – твердое тело / Э. Флад. – М.: Мир, 1970. – 436 с.

© Д.С.Михайлова, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2009

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

S. A. Flora, V.V. Chesnokov

SSGA, Novosibirsk

MICROMECHANICAL TRANSFORMER WITH ELECTRO-FIELD CONTROL

They are considered questions of a creation of the micromechanical magnetic field sensor, having a higher accuracy of the measurement, a wider range of the measurements and a weaker dependency from the temperature of an external environment.

Для измерения магнитного поля, как показано в ряде работ [1–3], может быть применено несколько физических эффектов. Магнитострикционный эффект позволяет измерять магнитное поле по изменению размеров ферромагнетика, помещенного в измеряемое поле. В датчиках, использующих силу Ампера, измеряется сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Магниторезистивный эффект, заключающийся в изменении электрического сопротивления проводников и полупроводников в магнитном поле, позволяет измерять постоянные и переменные магнитные поля, используется, например, при считывании информации с магнитных носителей. В датчиках, основанных на использовании эффекта Холла, измеряется разность потенциалов на боковых гранях полупроводниковой пластины, через которую в продольном направлении пропускается электрический ток. Все перечисленные выше методы измерения магнитного поля подвержены влиянию изменений температуры внешней среды. В датчиках на основе эффекта Фарадея измеряется величина кругового двулучепреломления, возникающего в некоторых прозрачных средах под воздействием приложенного магнитного поля. Такие датчики имеют обычно оптоволоконное исполнение. Эффекты ядерного магнитного резонанса (ЯМР) – резонансного поглощения электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, обусловленного переориентацией магнитных моментов ядер, – давно и широко используются для измерения магнитных полей при геологоразведочных работах. Датчики, основанные на ЯМР, являются «абсолютными» и не требуют калибровки. Электромагнитные датчики, основанные на использовании измерения ЭДС электромагнитной индукции, применяются для измерения переменных магнитных полей или для обнаружения ферромагнитных или проводящих

предметов. Почти все эти датчики, за исключением датчика с ЯМР, не имеют абсолютного характера, результат измерения зависит от различных внешних условий.

Рассматриваемый нами измерительный преобразователь – датчик магнитного поля – основан на измерении ЭДС электромагнитной индукции; независимость результатов измерений от условий окружающей среды базируется на том факте, что величина электрического заряда, образующегося в витке из проводника, поворачивающемся в магнитном поле, зависит только от индукции поля, площади рамки и угла поворота рамки. Принцип действия датчика иллюстрируется с помощью рис. 1; на рис. 2 показана его примерная конструкция.

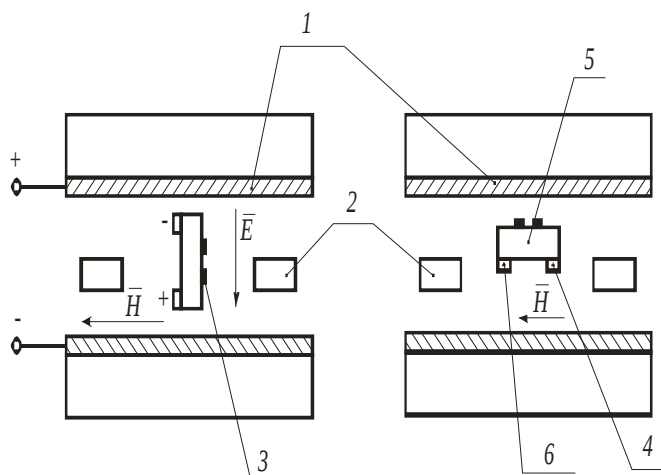


Рис. 1. Принцип действия микромеханического преобразователя: 1 – проводящие плёнки – обкладки; 2 – стеклянная подложка, на которой закреплены полимерная полоска 5 с электродами 4 и 6 и витком 3 из проводника, H – напряженность измеряемого магнитного поля, E – напряженность электрического поля, создаваемого между обкладками

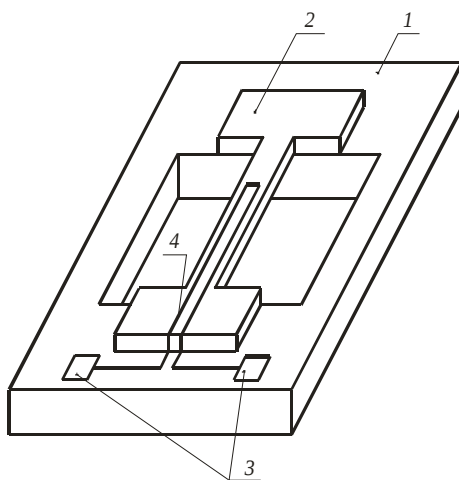


Рис. 2. Конструкция микромеханического преобразователя: 1 – стеклянная подложка с отверстием под полимерной полоской; 2 – полимерная структура; 3 – контактные площадки; 4 – рамка из проводника в виде витка

При проведении измерений индукции магнитного поля полоска с измерительным витком должна совершать крутильные колебания вокруг своей продольной оси. Собственная частота этих колебаний определяется выражением [4]:

$$f_0 = \frac{b}{hl} \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига; ρ – плотность материала полоски; b – толщина; h – ширина; l – длина полоски.

Между электродами 4 и 6 имеется электрическая емкость $C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot b}{h}$,

которая при подаче напряжения $U_{нол}$ приобретает заряд

$$q = U_{нол} \cdot C. \quad (2)$$

Закручивающий полоску момент $M_{вр}$ создается при взаимодействии электрического дипольного момента полоски:

$$P \approx q \cdot h, \quad (3)$$

с электрическим полем E , возникающим в области расположения полоска при подаче напряжения U_0 между обкладками 1.

$$q \approx \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot b}{h} \cdot U_{нол}, \quad (4)$$

Здесь $U_{нол}$ – электрическое напряжение между возбуждающими дипольный момент электродами 4 и 6 на полоске; ε – диэлектрическая проницаемость полоски; ε_0 – электрическая постоянная.

Закручивающий момент определяется выражением:

$$M_{вр} = P \cdot E \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где α – угол между плотностью полоски и силовыми линиями поля. В начальный момент времени, когда полоска не повернута, $\alpha = \pi / 2$; по мере поворота этот угол уменьшается до значения $\alpha = 0$ (при повороте полоски на угол $\pi / 2$).

Учитывая (2), (3) и (4), получим

$$M_{вр} = \varepsilon \varepsilon_0 l \cdot b \cdot U_{нол} \cdot E \cdot \sin \alpha. \quad (6)$$

В рассматриваемой конструкции закручивающий момент расположен вдоль полоски равномерно.

Под действием момента $M_{вр}$ полоска закручивается, и угол поворота в ее средней части равен [4]

$$\varphi_0 = \frac{1}{8} \cdot \frac{M_{вр}}{GI_{\kappa}}, \quad (7)$$

где в соответствии с [5]

$$I_{\kappa} \approx \frac{hb^3}{3} \quad (8)$$

– полярный момент инерции сечения полоски.

Подставим (7) и (5) в (6), получим

$$\varphi_0 = \frac{3}{8} \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l U_{пол} \cdot E \cdot \sin \alpha}{G \cdot h \cdot b^2}. \quad (9)$$

Для возбуждения крутильных колебаний полоски необходимо, чтобы закручивающий момент был переменным во времени. Если частота f его изменения совпадает с собственной частотой f_0 крутильных колебаний полоски, наступает резонанс, и амплитуда колебаний $\varphi_{\sim}$ резко возрастает в сравнении с вычисленной по уравнению (9). Можно записать:

$$\varphi_{\sim} = Q \cdot \varphi_0, \quad (10)$$

где Q – механическая добротность полоски ($Q \approx 10$).

Результаты расчета геометрических параметров полоски, обеспечивающих угол поворота полоски $\varphi_0 = \pi / (2Q) = 0,05\pi$ при различных значениях электрического поля E и амплитуды возбуждающего колебания напряжения $U_{пол}$, а также резонансной частоты f_0 , приведены в табл. 1. При расчетах принято, что $\alpha = \pi / 2 - \varphi_0 = 0,9\pi / 2$, $\varepsilon = 3$, $G = 10^9$ Па, $\rho = 1 \cdot 10^3$ кг/м³.

Таблица 1. Результаты расчета параметров полоски

N	l , м	h , м	b , м	E , В/м	$U_{пол}$, В	f_0 , Гц
1	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	5	6250
2	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	19,9	12500
3	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	10	3125
4	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	40	6250

При повороте проводящей рамки в магнитном поле через проводник рамки протекает заряд q_M , равный [3]

$$q_M = \frac{\Delta \Phi}{R}, \quad (11)$$

где $\Delta \Phi$ – изменение магнитного потока, сцепленного с рамкой при ее повороте; R – активное сопротивление измерительной цепи заряда.

При расположении рамки в магнитном поле таким образом, что нормаль к ней составляет угол γ к направлению силовой линии магнитного поля, можно записать:

$$\Phi = B \cdot F \cos \gamma, \quad (12)$$

где $B = \mu_0 H$ – индукция измеряемого магнитного поля; H – напряженность этого поля; μ_0 – магнитная постоянная; F – площадь рамки.

При крутильных движениях полоски рамка совершает колебательные движения с частотой ω , и угол γ изменяется по закону:

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t, \quad (13)$$

где γ_0 – амплитуда угла.

Подставив (13) в (12), получим:

$$\Phi = B \cdot F \cdot \cos(\gamma_0 \cos \omega t). \quad (14)$$

Если $\gamma_0 = \pi / 2$, то магнитный поток через рамку изменяется между крайними значениями 0 и BF , причем увеличение потока от 0 до максимального значения сменяется на уменьшение потока, т. е.:

$$\Delta\Phi = \pm BF. \quad (15)$$

Ток в измерительной цепи колеблющейся рамки будет переменным. Среднее значение тока можно найти в соответствии с выражением:

$$i_{cp} = \frac{q_{MT}}{T/2}, \quad (16)$$

где q_{MT} – заряд, генерируемый рамкой за половину периода $T/2$ частоты колебаний. Так как $\frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = \frac{\pi}{\omega}$, то, используя (11), можно найти:

$$i_{cp} = \frac{\Delta\Phi \cdot \omega}{R\pi} = \frac{B \cdot F \cdot \omega}{R\pi}. \quad (17)$$

Чувствительность устройства к измерению индукции магнитного поля B определяется выражением

$$S = \frac{i_{cp}}{B} = \frac{F\omega}{R\pi}. \quad (18)$$

Датчик может содержать N рамок, в этом случае чувствительность датчика:

$$S_N = N \cdot S = \frac{NF\omega}{R\pi}. \quad (19)$$

При резонансе $\omega = 2\pi f_0$. Рамка на полоске должна занимать среднюю часть полоски длиной $l_p \approx \frac{l}{3}$ и шириной, равной ширине h полоски, т. е.

$$F = \frac{l \cdot h}{3}.$$

Для параметров последней строки таблицы 1 для датчика, содержащего одну рамку, получим:

$$S = \frac{100}{R}.$$

Как следует из (18), чувствительность устройства зависит только от его геометрических параметров. Причина в том, что заряд, генерируемый рамкой, поворачивающейся в магнитном поле, зависит только от площади рамки и индукции магнитного поля.

При изготовлении структур преобразователя используются принципы LIGA-технологии, реализованной в ИЯФ им. Будкера СО РАН. Материалом полимерной полоски, имеющей конфигурацию «мостика», является рентгеночувствительный резист SU-8. На рис. 3 показаны этапы изготовления структуры измерительного преобразователя.

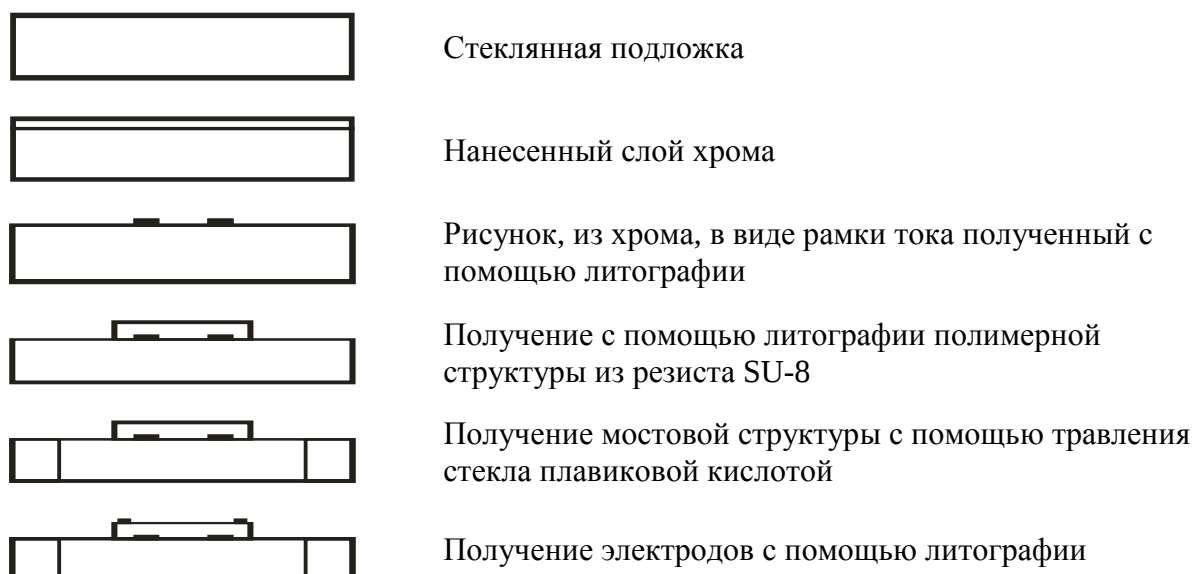


Рис. 3. Последовательность этапов изготовления структуры измерительного преобразователя

Полученные из рентгенорезиста полимерные структуры имеют вид полосок шириной 100 мкм, толщиной 5–8 мкм с зазорами между полосками 5–6 мкм.

Рассмотренные в настоящем сообщении предварительные теоретические и экспериментальные результаты подтверждают, по мнению авторов, достижимость высоких параметров разрабатываемого преобразователя – датчика магнитного поля в микромеханическом исполнении.

Авторы благодарят сотрудника ИЯФ им. Будкера Гольденберга Б.Г. за оказание помощи в проведении экспериментальных работ по LIGA-технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
2. Левшина, Е.С. и др. Электрические измерения физических величин: (измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий; – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
3. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 1 / Ж. Аш и др.; пер. с франц. – М.: Мир, 1992. – 480 с.
4. Чесноков, В.В. Микромеханические модуляторы света / В. В. Чесноков // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1990.– № 6.– С.82.
5. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Г.С. Писаренко – Киев: Наукова думка, 1988.

УДК 681.785.552

В.С. Корнеев, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков

СГГА, Новосибирск

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

V.S. Korneev, V.V. Chesnokov, D.V. Chesnokov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE FEATURE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF MICROMECHANICAL CONTROLLABLE GRATING ARRAY

The characteristics of micromechanical controllable grating reflectarray using as dispersive element of spectral device are theoretically considered. The possibility to concentrate radiation of intended wavelength in intended spectrum order due to synchronous deviation of angular placement array's micromirrors is feature of this grating reflectarray.

ВВЕДЕНИЕ

Микромеханическая управляемая дифракционная решетка представляет собой массив равноотстоящих друг от друга параллельных микрозеркал, торсионно закрепленных своими концами в плоскости подложки. Каждое микрозеркало обладает собственным магнитным моментом. При взаимодействии внешнего магнитного поля с магнитным моментом микрозеркал возникает крутящий момент, приложенный к полоске микрозеркала, и последние изменяют свое угловое положение относительно плоскости поверхности решетки [1, 2]; дифракционная решетка имеет управляемый «угол блеска». Синхронное изменение положения микрозеркал может быть применено для изменения направления концентрации излучения в один из порядков спектра. В работе [1] рассмотрена возможность создания на базе управляемой дифракционной решетки спектрального прибора модуляционного типа.

Теоретические расчеты

Для анализа используется краткая теория отражательной дифракционной решетки с треугольным профилем штриха, изложенная в работе [3]. Для любой отражательной дифракционной решетки условие главных максимумов имеет вид:

$$d(\sin \phi + \sin \varphi) = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots, \quad (1)$$

где m – порядок дифракционного максимума, а углы ϕ (падения излучения на плоскость дифракционной решетки) и φ (направления на дифракционный максимум) отсчитываются от нормали n к плоскости

поверхности подложки (рис. 1). Для угла $\phi = -\phi$, для всех длин волн λ , наблюдается дифракционный максимум нулевого порядка.

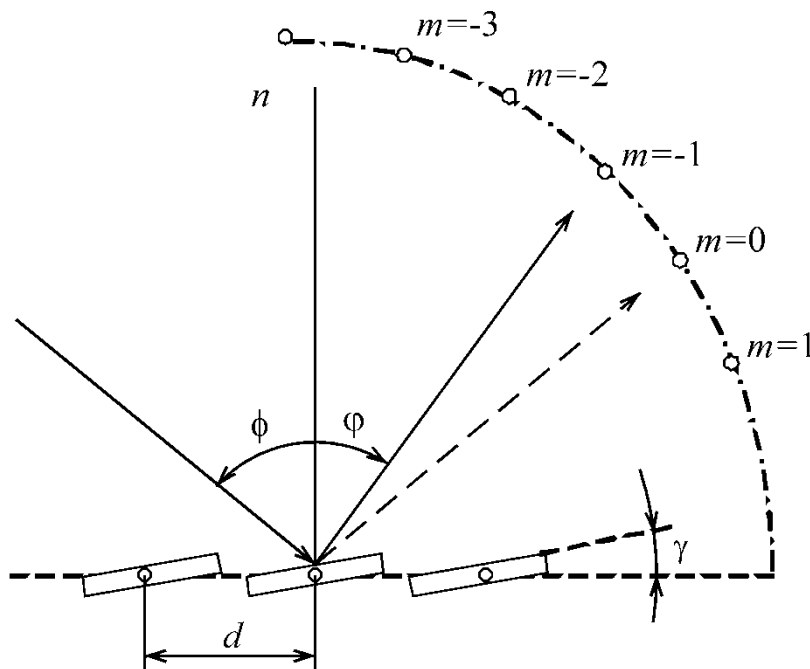


Рис. 1. Схема хода лучей и расположения главных порядков дифракции

Отражательная дифракционная решетка с треугольным профилем штриха концентрирует излучение с данной длиной волны, падающее на решетку, в узкую область спектра, шириной не менее угловой ширины порядка спектра. Угол γ наклона микрозеркал относительно плоскости всей решетки (рис. 1) определяет значение длины волны в максимуме интенсивности области концентрации излучения.

На рис. 1 показано расположение порядков дифракции m_i от микромеханической управляемой решетки при падении излучения под углом ϕ по отношению к нормали n к плоскости решетки. Пунктиром показано направление отраженного луча, соответствующее нулевому порядку дифракции, когда $\phi = -\phi$.

В работе [4] найдено выражение для длины волны, соответствующей максимуму интенсивности в спектре m -го порядка. После приведения его к системе координат, показанной на рис.1, выражение имеет вид:

$$\lambda_{m,0} = \frac{2d \sin \gamma \cdot \cos\left(\frac{\phi + \phi}{2}\right)}{m}. \quad (2)$$

Область спектра вблизи $\lambda_{m,0}$ является областью высокой концентрации энергии в данном порядке спектра. Энергия излучения с длиной волны $\lambda = \lambda_{m,0}$, падающая на дифракционную решетку, направляется почти полностью в спектр m -го порядка, если не учитывать коэффициент отражения ρ_m поверхности. Распределение энергии излучения с длиной волны λ в спектре m -го порядка в

[4] характеризуется распределением коэффициента отражения $\rho_m(\lambda)$ на данной длине волны и определяется выражением:

$$F_m(\lambda) = \frac{\rho_m(\lambda)}{\rho_m} = \left[\frac{\sin \pi \left(m - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)}{\pi \left(m - \frac{\lambda_{1,0}}{\lambda} \right)} \right]^2, \quad (3)$$

где $\lambda_{1,0}$ – длина волны с наибольшей интенсивностью в спектре 1-го порядка. Спектры соседних порядков частично налагаются друг на друга, и область свободной дисперсии, как легко можно найти из уравнения (1), равна:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m+1}. \quad (4)$$

Изменяя угол наклона микрозеркал γ , можно получить концентрацию энергии излучения в заданном порядке дифракционной картины (2). Непрерывное изменение угла γ приводит к концентрации энергии излучения на изменяющихся направлениях дифракции, при этом картина спектра остается в целом неизменной.

Расположим в области одного из максимумов дифракционной картины приемник излучения со входной щелью, края которой параллельны штрихам решетки (рис. 2), и ширину щели выберем равной ширине свободной области дисперсии (4). Угловая ширина $\Delta\phi$ щели определяется выражением [4]:

$$\Delta\phi = \Delta\lambda D_\phi, \quad (5)$$

где: D_ϕ – угловая дисперсия решетки при угле дифракции ϕ .

Выходной сигнал приемника излучения в каждый момент времени пропорционален общей интенсивности падающего на решетку излучения на всех спектральных линиях диапазона, вырезаемого щелью фотоприёмника.

При непрерывном изменении угла γ максимум концентрации излучения будет последовательно проходить угловые положения, соответствующие максимумам интенсивности на длинах волн, определяемых выражением (2). Сигнал оказывается модулированным по амплитуде последовательностью значений интенсивности излучений на всех длинах волн, попадающих в щель.

Изменение выходного сигнала приёмника излучения при перемещении зоны концентрации излучения по спектру с длины волны λ_i на длину волны

$\lambda_i + \delta\lambda$, происходит за время $\delta t = \frac{\delta\phi}{\omega}$, где $\delta\phi = \delta\lambda D_\phi$. Получим:

$$\delta t = \frac{\delta\lambda D_\phi}{\omega}, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость перемещения зоны концентрации.

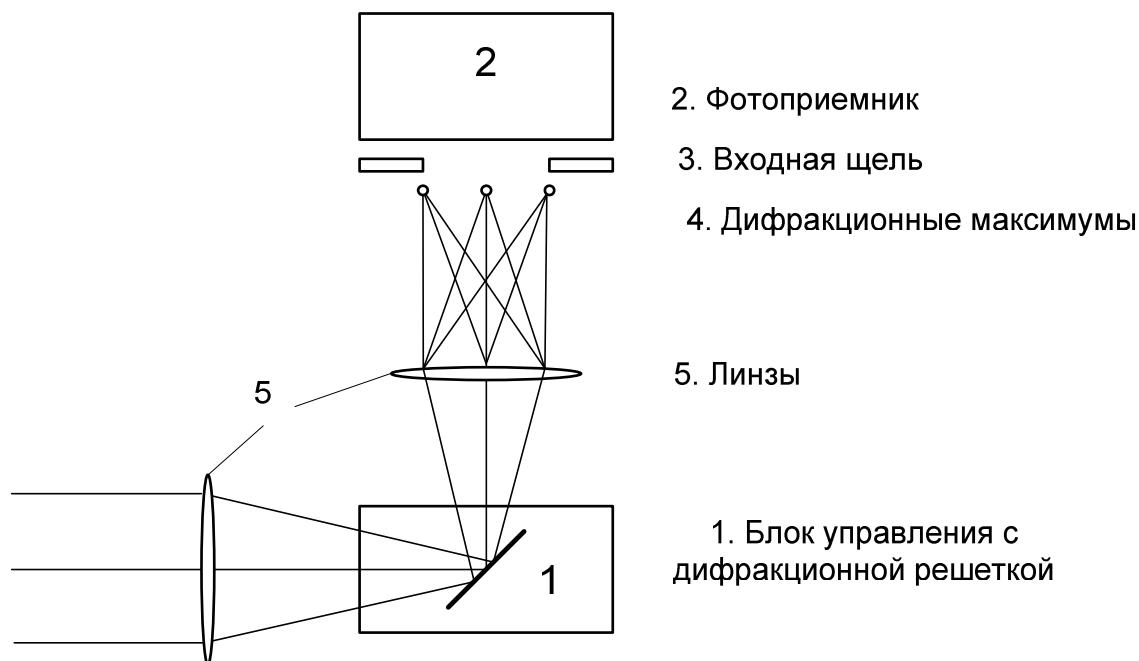


Рис. 2. Оптическая схема устройства с управляемой дифракционной решеткой

Выходной сигнал приёмника излучения, соответствующий некоторой длине волны λ_i монохроматического излучения, имеет форму колоколообразного импульса, амплитуда $I_{0\lambda}$ которого пропорциональна функции $F_m(\lambda)$ (3):

$$I_{0\lambda} = SF_m(\lambda), \quad (7)$$

где S – коэффициент пропорциональности. Ширина импульса определяется выражением

$$\delta T = \frac{\Delta\alpha}{\omega}; \quad \Delta\alpha = \frac{\lambda}{Nd}, \quad (8)$$

где $\Delta\alpha$ – дифракционная расходимость монохроматического с длиной волны λ излучения, отраженного от решётки; N – число штрихов решетки.

В случае исследования сплошного спектра при прохождении зоны концентрации через край щели сигнал приёмника нарастает по мере увеличения доли площади щели, занятой зоной концентрации излучения. Вычисление математической производной от функции изменения во времени выходного сигнала приёмника излучения позволяет разделить сигналы, соответствующие разным длинам волн (рис. 3).

После дифференцирования сигнал представляет собой последовательность колоколообразных импульсов, ширина которых может определяться, как для импульсов монохроматического излучения, по уравнению (8). В соответствии с критерием разрешения Рэлея два одинаковых колоколообразных импульса наблюдаются отдельно, если полуширина основания импульса равна расстоянию между положениями их максимумов, то есть необходимым является

условие $2\delta t = \delta T$. Учитывая (6) и (8), получим значение разрешающей способности:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = 2dND_{\varphi}. \quad (9)$$

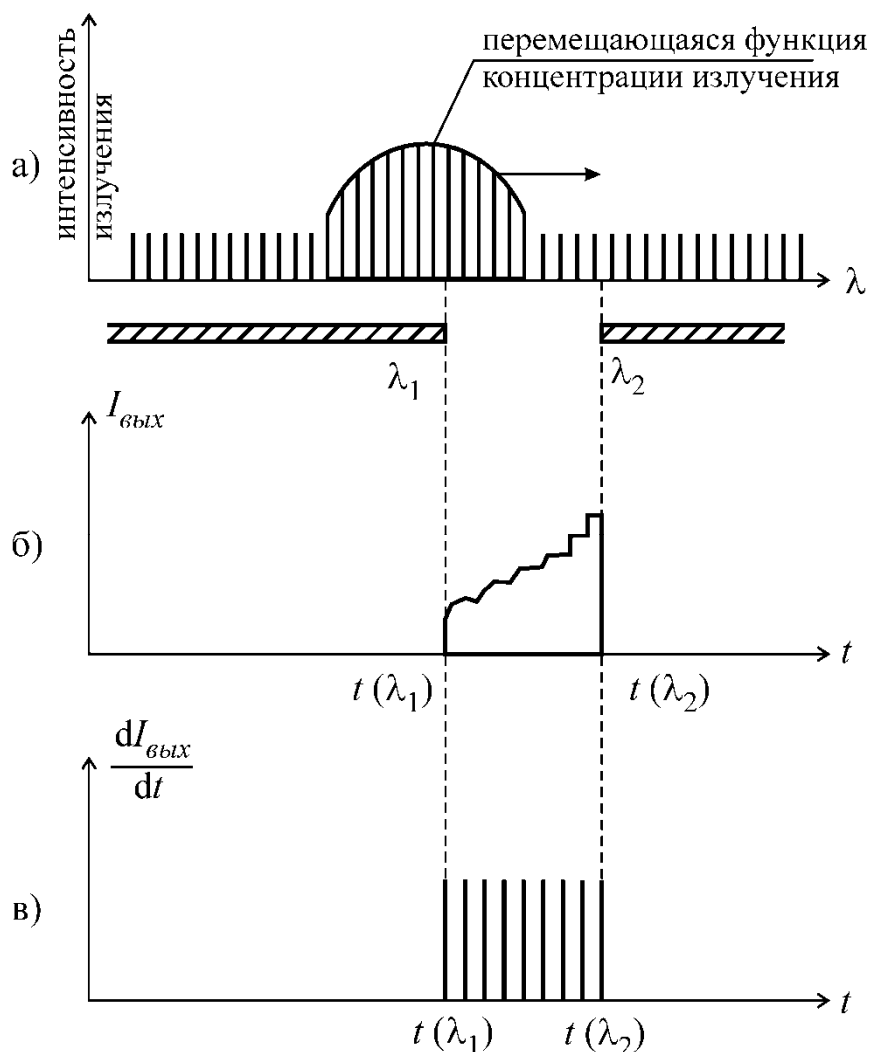


Рис. 3. Схемы формирования оптических и электрических сигналов (λ_1 и λ_2 – длины волн, соответствующие краям щели): а) линии спектра и функция концентрации излучения; б) форма выходного сигнала приёмника излучения; в) форма выходного сигнала после дифференцирования

Сравнение принципов работы и параметров исследуемого устройства с классическими спектральными приборами, в которых на приёмник попадают пространственно разделённые монохроматические составляющие исследуемого излучения, и модуляционными спектральными приборами, в которых на приёмник попадает излучение сравнительно широкой области спектра, показывает следующее.

В рассматриваемом устройстве на одиночный приёмник попадает одновременно излучение широкой области спектра, как в модуляционных приборах, однако оно должно быть пространственно разделённым на монохроматические составляющие, как в классических приборах. Выделение из

сигнала одной монохроматической составляющей, производится путем электронной обработки выходного сигнала приёмника, содержащего электронные отклики от всех линий спектра, как в модуляционных приборах, и, как в последних, полезная информация содержится в переменной составляющей выходного сигнала, формирующейся за счёт механических перемещений элементов спектрального прибора. Амплитуда переменной составляющей модулируется интенсивностью линии спектра, а её фаза определяется длиной волны линии. Светосила устройства и разрешающая способность примерно соответствуют параметрам отражательной дифракционной решетки с треугольным профилем штрихов.

Можно сделать вывод о близости рассматриваемого устройства к модуляционным спектральным приборам.

Заключение

Показано, что микромеханическая управляемая дифракционная решетка позволяет концентрировать падающее на неё излучение в заданный порядок спектра и перемещать направление концентрации по спектру излучения. Последнее приводит к возможности сканирования спектра.

Выходной сигнал одиночного приёмника излучения модулируется по амплитуде последовательностью линий спектра. Разрешающая способность устройства не зависит, в первом приближении, от ширины входной щели приёмника излучения; диапазон анализируемого спектра задаётся положением в спектре и шириной входной щели приёмника. По принципам своего действия управляемая решетка близка к модуляционным спектральным приборам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование физических проблем нано- и микроразмерных функциональных механических устройств информационных оптоэлектронных систем: Отчет о НИР (заключит.) / СГГА; рук. В. В. Чесноков, исполн. Д. В. Чесноков. – Новосибирск, 2003. – № ГР 0199.0010326; Инв. № 022001.03117. – 71 с.
2. Чесноков, Д.В. Микромеханический дефлектор световых потоков / Д.В. Чесноков // Оптический журнал. – 2007. - №4. – С.51–54.
3. Скоков, И.В. Оптические спектральные приборы / И.В. Скоков. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
4. Пейсахсон, И.В. Оптика спектральных приборов / И.В. Пейсахсон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

© В.С. Корнеев, В.В. Чесноков, Д.В. Чесноков, 2009

УДК 681.783
С.А. Шойдин
СГГА, Новосибирск

К ВОПРОСУ СЖАТИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

S.A. Shoydin
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE COMPRESSION OF HOLOGRAPHIC INFORMATION

The information redundancy is described in this paper. The problem of holographic information compression is especially urgent when transmitting the images of three-dimensional objects at a distance.

Вопрос о количественной мере информации, содержащейся в оптическом излучении и в зарегистрированной с его помощью голограммой поднимался с первых дней существования голографической технологии. Так, уже в своих первых работах по голографии [1, 2] Ю.Н. Денисюком была доказана теорема об отображающих свойствах картины стоячих волн, образованных рассеянием света на исследуемом объекте. Изучая отображающие свойства фотографической модели картины стоячих волн, он показал, что такая пространственная структура является своего рода оптическим эквивалентом объекта. Продолжая эти рассуждения можно сказать, что волна, рассеянная собственно объектом полностью идентична волне, рассеянной голограммой. Следует добавить, что в этой модели говорится только об излучении объекта, воспринятого голограммой, когерентного с опорной волной, используемой при записи. Также, при этом предполагается, что при записи не возникло никаких дополнительных шумов, не присущих излучению объекта. Прежде всего, это соответствует модели линейности фотоотклика, формируемого голограммой.

В работах [3, 4] проанализированы различные конкретные случаи записи информации в голограммах. Из их анализа видно, что, во-первых, реально, на голограмме содержится значительно меньшее количество информации, чем получается из прямого расчёта по формуле Шеннона, где в качестве числа возможных состояний источника информации берётся полное число возможных состояний волновой функции в заданном объёме пространства. А, во-вторых, видно, что реально для исчерпывающего описания объёмного объекта требуется гораздо меньше информации, чем содержится в голограмме. Отсюда возникает понимание, что возможны методы сжатия исчерпывающей информации о трёхмерном объекте, позволяющие передавать его структуру для зрительного восприятия массивами информации, существенно меньшими, чем реально используются при прямой записи голограмм.

Первые опыты по моделированию таких процессов были нами проделаны ещё в [5], где на основе оконного преобразования Фурье удалось сжать динамический диапазон интерференционного поля объекта на голограмме. Современное переосмысление полученных результатов и значительный скачок развития математики оконных преобразований, в том числе вейвлет преобразований [6], позволяет надеяться на более универсальные результаты сжатия голографической информации. Однако для таких модельных экспериментов значительные трудности вызывает отсутствие понимания психофизических основ восприятия объёма. Имеется ввиду, что задача восприятия объёма может быть поставлена самыми различными способами, от получения «кажущегося» объёма абстрактных, или модельных изображений до получения объёмного изображения неотличимого от реальности.

Правильная постановка этой задачи будет иметь существенное влияние не только на количественные параметры сжатия, но и на области его применения от создания различных оптических иллюзий [7], до передачи реальных трёхмерных изображений на расстояние [8].

Одним из направлений сжатия голографической информации является вейвлет-сжатие. Воспользовавшись фазовым представлением голограммы, можно использовать для кодирования фазы вейвлеты Хаара [9]. Учитывая их быструю сходимость можно видеть, что оператор проектирования порядка $n + 1$ отличается от оператора порядка n на малую величину поправки $P^W_n(f)$

$$P_{n+1}(f) = P_n(f) + P^W_n(f). \quad (1)$$

Следует отметить, что каждая следующая поправка в (1) не только мала по абсолютной величине, но и имеет своё направление дифракции, как n -й порядок в выражении для t -амплитуды дифрагировавшего поля [10].

Очевидно, основные шумы от неполного представления основного сигнала ограниченным количеством используемых операторов проектирования $P_n(f)$ будут пространственно разделены с основным информационным сигналом.

В заключение отметим, что хорошее сжатие голографической информации может обеспечиваться не только в базисе Хаара, но и в базисе других вейвлетов, что заслуживает отдельного, более детального исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк, Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного излучения / Ю.Н. Денисюк. – ДАН СССР. – 1962. – Т. 44. С. 1275.
2. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. / Денисюк Ю.Н. – Автореферат диссертации на соискание учёной степени к.ф.-м.н. Л., ГОИ им С. И. Вавилова, 28 С.
3. Шойдин, С.А. Информационная ёмкость голограмм в практических применениях / С.А. Шойдин.-Сб. материалов междунар. науч. конгр. "ГЕО-СИБИРЬ 2006". – Новосибирск: СГТА, 2006. – С. 52.

4. Соскин, С.И. Расчёт оптической системы голографического запоминающего устройства / С.И. Соскин, С.А. Шойдин. – Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44. – № 3. – С. 566–573.
5. Шойдин, С.А. Согласованный выбор кода и фазовой маски, повышающих равномерность интерференционной картины Фурье-голограмм / Шойдин, С.А., Ворожейкин, В.С. – ЖТФ. – 1982. – Том 52. – №10. – С. 2022-2026.
6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / Добеши И.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».-460 С.
7. Гиббсон, Дж. Когнитивная психология / Дж. Гиббсон. - М.: Наука, 1977. – 325 С.
8. Комар, В.Г., Серов О.Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф / В. Г. Комар, О. Б. Серов. – М.: Искусство, 1987.
9. Чуи, К. Введение в вейвлеты / Чуи, К.-М.: Мир, 2001. 416 С.
10. Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. – М.: Мир, 1973. – С 257.

© С.А. Шойдин, 2009

УДК 535.417

Ю.Ц. Батомункуев

СГГА, Новосибирск

ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ ОБЪЕМНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ГОЛОГРАММНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Yu. Ts. Batomunkuev

SSGA, Novosibirsk, e-mail: opttechnic@mail.ru

THEORY OF ABERRATIONS OF VOLUME X-RAY HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENT

The aberration theory of volume x-ray holographic optical element (HOE) is developed in article. It is shown that nonisotropic change of the refraction index and of the shrinkage brings to reduction of an aberration of volume x-ray HOE. It is noted that focal depth of an image of the volume x-ray HOE increases in contrast with thin HOE.

Введение. Известно, что из-за сильного поглощения излучения и слабого преломления крайне затруднено использование традиционных стеклянных оптических элементов в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Разработанные в последние годы многокомпонентные преломляющие рентгеновские элементы имеют большие aberrации, низкое разрешение и предназначены для фокусировки рентгеновского излучения [1–2]. Широко используемые рентгеновские зеркальные и многослойные элементы обладают также большими aberrациями и относительно низким разрешением [3]. Известно, что в мягкой рентгеновской области спектра для получения изображений применяются зонные пластины Френеля, на основе которых созданы рентгеновские микроскопы [4]. Но разрешение зонных пластин Френеля, а также рентгеновских голограммных оптических элементов (ГОЭ), ограничено хроматическими и монохроматическими aberrациями [5]. Достигнутые в последние годы успехи в создании компактных рентгеновских лазеров [6] расширяют возможности создания рентгеновских ГОЭ с исправленными aberrациями. Расчеты aberrаций рентгеновских ГОЭ, например в [5, 7], проводятся подобно расчетам aberrаций ГОЭ видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра [8–11]. Известно, что толщина ГОЭ вносит дополнительные объемные aberrации в изображение [9–11]. Однако при изготовлении объемных рентгеновских ГОЭ могут иметь место неизотропность показателя преломления и коэффициента усадки голографической среды. Эти изменения приводят к отклонению в рабочей схеме от условий дифракции Брэгга и возникновению дополнительных aberrаций в изображении.

Целью работы является разработка теории aberrаций объемных рентгеновских ГОЭ с учетом неизотропности показателя преломления и коэффициента усадки голографической среды.

Характеристическая функция объемного рентгеновского ГОЭ. В общем случае для объемного рентгеновского ГОЭ длина волны записи λ_c , рабочая длина волны λ_o , показатели преломления n_c , n_o и объем голографической среды на стадии восстановления и записи различаются. Известно, что для неизотропных сред показатель преломления и коэффициент усадки представляются в тензорном виде. В дальнейшем объемный рентгеновский ГОЭ будем называть просто объемным ГОЭ.

На рис. 1, а и 2, а представлены схемы восстановления (рабочие схемы) пропускающего и отражающего объемного ГОЭ, где $P_c(x_c, y_c, z_c)$ – точка предмета и соответствующая ей $P_i(x_i, y_i, z_i)$ – точка изображения, $M(x, y, z)$ – произвольная точка объемного ГОЭ. На рис. 1 и 2 ось Oz декартовой системы координат является оптической осью и направлена перпендикулярно поверхностям ГОЭ. Плоскость координат xOy проходит через центр ГОЭ (ось Ox не указана). На рис. 1, б и 2, б представлены схемы записи объемного ГОЭ опорной и объектной сферическими волнами, где $P_r(x_r, y_r, z_r)$ – точечный источник опорной (референтной) волны, $P_o(x_o, y_o, z_o)$ – точечный источник объектной волны, $M'(x', y', z')$ – точка объема ГОЭ при записи, соответствующая точке $M(x, y, z)$ при восстановлении, причем $x' = x/m_x$, $y' = y/m_y$, $z' = z/m_z$, а m_x , m_y , m_z – коэффициенты усадки (набухания) объемного ГОЭ вдоль соответствующих осей координат. Расстояния, указанные в рабочей схеме, равны: $P_cM = l_c$, $MP_i = l_i$, $P_cO = d_c$, $OP_i = d_i$. Расстояния в схеме записи равны: $P_rM' = l_r$, $M'P_o = l_o$, $P_rO = d_r$, $OP_o = d_o$.

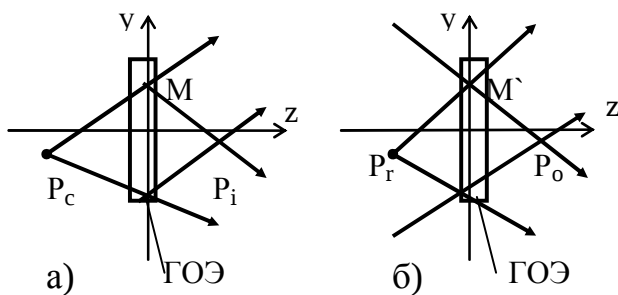


Рис. 1. Схема восстановления (а) и записи (б) пропускающего объемного ГОЭ

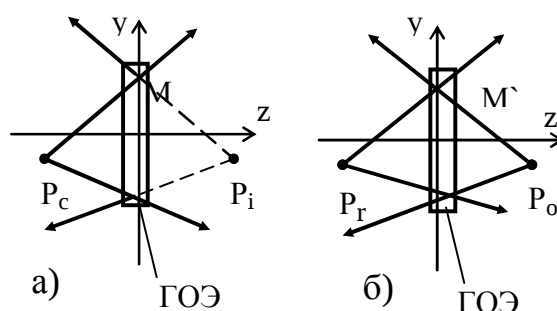


Рис. 2. Схема восстановления (а) и записи (б) отражающего объемного ГОЭ

Известно, что в рентгеновской области спектра показатели преломления сред близки к единице, поэтому в первом порядке можно не учитывать преломление на поверхностях ГОЭ. Для расчетов изображающих и

абберационных свойств объемного ГОЭ обычно применяется характеристическая функция $V(x,y,z)$, равная разности эйконолов и записываемая в виде [7, 10, 11]

$$V(x,y,z) = n_c[l_c - d_c \pm (l_i - d_i)] - km(x,y,z)\lambda_c/n_c,$$

где $m(x, y, z) = n_o(l_r - d_r \pm (l_o - d_o))/\lambda_o$ – величина, характеризующая пространственное распределение модуляции показателя преломления, модуляции коэффициента поглощения или модуляции толщины, n_o и n_c – начальное и конечное значения показателя преломления, λ_o – длина волны лазера, используемого при записи, λ_c – рабочая длина волны, k – порядок дифракции. Верхний знак «плюс» в выражениях для $V(x,y,z)$, $m(x,y,z)$ и в последующих выражениях соответствует отражающим объемным ГОЭ, а нижний знак «минус» – пропускающим объемным ГОЭ.

Характеристическая функция $V(x,y,z)$ может быть представлена в виде суммы характеристических функций аббераций [7,10]. В характеристической функции $V(x,y,z)$ расстояния l_j могут быть разложены по величинам малости x_j/d_j , y_j/d_j , z/d_j (индексы $j = c, i, r, o$) и в явном виде выделены члены разложения, описывающие абберации как зависящие, так и независящие от толщины ГОЭ (координаты z) [7]

$$V(x, y, z) = V_o^t(x, y, z) + V_o^v(x, y, z) + V_1^t(x, y, z) + V_1^v(x, y, z) + \\ + V_3^t(x, y, z) + V_3^v(x, y, z) + \dots,$$

где $V_o^t(x, y, z) = -xB_{100} - yB_{010}$ – характеристическая функция для вычисления абберации увеличения тонкого ГОЭ;

$V_o^v(x, y, z) = -xzB_{101} - xz^2B_{102} - yzB_{011} - yz^2B_{012}$ – характеристическая функция для вычисления объемной абберации увеличения;

$V_1^t(x, y, z) = x^2F_{200}/2 + y^2F_{020}/2$ – характеристическая функция для вычисления дефокусировки тонкого ГОЭ;

$V_1^v(x, y, z) = (x^2/2)(zF_{201} + z^2F_{202}) + (y^2/2)(zF_{021} + z^2F_{022})$ – характеристическая функция для вычисления объемной дефокусировки;

$$V_3^t(x,y,z) = -(x^4/8)S_{400} - (x^2y^2/4)S_{220} - (y^4/8)S_{040} + (x^3/2)C_{300} + (x^2y/2)C_{210} + \\ + (y^2x/2)C_{120} + (y^3/2)C_{030} - (x^2/2)A_{200} - xyA_{110} - (y^2/2)A_{020} -$$

–характеристическая функция для вычисления аббераций третьего порядка тонкого ГОЭ;

$V_3^v(x,y,z) = -(x^4/8)(3zS_{401} + 6z^2S_{402}) - (x^2y^2/4)(3zS_{221} + 6z^2S_{222}) - (y^4/8)(3zS_{041} + 6z^2S_{042}) + (x^3/2)(3zC_{301} + 6z^2C_{302}) + (x^2y/2)(3zC_{211} + 6z^2C_{212}) + \\ + (xy^2/2)(3zC_{121} + 6z^2C_{122}) + (y^3/2)(3zC_{031} + 6z^2C_{032}) - \\ - (x^2/2)(3zA_{201} + 6z^2A_{202}) - xy(3zA_{111} + 6z^2A_{112}) - (y^2/2)(3zA_{021} + 6z^2A_{022}) -$
– характеристическая функция для вычисления объемных аббераций третьего порядка.

По аналогии с абберациями тонкого ГОЭ члены разложения в характеристических функциях $V_o^t(x,y,z)$, $V_o^v(x,y,z)$, $V_1^t(x,y,z)$, $V_1^v(x,y,z)$, $V_3^t(x,y,z)$, $V_3^v(x,y,z)$ соответствуют известным элементарным типам аббераций первого и третьего порядков [3-6]. Так члены разложения с коэффициентами B_{100} , B_{010} , B_{101} , B_{011} , B_{102} , B_{012} описывают абберации увеличения, F_{200} , F_{020} , F_{201} , F_{021} , F_{202} , F_{022} , - дефокусировку, S_{400} , S_{220} , S_{040} , S_{401} , S_{402} , S_{221} , S_{222} , S_{041} , S_{042} - сферическую абберацию, C_{300} , C_{210} , C_{120} , C_{030} , C_{301} , C_{302} , C_{211} , C_{212} , C_{121} , C_{122} , C_{031} , C_{032} - кому,

A_{200} , xuA_{110} , A_{020} , A_{201} , A_{202} , A_{111} , A_{112} , A_{021} , A_{022} – астигматизм. Явный вид этих абберрационных коэффициентов приведен в Приложении. Абберрационные коэффициенты для осевого объемного ГОЭ значительно упрощаются. Выражения для коэффициентов B_{100} , B_{010} , F_{200} , F_{020} , S_{400} , S_{040} , C_{300} , C_{030} , A_{200} , A_{110} , A_{020} совпадают с известными коэффициентами тонкого ГОЭ [7–11].

Для объемного ГОЭ условие его локальной селективности можно представить в виде

$$V_o^v(x,y,z) \leq \xi = \xi_x + \xi_y,$$

где параметры расстройки ξ , ξ_x и ξ_y зависят от рабочей длины волны и определяются экспериментально. Параметры ξ , ξ_x и ξ_y характеризуют величину отклонения от условий дифракции Брэгга. Их величина зависит не только от отклонений угла падения луча на поверхность ГОЭ и рабочей длины волны от заданных, но и от неизотропности изменений показателя преломления и усадки голографической среды. Координаты крайних от оптической оси Oz точек падения луча равны

$$x = -\xi_x/zB_{101}, y = -\xi_y/zB_{011}. \quad (1)$$

При оценочных расчетах величину ξ можно принять равной приблизительно рабочей длине волны λ_c . Критерием выполнения условия дифракции Брэгга может служить критерий Релея $\xi \leq \lambda_c/4$.

Геометрические абберрации объемного рентгеновского ГОЭ. Из характеристической функции $V(x, y, z)$ могут быть определены геометрические абберрации точек изображения. Отклонения Δx , Δy координат пересечения лучей, образующих изображение выбранной точки предмета, от параксиального точечного изображения определяются из формул

$$\begin{aligned} \Delta x &\approx d_j(\partial V(x,y,z)/\partial x); \\ \Delta y &\approx d_j(\partial V(x,y,z)/\partial y) \end{aligned} \quad (2)$$

и могут быть представлены в виде суммы двух компонентов – аббераций тонкого ГОЭ и объемных абберраций. Известно, что объемные абберрации зависят от толщины ГОЭ как линейно, так и нелинейно [2]. Также объемные абберрации могут быть разложены по известным элементарным абберрациям. Так подставляя характеристическую функцию $V(x, y, z) = V_o^t(x, y, z) + V_o^v(x, y, z)$ в формулы (2) получаем абберацию увеличения точки изображения от заданного положения [7]

$$\begin{aligned} \Delta x &= B_{100}d_i + (zB_{101} + z^2B_{102})d_i; \\ \Delta y &= B_{010}d_i + (zB_{011} + z^2B_{012})d_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя характеристическую функцию $V(x,y,z) = V_1^t(x,y,z) + V_1^v(x,y,z)$ в формулы (2) получаем абберацию осевого астигматизма первого порядка в виде

$$\begin{aligned} \Delta x &= -F_{200}d_i\xi_x/zB_{101} - (F_{201} + zF_{202})d_i\xi_x/B_{101}; \\ \Delta y &= -F_{020}d_i\xi_y/zB_{011} - (F_{021} + zF_{022})d_i\xi_y/B_{011}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя характеристическую функцию $V(x,y,z) = V_3^t(x,y,z) + V_3^v(x,y,z)$ в формулы (2) получаем осевую астигматическую абберацию третьего порядка (по другому ее можно назвать эллипсной абберрацией) в виде

$$\Delta x = (S_{400} + 3zS_{401} + 6z^2S_{402})d_i\xi_x^3/2z^3B_{101}^3 + (S_{220} + 3zS_{221} + 6z^2S_{222})d_i\xi_x\xi_y^2/2z^3B_{101}B_{011}^2;$$

$$\Delta y = (S_{040} + 3zS_{041} + 6z^2S_{042})d_i\xi_y^3/2z^3B_{011}^3 + (S_{220} + 3zS_{221} + 6z^2S_{222})d_i\xi_x^2\xi_y/2z^3B_{101}^2B_{011},$$

астигматическую кому в виде

$$\Delta x = 3(C_{300} + 3zC_{301} + 6z^2C_{302})d_i\xi_x^2/2z^2B_{101}^2 + (C_{210} + 3zC_{211} + 6z^2C_{212})d_i\xi_x\xi_y/2z^2B_{101}B_{011} + (C_{120} + 3zC_{121} + 6z^2C_{122})\xi_y^2/2z^2B_{011}^2;$$

$$\Delta y = (C_{210} + 3zC_{211} + 6z^2C_{212})d_i\xi_x^2/2z^2B_{101}^2 + (C_{120} + 3zC_{121} + 6z^2C_{122})d_i\xi_x\xi_y/2z^2B_{101}B_{011} + 3(C_{030} + 3zC_{031} + 6z^2C_{032})d_i\xi_y^2/2z^2B_{011}^2,$$

и астигматизм третьего порядка в виде

$$\Delta x = (A_{200} + 3zA_{201} + 6z^2A_{202})d_i\xi_x/zB_{101} + (A_{110} + 3zA_{111} + 6z^2A_{112})d_i\xi_y/zB_{011},$$

$$\Delta y = (A_{110} + 3zA_{111} + 6z^2A_{112})d_i\xi_x/zB_{101} + (A_{020} + 3zA_{021} + 6z^2A_{022})d_i\xi_y/zB_{011}.$$

Обсуждение результатов. Учет селективности объемного ГОЭ, в частности из-за неизотропности показателя преломления и коэффициента усадки голографической среды, позволил выделить некоторые отличительные особенности aberrаций и других характеристик объемного ГОЭ. Так, из выражений (3) aberrаций увеличения изображения следует, что в параксиальной области эта aberrация зависит от толщины, но не зависит от параметров расстройки ξ , ξ_x и ξ_y объемного ГОЭ. Осевой астигматизм первого порядка (4) обратно пропорционален толщине объемного ГОЭ. Следовательно, у объемного ГОЭ эта aberrация меньше чем у тонкого ГОЭ. Кроме этого у осевого астигматизма первого порядка возникает постоянная составляющая, независимая от толщины. Как и все остальные aberrации (более высоких порядков), осевой астигматизм первого порядка зависит от параметров расстройки ξ_x и ξ_y . Еще одной особенностью является тот факт, что все aberrации третьего порядка объемного ГОЭ меньше aberrаций тонкого ГОЭ, что является следствием уменьшения объема ГОЭ, в котором выполняется условие дифракции Брэгга. Участок поверхности ГОЭ, ограничивающий этот объем будем называть эффективной поверхностью. Меньший размер эффективной поверхности по сравнению со всей поверхностью объемного ГОЭ приводит не только к снижению его дифракционной эффективности, но и уменьшению aberrаций.

С практической точки зрения важной особенностью является повышение глубины резкости изображения объемного ГОЭ. Глубина резкости увеличивается вследствие уменьшения aberrаций. Повышенная глубина резкости облегчает процесс юстировки и настройки на плоскость изображения, что особенно важно в таких областях спектра как вакуумный ультрафиолет и мягкий рентген. В этих диапазонах спектра из-за поглощения молекулами воздуха излучения объемные ГОЭ и вся рабочая схема размещается в вакууме. Поэтому возможности юстировки плоскости изображения объемного ГОЭ очень ограничены и представляют собой технически сложную задачу.

Следующей особенностью является уменьшение отношения сигнал/шум объемного ГОЭ. Действительно, при снижении дифракционной эффективности, происходит одновременный рост интенсивности прошедшего (для пропускающего объемного ГОЭ) и отраженного (для отражающего объемного ГОЭ) излучений, приводящие к увеличению уровня шума в формируемом изображении.

Заключение. Таким образом, учет изменения и неизотропности показателя преломления и коэффициента усадки объемного рентгеновского ГОЭ приводит:

- К трансформации известных aberrаций объемного рентгеновского ГОЭ, а именно превращению дефокусировки в осевой астигматизм первого порядка, сферической aberrации – в осевой астигматизм третьего порядка (эллипсную aberrацию), а комы – в астигматическую кому;
- К снижению aberrаций по сравнению с aberrациями тонкого рентгеновского ГОЭ и к снижению дифракционной эффективности из-за уменьшения объема ГОЭ, в котором выполняется условие дифракции Брэгга;
- К уменьшению отношения сигнал/шум объемного ГОЭ из-за снижения дифракционной эффективности и роста шума изображения;
- К повышению глубины резкости изображения по сравнению с тонким рентгеновским ГОЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аристов, В.В. Современные достижения рентгеновской оптики преломления / В.В. Аристов, Л.Г. Шабельников // УФН. –2008. – Т. 178, № 1. – С. 61-83.
2. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B.// Nature. –1996. – V. 384. – P. 49.
3. Виноградов, А.В. Зеркальная рентгеновская оптика / А.В. Виноградов, И.А. Брытов, А.Я. Грудский, И.В. Кожевников, М.Т. Коган, В.А. Слемзин // Под общ. ред. А.В. Виноградова. – Л: Машиностроение, 1989. – 467 с.
4. Рентгеновская оптика и микроскопия / под ред. Г. Шмаля, Д. Рудольфа; пер. с англ. Н.Н. Зорева и И.В. Кожевникова; под ред. А.В. Виноградова. – М.: Мир, 1987. – 464 с.
5. Мишетт, А. Оптика мягкого рентгеновского излучения / А. Мишетт // Пер. с англ. Н.Н. Зорева и И.В. Кожевникова; под ред. А.В. Виноградова. – М.: Мир. – 1989. – 352 с.
6. Рагозин Е.Н. Лазерные источники в мягкой рентгеновской области спектра / Е.Н. Рагозин, И.И. Собельман // УФН. – 2005. – Т. 175, № 12. – С. 1339-1341.
7. Батомункуев, Ю.Ц. Рентгеновские объемные голограммные элементы / Ю.Ц. Батомункуев // Мат. IV Междун. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008». – Новосиб., 2008. – Т. 4., Ч.1. – С. 25–35.
8. Meier R.W. Magnification and third-order aberration in holography // JOSA. –1965. – V. 55, N. 8. – P. 987–992.
9. Forshaw M.R.B. The imaging properties and aberrations of thick transmission holograms // Opt. Acta. –1973. –V. 20, N. 9. – P. 669–686.
10. Ган, М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984.–140 с.

11. Батомункуев, Ю.Ц. Абберации объемных голограмм / Ю.Ц. Батомункуев, Е. А. Сандер, С. А. Шойдин // Тез. Всесоюз. семинара "Автоматизация проектирования оптических систем". – М., 1989. – С.101–112.

ПРИЛОЖЕНИЕ. Абберационные коэффициенты объемного ГОЭ

$$\begin{aligned} B_{100} &= x_c/d_c - x_i/d_i \pm (k\mu/m_x)(x_r/d_r - x_o/d_o); B_{010} = y_c/d_c - y_i/d_i \pm (k\mu/m_y)(y_r/d_r - y_o/d_o); \\ B_{101} &= x_c/d_c^2 - x_i/d_i^2 \pm (k\mu/m_x m_z)(x_r/d_r^2 - x_o/d_o^2); B_{011} = y_c/d_c^2 - y_i/d_i^2 \pm \\ &(k\mu/m_y m_z)(y_r/d_r^2 - y_o/d_o^2); \\ B_{102} &= x_c/d_c^3 - x_i/d_i^3 \pm (k\mu/m_x m_z^2)(x_r/d_r^3 - x_o/d_o^3); B_{012} = y_c/d_c^3 - y_i/d_i^3 \pm \\ &(k\mu/m_z^2 m_y)(y_r/d_r^3 - y_o/d_o^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{200} &= 1/d_c - 1/d_i \pm (k\mu/m_x^2)(1/d_r - 1/d_o); F_{020} = 1/d_c - 1/d_i \pm (k\mu/m_y^2)(1/d_r - 1/d_o); \\ F_{201} &= 1/d_c^2 - 1/d_i^2 \pm (k\mu/m_x^2 m_z)(1/d_r^2 - 1/d_o^2); F_{021} = 1/d_c^2 - 1/d_i^2 \pm (k\mu/m_y^2 m_z)(1/d_r^2 - \\ &1/d_o^2); \\ F_{202} &= 1/d_c^3 - 1/d_i^3 \pm (k\mu/m_x^2 m_z^2)(1/d_r^3 - 1/d_o^3); F_{022} = 1/d_c^3 - 1/d_i^3 \pm \\ &(k\mu/m_y^2 m_z^2)(1/d_r^3 - 1/d_o^3); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{400} &= 1/d_c^3 - 1/d_i^3 \pm (k\mu/m_x^4)(1/d_r^3 - 1/d_o^3); S_{040} = 1/d_c^3 - 1/d_i^3 \pm (k\mu/m_y^4)(1/d_r^3 - \\ &1/d_o^3); \\ S_{401} &= 1/d_c^4 - 1/d_i^4 \pm (k\mu/m_x^4 m_z)(1/d_r^4 - 1/d_o^4); S_{041} = 1/d_c^4 - 1/d_i^4 \pm (k\mu/m_y^4 m_z)(1/d_r^4 - \\ &1/d_o^4); \\ S_{402} &= 1/d_c^5 - 1/d_i^5 \pm (k\mu/m_x^4 m_z^2)(1/d_r^5 - 1/d_o^5); S_{042} = 1/d_c^5 - 1/d_i^5 \pm \\ &(k\mu/m_y^4 m_z^2)(1/d_r^5 - 1/d_o^5); \\ S_{220} &= 1/d_c^3 - 1/d_i^3 \pm (k\mu/m_x^2 m_y^2)(1/d_r^3 - 1/d_o^3); \\ S_{221} &= 1/d_c^4 - 1/d_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_y^2 m_z)(1/d_r^4 - 1/d_o^4); \\ S_{222} &= 1/d_c^5 - 1/d_i^5 \pm (k\mu m_x^2 m_y^2 m_z^2)(1/d_r^5 - 1/d_o^5); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{300} &= x_c/d_i^3 - x_i/d_c^3 \pm (k\mu/m_x^3)(x_r/d_r^3 - x_o/d_o^3); C_{030} = y_c/d_c^3 - y_i/d_i^3 \pm (k\mu/m_y^3)(x_r/d_r^3 - \\ &x_o/d_o^3); \\ C_{301} &= x_c/d_c^4 - x_i/d_i^4 \pm (k\mu/m_x^3 m_z)(x_r/d_r^4 - x_o/d_o^4); C_{031} = y_c/d_c^4 - y_i/d_i^4 \pm \\ &(k\mu/m_y^3 m_z)(y_r/d_r^4 - y_o/d_o^4); \\ C_{302} &= x_c/d_c^5 - x_i/d_i^5 \pm (k\mu/m_x^3 m_z^2)(x_r/d_r^5 - x_o/d_o^5); C_{032} = y_c/d_c^5 - y_i/d_i^5 \pm \\ &(k\mu/m_y^3 m_z^2)(x_r/d_r^5 - x_o/d_o^5); \\ C_{120} &= x_c/d_c^3 - x_i/d_i^3 \pm (k\mu/m_x m_y^2)(x_r/d_r^3 - x_o/d_o^3); C_{210} = y_c/d_c^3 - y_i/d_i^3 \pm \\ &(k\mu/m_x^2 m_y)(y_r/d_r^3 - y_o/d_o^3); \\ C_{121} &= x_c/d_c^4 - x_i/d_i^4 \pm (k\mu/m_x m_y^2 m_z)(x_r/d_r^4 - x_o/d_o^4); C_{211} = y_c/d_c^4 - \\ &y_i/d_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_y m_z)(y_r/d_r^4 - y_o/d_o^4); \\ C_{122} &= x_c/d_c^5 - x_i/d_i^5 \pm (k\mu/m_x m_y^2 m_z^2)(x_r/d_r^5 - x_o/d_o^5); C_{202} = y_c/d_c^5 - \\ &y_i/d_i^5 \pm (k\mu/m_x^2 m_y m_z^2)(y_r/d_r^5 - y_o/d_o^5); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{200} &= x_c^2/d_c^3 - x_i^2/d_i^3 \pm (k\mu/m_x^2)(x_r^2/d_r^3 - x_o^2/d_o^3); A_{020} = y_c^2/d_c^3 - y_i^2/d_i^3 \pm \\ &(k\mu/m_y^2)(y_r^2/d_r^3 - y_o^2/d_o^3); \\ A_{201} &= x_c^2/d_c^4 - x_i^2/d_i^4 \pm (k\mu/m_x^2 m_z)(x_r^2/d_r^4 - x_o^2/d_o^4); A_{021} = y_c^2/d_c^4 - \\ &y_i^2/d_i^4 \pm (k\mu/m_y^2 m_z)(x_r^2/d_r^4 - x_o^2/d_o^4); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{202} &= x_c^2/d_c^5 - x_i^2/d_i^5 \pm (k\mu/m_x^2 m_z^2)(x_r^2/d_r^5 - x_o^2/d_o^5); \quad A_{022} = y_c^2/d_c^5 - y_i^2/d_i^5 \pm \\
&(k\mu/m_y^2 m_z^2)(x_r^2/d_r^5 - x_o^2/d_o^5); \\
A_{110} &= x_c y_c/d_c^3 - x_i y_i/d_i^3 \pm (k\mu/m_x m_y)(x_r y_r/d_r^3 - x_o y_o/d_o^3); \\
A_{111} &= x_c y_c/d_c^4 - x_i y_i/d_i^4 \pm (k\mu/m_x m_y m_z)(x_r y_r/d_r^4 - x_o y_o/d_o^4); \\
A_{112} &= x_c y_c/d_c^5 - x_i y_i/d_i^5 \pm (k\mu/m_x m_y m_z^2)(x_r y_r/d_r^5 - x_o y_o/d_o^5).
\end{aligned}$$

© Ю.Ц. Батомункуев, 2009

УДК 621

А.Н. Лузин

СГГА, Новосибирск

ПРИВЕДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ФОРМУЛ КУРСА ФИЗИКИ К ВИДУ, ВИЗУАЛЬНО АНАЛИЗИРУЕМОМУ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ПЕРЕГИБА

A.N. Luzin

SSGA, Novosibirsk

ADDUCTION OF SOME PHYSICAL FORMULAS TO TYPE, VISUALY ANALYSED IN POINT OF BEND

Some physical formulas are presented to other type which allow to define the points of bend of their graphics.

Многочлены и дробные рациональные функции легко приводятся к виду, позволяющему без дополнительных аналитических преобразований увидеть, что при некотором значении аргумента x функция $y(x)$ имеет точку перегиба. Для начала возьмем функцию из вузовского задачника по математике - локон Аньези: $y(x) = 1/(3+x^2)$. После преобразований

$$y(x) = \frac{1}{3+x^2} = \frac{1}{4} - \frac{1}{8}(x-1) + (x-1)^3/[8(3+x^2)]. \quad (1)$$

Из (1) без аналитических манипуляций ясно, что $y(1) = 1/4$, $y'(1) = -1/8$, $y''(1) = 0$, $y'''(1) \neq 0$. А отсюда с очевидностью следует, что точка, где $x=1$, является точкой перегиба. Последнее из формулы (1) легко увидеть и не пользуясь понятием производной. Для этого сначала необходимо обратить внимание на то, что функция $\varphi(x) = \frac{1}{4} - \frac{1}{8}(x-1)$ есть уравнение прямой линии, касательной к $y(x)$ в точке, где $x=1$. После чего легко увидеть, что при $x=1$ функция $y(x)$ обязательно пересекается с касательной к ней прямой линией $\varphi(x)$. Пересекается в том смысле, что в окрестности точки, где $x=1$ разность $y(x) - \varphi(x) = (x-1)^3/[8(3+x^2)] > 0$, если $x > 1$ и $y(x) - \varphi(x) < 0$, если $x < 1$. При этом $y(1) = \varphi(1) = 1/4$.

Из третьего слагаемого правой части соотношения (1) видно, что вблизи точки перегиба (вблизи $x=1$) функция $y(x)$ отклоняется от касательной к ней прямой при $x < 1$ сильнее, чем при $x > 1$. Имеется в виду, что $\left| [y(x) - \varphi(x)]_{x=1-\delta} \right| > [y(x) - \varphi(x)]_{x=1+\delta}$.

Для вывода формулы (1) здесь использовано то, что если $y''(x_0)=0$, $y'''(x_0)\neq 0$, то в результате деления разности $y(x)-y(x_0)-y'(x_0)(x-x_0)$ на $(x-x_0)^3$ получается непрерывная и не равная нулю при $x=x_0$ функция.

В том, что новая формула совпадает с исходной, легко убедиться, если воспользовавшись простейшими алгебраическими преобразованиями, из новой формулы получить исходную.

Одним из немногих случаев в физике, когда детально исследовались точки перегиба, являются исследования уравнения Ван-дер-Ваальса. В них принимали участие даже профессиональные математики (см., например, [1], с. 179, 180).

Уравнение Ван-дер-Ваальса – это уравнение состояния реального (неидеального) газа. Оно записывается обычно для одного моля газа и имеет следующий вид:

$$P(V,T)=\frac{RT}{V-b}-\frac{a}{V^2}. \quad (2)$$

В результате предложенных здесь преобразований его можно привести к визуально анализируемому вблизи $V=3b$ виду, рассматривая в уравнении (2) объем V как аргумент функции P , а температуру T как постоянный параметр:

$$P(V,T)=\frac{R[T-8a/(27bR)]}{V-b}-\frac{a(V-3b)^3}{27b^2V^2(V-b)}+\frac{a}{27b^2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) приобретает довольно простой вид, если $T-8a/(27bR)=0$. Оно превращается в уравнение изотермы с температурой $T=8a/(27bR)=T_K$. Это так называемая критическая температура. При этой температуре изотерма имеет вид:

$$P(V,T_K)=\frac{-a(V-3b)^3}{27b^2V^2(V-b)}+\frac{a}{27b^2}. \quad (4)$$

Без дополнительных преобразований из уравнения изотермы (4) видно, что она имеет точку перегиба, координаты которой $V=V_K=3b$ и $P=P_K=a/27b^2$. Первая и вторая производные изотермы (4) в этой точке равны нулю.

Из соотношения (3) тоже без дополнительных математических преобразований видно, чему равны эти производные для других изотерм, ($T\neq T_K$), но для того же значения объема $V=3b$. Это производные для первого из трех слагаемых (3).

В учебниках и учебных пособиях по физике почему-то редко обращают внимание на точки перегиба в формулах зависимости одной величины от другой. Между тем на графиках эти точки зрительно очень даже заметны. Ярким примером того, что точки перегиба изображены там, где они должны отсутствовать, являются многие учебники и учебные пособия по физике (общей и теоретической), где на одном и том же широко известном рисунке приведены графики трех различных распределений частиц по энергиям.

Это распределение Максвелла – Больцмана

$$n_p(\varepsilon) = A \exp(-\varepsilon / kT), \quad (5)$$

распределение Ферми – Дирака

$$n_p(\varepsilon) = \left\{ \exp\left[(\varepsilon - \mu) / kT\right] + 1 \right\}^{-1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{th}\left[(\varepsilon - \mu) / 2kT\right]. \quad (6)$$

и распределение Бозе – Эйнштейна

$$n_p(\varepsilon) = \left\{ \exp\left[(\varepsilon - \mu) / kT\right] - 1 \right\}^{-1} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{cth}\left[(\varepsilon - \mu) / 2kT\right]. \quad (7)$$

Упомянутый рисунок приведен даже в пятитомной «Физической энциклопедии» [2]. Но из трёх распределений только распределение Ферми – Дирака имеет точку перегиба. Действительно, распределение (5) – это экспонента, а она точек перегиба не имеет. После простейших преобразований оказалось, что распределение Ферми-Дирака является тангенсом гиперболическим, а распределение Бозе – Эйнштейна – котангенсом гиперболическим. Эти функции, как и экспонента, давно и хорошо проанализированы в математике. Их графики и разложения в ряд можно найти в вузовских учебниках по математике, а в справочниках по математике имеются даже таблицы значений этих функций (смотри, например, справочник И.Н. Бронштейна и К.А. Семендяева).

Тангенс гиперболический, как и котангенс, является нечетной функцией. График функции $y(x) = \operatorname{th}x$ расположен между двумя параллельными прямыми $y=1$ и $y=-1$ – асимптотами гиперболического тангенса.

Из визуально анализируемого разложения в ряд тангенса гиперболического

$$\operatorname{th}x = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + \dots$$

видно, что при $x=0$ функция $\operatorname{th}x$ имеет точку перегиба. В этой точке $\operatorname{th}x = 0$, а угол наклона касательной в этой точке равен 45° . Поэтому для катетов треугольника, вершины которого находятся на пересечениях этой касательной с асимптотами, выполняется соотношение: $\Delta x = \Delta \operatorname{th}x = 2$. А соответствующее равенство для распределения Ферми-Дирака имеет вид

$$\Delta\left(\frac{\varepsilon - \mu}{2kT}\right) = \Delta\left(\frac{\varepsilon}{2kT}\right) = 2.$$

Откуда

$$\Delta\varepsilon = 4kT. \quad (8)$$

При изложении статистической физики принято пользоваться понятием «ширина зоны размытости распределения Ферми-Дирака». На графике $n_p(\varepsilon)$ это величина интервала значений энергии ε , на котором $n(\varepsilon)$ зрительно изменяется от единицы до нуля. Из формулы (8) и графика $n_p(\varepsilon)$ следует, что ширина зоны размытости значительно больше $4kT$ и, пожалуй, больше даже $8kT$. С точки зрения педагогики кажется сомнительной необходимость на графике $n_p(\varepsilon)$ ширину зоны размытости обозначать равной kT , как это делается, например, на рис. 1 в статье [2].

Ширину зоны размытости без дополнительных преобразований легко оценить, исходя и из других представлений распределения Ферми-Дирака в визуально анализируемом виде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов, В.И. Курс высшей математики. Т. 1. 21-е изд. испр. / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 479 с.
2. Питаевский, Л.П. Статистическая физика / Л.П. Питаевский // Физическая энциклопедия. – 1994. - Т. 4.– С. 665-673.

© *А.Н. Лузин*, 2009

УДК 621

Н.А. Шергунова, А.В. Бритвин, Б.В. Поллер

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

N.A. Shergunova, A.V. Britvin, B.V. Poller

Institute of Laser Physics, Novosibirsk

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF VEGETATION AND HYPSOGRAPHY ON THE OPTICAL SYSTEMS OF MONITORING

In the article the method of preliminary estimation and results of calculation of hypsography is rotined for the setting of optical sensors and optical telecommunication systems of the ecological monitoring.

Для контроля различных параметров окружающей среды необходимо распределение датчиков на местности. В зависимости от ситуации данные могут передаваться проводными (электрические, оптоволоконные кабели) или беспроводными (радиоканал, оптический канал) методами. Каждая система имеет свои плюсы и минусы. В зависимости от рельефа и растительности необходимо выбирать оптимальный тип передачи данных для конкретного случая. Рассмотрим оптическую связь. Возможно использование оптической связи с прямой видимостью, так и без прямой видимости [1]. Для выбора конфигурации системы, методов передачи данных необходимо предварительно оценить характер рельефа и растительности.

В качестве модельной зоны были взяты два участка размером 500 на 500 метров в районе с лесом на территории Академгородка, около поселка Ключи и Кольцово. На этих участках условно расположили равномерную сеть датчиков с шагом 90 метров. Далее были вычислены координаты каждого из датчиков. В таблице 1 представлены координаты для датчиков на участке около поселка Ключи. В таблице 2 представлены координаты датчиков на участке около поселка Кольцово. Условные обозначения: С – широта; Е – долгота.

Далее была создана GRID модель рельефа на исследуемую территорию по данным SRTM v2 с помощью программного продукта Erdas.

SRTM (Shuttle radar topographic mission) – это радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных (> 60), самых южных широт (> 54), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000 года с помощью специальной радарной системы. Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR, было собрано более 12 терабайт данных. В результате миссии NASA по топографической съёмке

общественности стали доступны карты высот с разрешением около 90х90 м сначала версии 1, а потом и SRTM v2.

Данные являются простым 16 битным растром (без заголовка), значение пиксела является высотой над уровнем моря в данной точке, пиксела также может принимать значение -32768, что соответствует значению no data (нет данных). Для избавления от no data использовались средства программного продукта Erdas.

На основе данных о рельефе была вычислена относительная высота для каждого из датчиков (таблица 3, 4).

Определение растительного покрова в точках расположения датчиков

В основном, по видовому составу, флора Новосибирской области незначительно отличается от флоры Средней Европы, хотя встречаются и некоторые чисто сибирские виды. Всего на территории области отмечено около 1 200 видов высших дикорастущих растений.

Таблица 1. Координаты датчиков на участке около поселка Ключи

Строка	Столбец				
	1	2	3	4	5
1	54°51'31.64"N 83°15'6.99"E	54°51'29.74"N 83°15'10.81"E	54°51'27.84"N 83°15'14.63"E	54°51'25.94"N 83°15'18.45"E	54°51'24.04"N 83°15'22.27"E
2	54°51'29.45"N 83°15'3.66"E	54°51'27.55"N 83°15'7.48"E	54°51'25.65"N 83°15'11.30"E	54°51'23.75"N 83°15'15.12"E	54°51'21.85"N 83°15'18.94"E
3	54°51'27.26"N 83°15'0.33"E	54°51'25.36"N 83°15'4.15"E	54°51'23.46"N 83°15'7.97"E	54°51'21.56"N 83°15'11.79"E	54°51'19.66"N 83°15'15.61"E
4	54°51'25.07"N 83°14'57.00"E	54°51'23.17"N 83°15'00.82"E	54°51'21.27"N 83°15'4.64"E	54°51'19.37"N 83°15'8.46"E	54°51'17.47"N 83°15'12.28"E
5	54°51'22.88"N 83°14'53.67"E	54°51'20.98"N 83°14'57.49"E	54°51'19.08"N 83°15'1.31"E	54°51'17.17"N 83°15'5.13"E	54°51'15.28"N 83°15'8.95"E

Таблица 2. Координаты датчиков на участке около поселка Кольцово

Строка	Столбец				
	1	2	3	4	5
1	54°53'57.11"N 83°11'6.42"E	54°53'55.21"N 83°11'10.24"E	54°53'53.31"N 83°11'14.06"E	54°53'51.41"N 83°11'17.88"E	54°53'49.51"N 83°11'21.70"E
2	54°53'54.92"N 83°11'3.09"E	54°53'53.02"N 83°11'6.91"E	54°53'51.12"N 83°11'10.73"E	54°53'49.22"N 83°11'14.55"E	54°53'47.32"N 83°11'18.35"E
3	54°53'52.73"N 83°10'59.76"E	54°53'50.83"N 83°11'3.58"E	54°53'48.93"N 83°11'7.40"E	54°53'47.03"N 83°11'11.22"E	54°53'45.13"N 83°11'15.04"E
4	54°53'50.54"N 83°10'56.43"E	54°53'48.64"N 83°11'0.43"E	54°53'46.74"N 83°11'4.07"E	54°53'44.84"N 83°11'7.89"E	54°53'42.94"N 83°11'11.71"E
5	54°53'48.35"N 83°10'53.10"E	54°53'46.45"N 83°10'56.92"E	54°53'44.55"N 83°11'0.74"E	54°53'42.65"N 83°11'4.56"E	54°53'40.75"N 83°11'8.38"E

Леса занимают около 20 % территории области. Наиболее распространенное дерево – береза, на втором месте сосна и осина. Встречаются также кедр, пихта, ель, рябина, боярышник и другие породы.

Растительный покров области неоднороден. Рассмотрим основные ботанико-географические зоны края: На самом севере расположена заболоченная темнохвойная тайга, состоящая из ели, пихты, кедра. Южнее в лесах начинают преобладать береза, сосна и осина. Наиболее распространен и наиболее типичен для Новосибирской области лесостепной ландшафт, где открытые пространства перемежаются с небольшими, округлой формы, островками березово-осинового леса, которые в Сибири называют колками. На юго-западе области, у границы с Казахстаном, начинается степная зона – Кулундинская степь.

В ландшафте области выделяется низкогорная тайга Салаирского кряжа. Состоит она в основном из пихты и осины. На влажных лесных полянах Салаира растет высокая, в рост человека, трава.

Характерны для нашего края ленточные сосновые боры, вытянутые вдоль реки Обь, в том числе и в окрестностях Новосибирска.

Кроме естественной растительности, обширные пространства области заняты полями, на которых выращиваются сельскохозяйственные культуры.

На основании данных о растительности Новосибирской области были выяснены средние размеры растительности исследуемых участков. Средняя высота березы – 18 м.

На основе данных спутниковой съемки, представленных в программном продукте Google Earth, был определен состав растительного покрова в точках условного расположения датчиков. В Google Earth многие мировые территории отображаются вплоть до масштаба 1:2000, эти данные предоставлены компанией DigitalGlobe и сделаны со спутника QuickBird-2, камерой BHRC-60, исходное разрешение этих снимков уменьшено до двух метров, что позволяет визуально оценить растительный покров на исследуемой территории.

Дисперсия высот, расположенных возле поселка Ключи, - $S^2 = 435,7$, возле поселка Кольцово - $S^2 = 17,4$. Полученные данные позволяют оценить характеристики трассы распространения УФ сигналов в данной зоне.

Анализ видимости/невидимости (viewshed analysis, visibility/unvisibility analysis) – одна из операций обработки цифровых моделей рельефа, обеспечивающая оценку поверхности с точки зрения видимости или невидимости отдельных ее частей путем выделения зон и построения карт видимости / невидимости (visibility map, viewshed map) с некоторой точки обзора (vista point, viewpoint, point of view) или множества точек, заданных их положением в пространстве (источников или приемников излучений).

Так как данные Google Earth недоступны для дальнейшей обработки, для получения базовой информации по пространственной организации растительности исследуемых участков использовался спектрально-космический снимок со спутника Landsat 7, улучшенный с помощью панхроматического канала до пятнадцатиметрового разрешения. Обработка снимка осуществлялась с использованием стандартного метода классификации

без обучения изображения ISODATA (unsupervised classification), предлагаемым прикладным пакетом Erdas. В результате дешифрирования снимка и анализа спектральных характеристик растительности были идентифицированы объекты лес / не лес. Классифицированный снимок был переведен в GRID необходимый для дальнейшей обработки.

Используя калькулятор растров доступный в программном продукте ArcGis, на основе полученных ранее данных были созданы GRID-модели рельефа с учетом растительности на исследуемые участки (рисунок 1).

Формула для калькулятора растров выглядит следующим образом:

$Con([rel] \& [class] == 1, [rel] + 18, [rel] \& [class] == 2, [rel])$,

где *rel* – GRID модель рельефа (рисунок 1), *class* – GRID с двумя классами лес/не лес, 18 – средняя высота березы.

Используя полученную GRID-модель рельефа с учетом растительности и точечные шейп-файлы созданные на основе координат из табл. 1 и 2, средствами модуля ArcGis Spatial Analyst был проведен ViewShed анализ, который позволил определить зоны видимости для каждой точки (табл. 5).

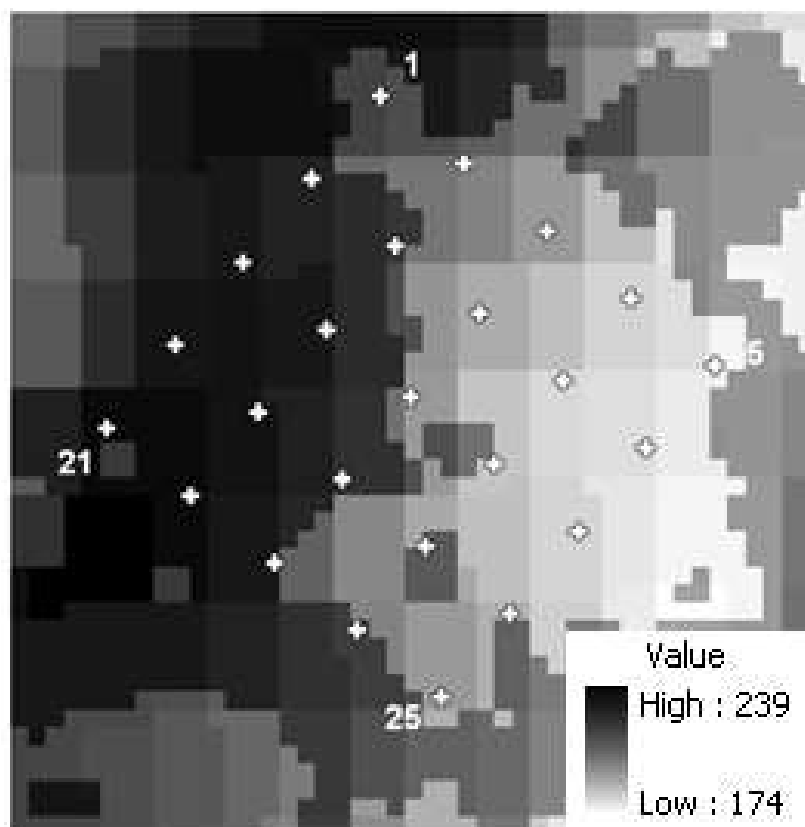


Рис. 1. Участок около поселка Ключи. Grid-модель рельефа с учетом растительности и точки условного расположения датчиков

Таблица 3. Относительные высоты рельефа для датчиков / с учетом растительности на участке около поселка Ключи

Строка	Высота рельефа / с учетом растительности				
	Столбец				
	1	2	3	4	5
1	216	199	194	182	176
2	209/227	202/220	190	181	180
3	213/231	213/231	194	185	182
4	215/233	216/234	203/221	191/208	189
5	219	219/237	214/232	199/217	194

Таблица 4. Относительные высоты рельефа для датчиков / с учетом растительности на участке около поселка Кольцово

Строка	Высота рельефа / с учетом растительности				
	Столбец				
	1	2	3	4	5
1	191	193	194	194	192
2	191	193	193	193	192
3	190	192	192	191	185
4	189	192	192	192	189/207
5	188	189	191	187	182/200

Очевидно, что при установке средств оптических сенсоров, приемо-передающих систем, ретрансляторов необходимо учитывать характеристики рельефа и растительности в месте установки датчиков. При фиксированном месте расположения датчиков целесообразно устанавливать при необходимости оптические передающие системы на расстоянии нескольких метров от него в точке, обеспечивающей лучшие условия видимости на ретранслятор.

Таблица 5. Датчики находящиеся в пределах прямой видимости: х – для датчиков около поселка Кольцово, у – для датчиков около поселка Ключи

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1		у		у		у	у	у																	
2	у					у				у															
3				у				х/у		у				у					у	х					
4	у		у						у						х					х					
5										х										х					
6	у	у					у	у	у																
7	у					у																			
8	у		х/у			у																			
9				у		у				х					у				у	х					
10					х				х											х					
11		у	у														у			у	у				
12																					у				
13																									
14			у												х/у				у	х					
15				х					у					х/у	у					х					
16																					у				
17										у											у				
18																				у					
19			у											у						у					
20			х	х	х				х	х	у			х	х			у	у	у		у	у		
21										у	у					у	у						у		
22																				у					
23																				у	у				
24																									
25																									

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бритвин А.В., Поллер Б.В., Щетинин Ю.И. Использование ультрафиолетового канала с рассеянием в беспроводных информационных системах и микросистемах // Сб. матер. III междунар. научн. конгр. «ГЕО–Сибирь-2007» - Новосиб., 2007.- Т. 4, ч.1. - С. 174 - 180.

2. <http://www.gis-lab.info/docs.html> - информационный портал по ГИС тематике.

3. <http://www.siatt.ru/russia/nso/index.php?print=Y> – НСО Новосибирская область.

© Н.А. Шергунова, А.В. Бритвин, Б.В. Поллер, 2009

УДК. 621.382.333

С.В. Савелькаев, М.Б. Устюгов, Г.В. Григорьева

СГГА, Новосибирск

ТРЕХСЕКЦИОННАЯ ДРЕЙФОВО-ДИФфуЗИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

S.V. Savel'kayev, M.B. Ustugov, G.V. Grigor'eva

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THREE-SECTION DRIFT-DIFFUSIONAL MATHEMATICAL MODEL OF THE FIELD TRANSISTOR WITH BARRIER SCHOTTKY

The mathematical three-section model of the field transistor with barrier Schottky is considered. This model raises accuracy of calculation of volt-ampere characteristics. It is important for developers of these transistors.

В настоящее время в качестве активных компонентов усилительных и автогенераторных СВЧ-устройств сантиметрового диапазона преимущественно используют полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТБШ). Их широкое внедрение в СВЧ технику обусловлено тем, что их граничная частота почти на порядок выше, чем у биполярных транзисторов и достигает 30–40 ГГц. Кроме того, ПТБШ в сравнении с биполярными транзисторами, диодами Гана и лавинно-пролетными диодами имеют существенно меньший собственный коэффициент шума, высокую термостабильность, более универсальны в применении и технологичны в изготовлении.

В работе [1] предложена двухсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель ПТБШ с каналом *n-GaAs* типа. Ее недостаток состоит в том, что она не учитывает того, что у ПТБШ с коротким затвором $L \ll 1,5 \text{ мкм}$ или близким к короткому $L < 1,5 \text{ мкм}$ накопление электронов происходит не только в секции 2, но и в некоторой дополнительной секции 3 проводящей части его канала. В результате чего заряд стационарного домена с отрицательным дифференциальным сопротивлением, формирование которого вызвано накоплением электронов в проводящей части канала ПТБШ, оказывается значительно заниженным, что приводит к существенной погрешности расчета пологой области его вольт-амперных характеристик (ВАК).

Поэтому разработка трехсекционной дрейфово-диффузионной математической модели ПТБШ, которая учитывает накопление электронов в секции 3 проводящей части его канала, является актуальной.

Исходными данными для разработки трехсекционной дрейфово-диффузионной математической модели ПТБШ с каналом $n\text{-GaAs}$ типа, например, такого как ЗП602А являются его физико-топологические параметры:

- Диффузионный потенциал барьера Шоттки $U_{\text{д}}, \text{В}$ 0,8;
- Концентрация донорной примеси $N_D, \text{см}^{-3}$ 10^{17} ;
- Диффузия электронов $D, \text{см}^2/\text{с}$ 35;
- Низкополевая подвижность электронов $\mu_0, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ $4,24 \cdot 10^3$;
- Напряженность электрического поля $E_p, \text{В}/\text{см}$ $3,8 \cdot 10^3$,
при которой дрейфовая скорость электронов v достигает
своего порогового значения $v_p, \text{см}/\text{с}$ $1,6 \cdot 10^7$;
- Дрейфовая скорость v электронов при ее насыщении $v_s, \text{см}/\text{с}$ $1,0 \cdot 10^7$,
при напряженности электрического поля $E_s, \text{В}/\text{см}$ $16 \cdot 10^3$;
- Относительная диэлектрическая проницаемость $n\text{-GaAs}$, ε 12,5;
- Длина затвора $L, \text{мкм}$ 1,36;
- Ширина затвора $W, \text{мкм}$ 1048;
- Толщина канала $a, \text{мкм}$ 0,27.

Поперечный разрез структуры ПТБШ с каналом $n\text{-GaAs}$ типа показан на рис. 1, а.

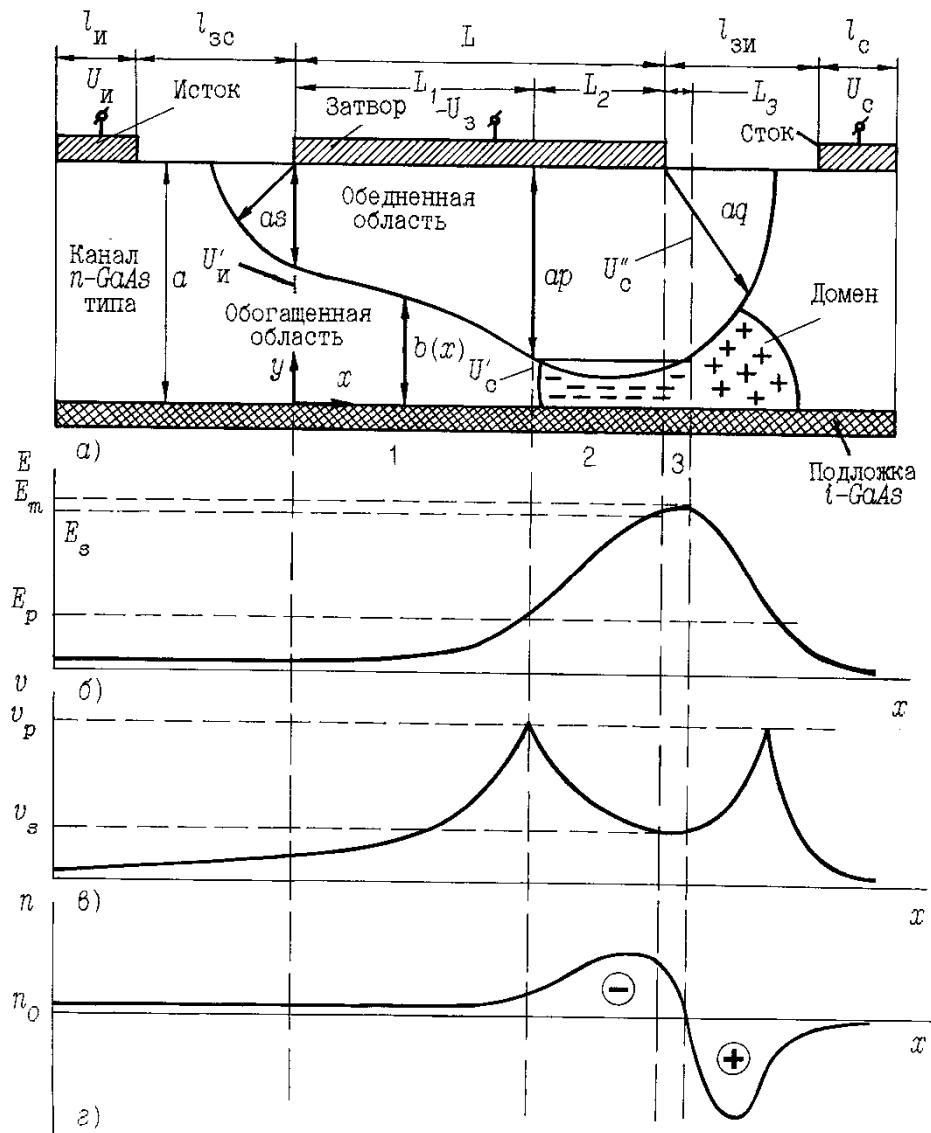


Рис. 1. Поперечный разрез структуры ПТБШ (а), напряженность электрического поля E (б), дрейфовая скорость электронов v (в) и их концентрация n в его канале (г).

Для таких ПТБШ электрическое поле E на границе $x = L_1$ секций 1 и 2 достигает значения $E = E_p$, а дрейфовая скорость v электронов ее порогового значения $v = v_p$, как показано на рисунке 1, б и в. На границе $x = L$ секции 2 и 3 электрическое поле E достигает значения $E = E_s$, а дрейфовая скорость v электронов значения ее насыщения $v = v_s$. И на последней границе $x = L + L_3$ секции 3 электрическое поле E достигает значения $E = E_m$, в то время как дрейфовая скорость v электронов по-прежнему равна значению ее насыщения $v = v_s$.

Разработку математической модели ПТБШ осуществим при следующих допущениях. Полагаем, что все физические процессы, протекающие в активной области его канала, стационарны $\partial n / \partial t = 0$. Также полагаем, что при выполнении условия $L/a \geq 5$ составляющая электрического поля E_x по оси x в

обедненной части активной области канала и составляющая E_y по оси y в ее проводящей части пренебрежимо малы и что граница между однородно легированным эпитаксиальным слоем, образующим канал, и подложкой резкая, как и граница между обедненной и проводящей частями активной области канала. Диффузией электронов пренебрегаем, приняв $D \approx 0$. Кроме того, полагаем, что центр стационарного домена, показанного на рис. 1, а, формирование которого вызвано накоплением электронов в секциях 2 и 3, определен границей $x = L + L_3$ секции 3.

С учетом введенных допущений двумерную дрейфово-диффузионную математическую модель ПТБИШ можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \nabla j &= 0 \\ \nabla^2 \psi &= e(n - n_0) / \varepsilon \varepsilon_0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; $j = nev$ – плотность тока, протекающего в проводящей части канала; e , n_0 и n – заряд электрона и их равновесная и неравновесная концентрации; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Известно, что в n -GaAs зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля E определяется функцией [2]

$$v = \frac{\mu_0 E + v_s (E / E_p)^4}{1 + (E / E_p)^4}, \quad (2)$$

где $E = E(x, y) = -\nabla \psi$ – напряженность электрического поля в полупроводнике; E_p и v_s – пороговое значение напряженности электрического поля E при котором дрейфовая скорость v достигает своего порогового значения $v = v_p$ и дрейфовая скорость электронов при напряженности электрического поля $E \geq E_p$, при которой она достигает своего значения насыщения $v = v_s$, что соответствует рис. 1, б.

К дрейфовой скорости электронов v (2) применим кусочно-линейную аппроксимацию вида

$$v = \begin{cases} \mu_0 E & \text{при } E \leq E_p \\ v_s & \text{при } E > E_p \end{cases}. \quad (3)$$

Ток стока, протекающий в секциях 1, 2 и 3 проводящей части канала, определим как

$$I_c = e N_D \mu_0 a W (U_0 / L_1) \{ p^2 - s^2 - (2/3)(p^3 - s^3) \}, \quad (4)$$

где s и p – приведенные потенциалы

$$\left. \begin{aligned} p &= [(U'_c - U_{\text{сч}} + U_A) / U_0]^{1/2} \\ s &= [(U'_c - U_{\text{сч}} + U_A) / U_0]^{1/2} \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

U'_C и $U'_И$ – напряжение на границе $x = L_1$ секций 1 и 2 и на границе $x = 0$ секции 1 проводящей части канала, как показано на рис. 1, а; $U_0 = eN_D a^2 / 2\epsilon\epsilon_0$ – напряжение отсечки.

При аппроксимации секций 2 и 3 проводящей части канала прямоугольником их толщину можно определить как

$$b(L_1 \leq x \leq L + L_3) = a(1 - p). \quad (6)$$

Тогда ток стока I_C на границе $x = L_1$ секции 1 и 2 проводящей части канала может быть определен из (4) в виде

$$I_C = eN_D \mu_0 E_p a(1 - p)W. \quad (7)$$

Длину L_1 секции 1 как функцию напряжений $U_{3И}$ и U'_C выразим в виде

$$L_1 = \frac{U_0}{E_p} \cdot \frac{p^2 - s^2 - (2/3)(p^3 - s^3)}{1 - p}. \quad (8)$$

Падение напряжения $U'_{СИ}$ в секции 1 можно определим как

$$U'_{\text{нс}} = U'_И - U'_C = U_0(p^2 - s^2). \quad (9)$$

Выражения (4), (8) и (9) при $U''_C = U'_C$, $L_1 = L$ и $L_2 = L_3 = 0$ позволяют рассчитать крутую область ВАХ ПТБШ, а также определить напряжение насыщения $U'_{\text{с нас}}$, определяющее границу между ее крутой и пологой областями.

Для расчета пологой области ВАХ необходимо определить распределение потенциала в секциях 2 и 3 проводящей части канала с учетом накопления заряда электронов в стационарном домене у стокового конца, показанного на рис. 1, а.

При аппроксимации секций 2 и 3 проводящей части канала прямоугольником решение уравнения Пуассона (1) может быть записано в виде [1]

$$U''_{\text{нс}} = U''_И - U'_C = U_0(p^2 - s^2) + \frac{2aE_p}{3\pi} \left[(1 + \alpha) \operatorname{th} \frac{\pi}{2a} (L - L_1 + L_3) + \right. \\ \left. + 2 \operatorname{sh} \frac{\pi}{2a} (L - L_1 + L_3) \right], \quad (10)$$

где $L_3 = a(q^2 - p^2)^{1/2}$ – длина секции 3 [2]; $q = [(U''_C - U_{\text{сч}} + U_{\text{А}})/U_0]^{1/2}$ и $\alpha = eN_D (L - L_1 + L_3) / \epsilon\epsilon_0 (v_p / v_s - 1)$.

Выражения (4), (8), (9) и (10) позволяют рассчитать крутую и пологую области ВАХ ПТБШ. Алгоритм расчета ВАХ должен учитывать падение напряжений $\Delta U_{И} = I_C R_{И}$ и $\Delta U_C = I_C R_C$ на сопротивлениях $R_{И}$ и R_C истока и стока ПТБШ. Результаты расчета ВАХ ПТБШ типа 3П602А относительно напряжений $U_3 = U''_{3И} - \Delta U_{И}$ и $U_C = U''_{СИ} - \Delta U_C - \Delta U_{И}$ на его контактных площадках затвор-исток и сток-исток показаны на рис. 2, где штрих-пунктиром обозначены их измеренные значения.

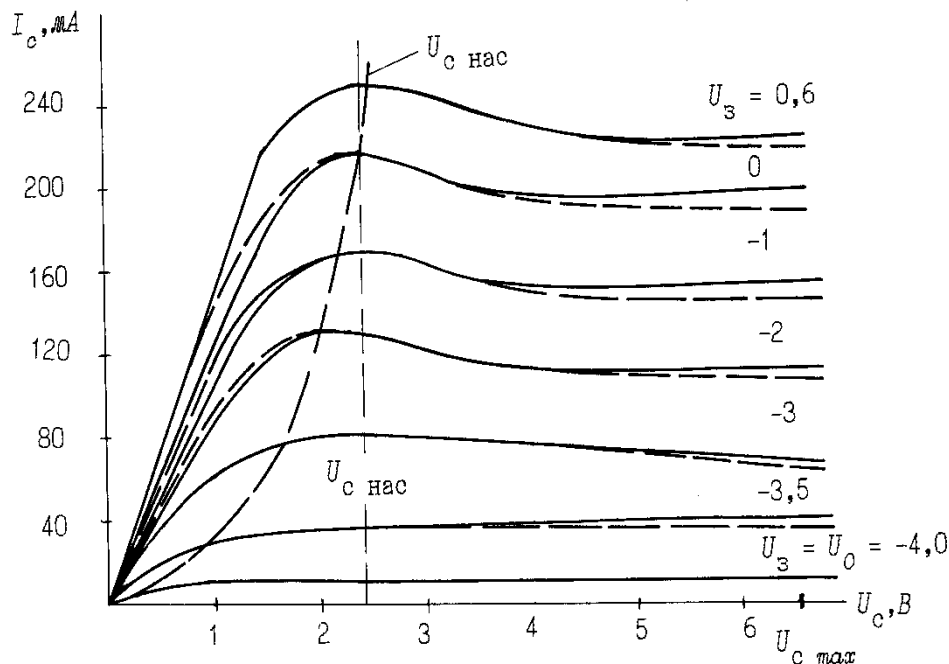


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ПТБШ

Согласно рис. 2 разработанная трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель ПТБШ позволяет рассчитать спадающий участок пологой области его ВАХ в режиме насыщения его тока стока I_C при $U_C > U_{C \text{ нас}}$ с погрешностью не более 3 %, тогда как известная двухсекционная позволяет рассчитывать его с погрешностью до 30 %.

Таким образом, разработанная трехсекционная дрейфово-диффузионная математическая модель ПТБШ позволила повысить точность расчета пологой области их ВАХ примерно в 10 раз, что важно как для разработчиков ПТБШ, так и для разработчиков усилительных и автогенераторных СВЧ-устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буянов, Н.Н. Математическая модель полевого транзистора на основе арсенида галлия, учитывающая накопление носителей в канале [Текст] / Н.Н. Буянов Н.Н., Ю.И. Пашинцев // Микроэлектроника. – 1982. – Т. 1, вып. 5. – С. 457–460.
2. Савелькаев, С.В. Исследование вольт-амперных характеристик полевого транзистора с барьером Шоттки [Текст] / С.В. Савелькаев, Л.Г. Плавский // Широкополосные устройства ВЧ и СВЧ: межвузовский сб. науч. тр. – Новосибирск, 1990. – С. 28–33.

УДК 621.319.4:620.179

П.М. Плетнёв, Г.В. Симонова, С.А. Степанова

СГГА, СГУПС, Новосибирск

СВЯЗЬ МИКРОСТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ С ЕЁ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

P.M. Pletnev, G.V. Simonova, S.A. Stepanova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE CONNECTION MICROSTRUCTURE OF FUNCTIONAL CERAMICS WITH IT PHYSICAL-TECHNICAL PROPERTIES

The various kinds of functional ceramics are investigated. The connection of microstructure of ceramics with it physic-technical properties was shown. The results which was received allow to optimize quality surveillance of ceramic materials.

Название «керамика» объединяет виды материалов, изготовленных по керамической технологии [1].

На любые свойства всех видов керамических материалов решающее влияние оказывает их строение.

Под строением подразумевается взаимное сочетание и распределение кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой фазы (т. е. пор), их физико-химическая природа и количественное соотношение. Особенности строения керамики оценивают путём исследования её микроструктуры. Микроструктура керамики устанавливает природу кристаллических фаз, характер их строения; количество стеклофазы, характер её распределения между зёрнами кристаллической фазы; объём пористости, размеры пор и их взаимное расположение. Для всех видов керамики существует однозначная зависимость между режимами изготовления керамики, её микроструктурой и свойствами готового материала.

В данной работе рассматривается взаимосвязь микроструктуры функциональных видов керамики с их физико-техническими свойствами.

Исследование микроструктуры производилось под микроскопом в отражённом свете при увеличении порядка 360 крат. Для количественных определений параметров микроструктуры керамики применялся линейный метод.

Алюмооксидная керамика ВК95-I имеет следующий химический состав (% мас.): Al_2O_3 – 95,3; SiO_2 – 3,3; MgO – 1,2; CaO – 0,2. Для этой керамики характерны высокая механическая прочность и стабильность диэлектрических свойств. Наиболее уязвимым местом данного вида керамики является

нарушение герметичности её спая с металлом, что приводит к нарушению работы приборов, в которых она используется [2].

В табл. 1 приведена микроструктура керамики ВК95-I, обеспечивающая герметичные спаи керамики с металлом.

Таблица 1

Средний размер кристаллов корунда, мкм	Стеклофаза			Поры	
	Содержание, %	Размер участков, мкм	Цвет стеклофазы	Содержание, %	Размер, мкм
5÷10	4,0÷9,0	2,0÷4,0	светло-зелёный	≤ 4,0	≤ 8,0

Все параметры микроструктуры тесно связаны между собой и обеспечены соответствующим режимом изготовления керамики. Цвет и размер участков стекловидной фазы говорят о её химическом составе, который сформировался в процессе окончательного обжига керамических изделий. В это же время формируется кристаллическая фаза и пористость.

В процессе вжигания металлизационной композиции происходит её химическое взаимодействие со стеклофазой керамики, обеспечивающее прочное герметичное соединение керамики с металлизационным слоем, по которому затем проводилось спаивание керамической детали с металлической.

Форстеритовая керамика ВФ52.42-I имеет химический состав: SiO_2 – 40,1; MgO – 52,2; BaO – 5,95; Al_2O_3 – 0,71; Fe_2O_3 – 0,33 % (мас.). Форстеритовыми называются изделия, содержащие в основном форстерит-ортосиликат магния Mg_2SiO_4 .

Критерии микроструктуры форстеритовой керамики, обеспечивающей герметичные спаи керамики с титановыми деталями, установлены на основании следующих исследований:

– Микроструктуры керамических деталей из приборов, сохранивших вакуумную плотность в течение 5 ÷ 6 лет;

– Микроструктуры керамических деталей из приборов, потерявших герметичность в процессе изготовления или в короткий срок после изготовления.

В табл. 2 приведены параметры оптимальной микроструктуры форстеритовой керамики ВФ 52.42-I.

Окраска стеклофазы указывает на её химический состав (барий-алюмо-силикатная стеклофаза), способный образовывать с титаном герметичные спаи.

Таблица 2

Средний размер кристаллов форстерита, мкм	Стеклофаза			Пористость	
	Содержание, %	Размер участков, мкм	Окраска	Содержание, %	Размер, мкм
$\geq 4,0$	≥ 10	1,5÷2,0	тёмно-зелёно-серая	$\leq 6,5$	2,0÷3,0

Широкий изоморфизм системы ЦТС (титанат-цирконат свинца) позволяет получать в значительных пределах твёрдые растворы различных оксидов со структурой перовскита и создавать на этой основе разнообразные высокоэффективные пьезокерамические материалы.

Наши исследования выполнены на пьезокерамике состава ЦТБС-3, содержание оксидов в котором составляет (масс. %): PbO – 54,6; SrO – 0,6; BaO – 12,2; ZrO_2 – 21,0; TiO_2 – 11,6 %.

Задача настоящего исследования – установление взаимосвязи микроструктуры пьезокерамики ЦТБС-3 с повышением механической прочности керамики, её стабилизацией и воспроизводимостью. При этом, безусловно, ставилась задача сохранения необходимых электрофизических свойств керамики [3].

Рентгенофазовым анализом установлено наличие одной кристаллической фазы – твёрдого раствора цирконата-титаната свинца, присутствие других кристаллических фаз не обнаружено. В данных видах керамики также отсутствует стекловидная фаза. С помощью оптической и электронной микроскопии изучены форма и размеры зёрен кристаллической фазы, их распределение, плотность установки, количество пор, их размеры и распределение в керамическом материале. Микроструктура с определёнными параметрами достигалась введением в керамику микродобавок. Использован способ введения микродобавок – обработка пористых керамических изделий в водных растворах солей, с последующим обжигом. Введение двухвалентных ионов (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Si^{2+}) обеспечивает более равномерную, мелкозернистую структуру пьезокерамики по сравнению с микроструктурой исходной керамики ЦТБС-3. При этом повышается механическая прочность пьезокерамики и её стабильность (табл. 3).

Таблица 3

Микро- добавка	Параметры кристаллофазы		Параметры газовой фазы		Прочность пьезокерамики	
	d_{cp} , мкм	Форма и распределение кристаллов	Содержан ие пор, %	Размер пор, мкм	Измени е прочност и, %	Коэффицие нт вариации, %
без добавок (к. обр.)	5 (4÷6)	округлая, крупные зёрна	3,0	5÷10	–	17
Sr^{2+}	3 (2÷4)	округлая, равнозернистая; плотное	3,0	6÷12	+ 15	9
Ca^{2+}	4 (3÷6)	округлая, равнозернистая; плотное	2,5	10÷12	+ 6	8
Mg^{2+}	3 (2÷5)	округлая, равнозернистая; плотное	1,0	5÷10	+ 4	10

В последние два десятилетия существенно расширилась область применения изделий из ферритовой керамики.

В данной работе был исследован марганец-цинковый феррит 3 000 НМС состава: Fe_2O_3 – 71,1; MnO – 19,6; ZnO – 7,8; NiO – 0,9 % (мас.), используемый в прецизионном приборостроении. Изучена микроструктура данного феррита в зависимости от обработки пористых ферритовых изделий водными растворами солей с последующим обжигом и зависимость микроструктуры керамики со свойствами готового материала.

В табл. 4 приведены параметры микроструктуры керамики 3 000 НМС, полученной в зависимости от введённой микродобавки, и связанные с данной микроструктурой свойства феррита [3].

Таблица 4

Микродоб авка, 0,7 % (мол.)	Микроструктура образцов		Изменение свойств феррита по отношению к контрольным образцам, %		
	Средний размер кристаллов, мкм	Пористос ть, %	Магнитные потери, $\Delta W/W$	Магнитная проницаемость, $\Delta \mu/\mu$	Прочность, $\Delta n/n$
CaO	20	10	+ 23	– 19	+ 40
CuO	45	12	– 12	+ 4	+ 20

CoO	31	5	+ 73	– 44	+ 45
In_2O_3	60	10	– 4	+ 10	+ 30
Sm_2O_3	13	7	+ 13	+ 5	–
ZrO_2	60	11	+ 112	– 44	+ 50
Vi_2O_3	35	8	+ 13	– 8	+ 78
V_2O_5	70	6	+ 18	– 10	+ 80

Из таблицы следует, что промышленный феррит марки 3 000 НМС характеризуется крайне неравномерной крупнокристаллической микроструктурой со средним размером зерна от 15 до 60 мкм, при разбросе его величины от 4 до 320 мкм. Пористость составляет $8\div 10$ %. Выявлено, что партии феррита, изготовленные в различное время, существенно отличаются друг от друга микроструктурой.

Из табл. 4 видно, что модифицирование оксидом ванадия приводит к образованию кристаллов правильной шестигранной формы с чёткой огранкой. Пores – мелкие, округлые, частично находятся внутри кристаллов, а не между ними. Такая структура является наименее напряжённой, которая определяет высокий уровень физико-технических параметров материала.

Проведённые эксперименты показали, что существует однозначная связь микроструктуры керамики с её физико-техническими свойствами. Это позволяет оптимизировать контроль качества керамики и повысить его достоверность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богородицкий, Н.П., Кальменс Н.В. и др. Радиокерамика. – М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1973.
2. Степанова, С.А., Плетнёв, П.М. и др. Алумооксидная функциональная керамика // Вестник УГТУ. Екатеринбург: Международная научно-техническая конференция «Физикохимия и технология оксидносиликатных материалов». – 2000. – № 1.
3. Верещагин, В.И., Плетнёв, П.М. и др. Функциональная керамика. – Новосибирск: «Наука», 2004.

© П.М. Плетнёв, Г.В. Симонова, С.А. Степанова, 2009

УДК 543.812.08/15

Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА БАРБОТАЖНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД

G.V. Shuvalov, O.A. Jasyrova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

DEVELOPMENT BARBOTAZHNOGO METHOD OF THE DETERMINATION TO DENSITY OF THE FLUID AMBIENCES

In work is considered modification agitation-bubble method of the determination to density of the fluid ambiances. The Particularity of the specified method is that information on differences гидростатических pressures leaves not in the manner of evidences of the manometer, but in the manner of amount пузырьков air, coming out of measuring tube, proportional difference of the pressures - bubble-agitation method. The Advantage of this method is a transformation unceasing неэлектрической values - a differences of the pressures - in the sequence of the discrete count пузырьков air under agitation him(it) through under investigation liquid.

Плотность следует считать универсальным и наиболее доступным для измерения качественным показателем жидкостей. Ее измерение позволяет контролировать многие технологические процессы, сортировать жидкости и вести их массовый учет. Поэтому возникает необходимость в разработке новых средств измерения плотности, обеспечивающих необходимую точность и быстроту измерения, а также доступных по цене для отечественного потребителя [1–3].

На практике этот параметр в большинстве случаев подлежит обязательному определению. Однако рекомендуемые стандартные приборы, хотя и обеспечивают необходимую точность по своему конструктивному и аппаратному исполнению устарели, к тому же для определения плотности требуются лабораторные условия, что возможно не всегда в местах подготовки и применения жидкостей. Поэтому актуальной является задача оперативного определения плотности. В трудах И.П. Глыбина, Л.А. Залманзона, С.С. Кивилис, В.И. Лаптева, Д.М. Мордасова проанализированы основные методы и приборы для определения плотности. Большинство из перечисленных методов имеют существенные недостатки, основные из которых – значительные затраты труда и времени. В то же время часто возникает необходимость проведения измерений плотности вне лаборатории в полевых условиях. Это обуславливает

необходимость создания современных экспресс-методов определения плотности жидкостей, в связи, с чем разработке и исследованию новых принципов измерения, созданию конструкций приборов, основанных на этих принципах, уделяется все большее внимание.

В связи с этим целью данной работы является разработка экспресс-метода определения плотности жидких сред.

Одним из перспективных методов измерения плотности жидких сред, удовлетворяющим вышеизложенным требованиям, можно считать барботажный, который известен, но не нашел широкого применения из-за ряда технических трудностей при его реализации, в частности необходимостью измерения малых разностей давлений.

В настоящей работе рассматривается модификация данного метода, применительно к определению плотности нефтепродуктов. Особенностью указанного метода является то, что информация о разности гидростатических давлений снимается не в виде показаний манометра, а в виде количества пузырьков воздуха, выходящих из измерительных трубок, пропорционального разности давлений – пузырьково-барботажный метод. Преимуществом этого метода является преобразование непрерывной неэлектрической величины – разности давлений – в последовательность дискретного счета пузырьков воздуха при барботаже его через исследуемую жидкость.

Одним из наиболее простых способов образования пузырьков является вдувание газа в неподвижную жидкость через обращённое вверх круглое отверстие (рис. 1).

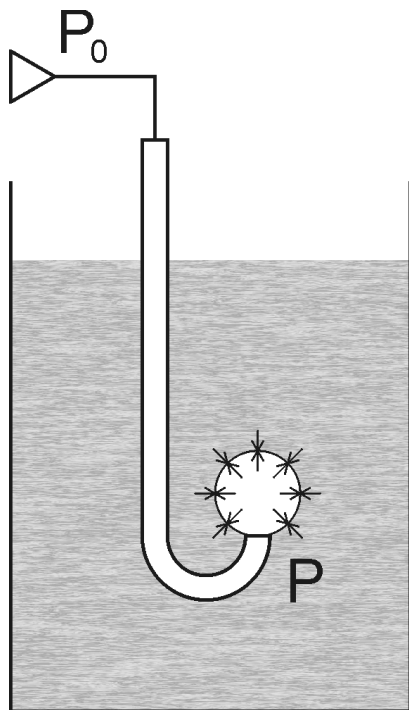


Рис. 1. Образование газового пузыря

Принимая, что в отверстии находится пузырек сферической формы, рассчитан размер пузырька при малых расходах газа.

В данной системе на пузырек действуют силы:

– Сила тяжести

$$F_1 = mg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_g g, \quad (1)$$

где R – радиус пузырька, м;

ρ_g – плотность газа, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

– Сила Архимеда

$$F_2 = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

– Сила поверхностного натяжения

$$F_3 = \pi d \sigma, \quad (3)$$

где d – диаметр выходного отверстия трубки, м;

σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Наибольший радиус пузырька определяется из условия статистического равновесия сил, действующих на него в момент отрыва от трубки

$$F_1 + F_3 = F_2, \quad (4)$$

$$R = \left(\frac{3d\sigma}{4(\rho - \rho_g)g} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что размер пузырька в случае работы барботажной системы в режиме одиночных пузырей зависит от диаметра выходного отверстия, поверхностного натяжения, плотностей жидкости и газа, ускорения свободного падения.

Уравнение для давления газа в пузырьке, соответствующее режиму статического равновесия имеет вид

$$P_g = P_{ж} + \frac{2\sigma}{R}, \quad (6)$$

где P_g – давление газа в пузырьке,

$P_{ж}$ – давление жидкости на пузырек.

Далее рассмотрена система, состоящая из двух измерительных трубок, помещенных в исследуемую жидкость (рис. 2).

В трубки под избыточным давлением подается воздух от компрессора так, чтобы он барботировался через измерительные трубки. Очевидно, что для проведения счета пузырьков необходимо, чтобы соблюдался режим одиночных пузырей. Для него принимаются следующие допущения:

– Форма пузырьков газа, отрывающихся от выходного отверстия и движущихся в жидкости, – сферическая; условие сферичности записывается следующим образом: $Re M^{0.23} \leq 1$, где Re – число Рейнольдса, $M = g\mu^4 / \rho\sigma^3$ – критерий, характеризующий физические свойства жидкости);

- Пузырьки газа после ускорения на очень коротком пути (доли миллиметра) поднимаются в слое жидкости прямолинейно, вертикально и с постоянной скоростью (для данной жидкости, газа, диаметра пузырька);
- Диаметр пузырьков не зависит от расхода газа, а определяется параметрами барботажной системы, при увеличении расхода газа уменьшаются расстояния между отдельными пузырьками.

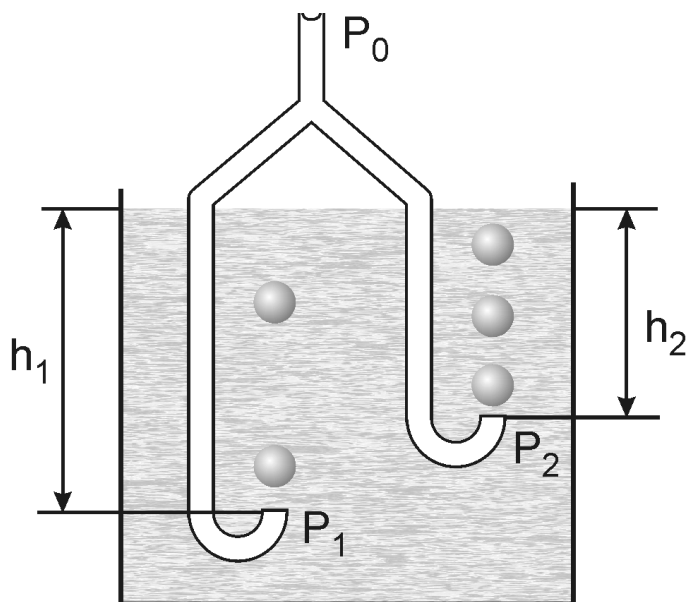


Рис. 2. Измерительная система для определения плотности жидкости

Давление газа в пузырьке на конце трубки в момент отрыва равно

$$P_i = P_a + \rho g h_i + \frac{2\sigma}{R_i}, \quad (7)$$

где P_a – атмосферное давление;

σ – поверхностное натяжение жидкости;

R_i – радиус пузырька из трубки;

h_i – глубина погружения трубки.

Изменение давления газа в пузырьке

$$\Delta P_i = P_i - P_0, \quad (8)$$

P_0 – давление подаваемого газа, Па.

С другой стороны

$$\Delta P_i = \alpha_i V_n \nu_i, \quad (9)$$

где α_i – коэффициент расхода газа;

V_n – объем пузырька газа, м³;

ν_i – частота следования пузырьков, с⁻¹.

Для ламинарного течения газа коэффициент расхода определяется по формуле

$$\alpha = \left(\frac{\pi d^4}{128 \mu_z l} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где μ_z – вязкость газа, Па·с;

l – длина трубки, м.

Таким образом, для двух трубок погруженных в жидкость на разную глубину

$$v_i = \frac{1}{\alpha_i V_d(R_i)} \left[D_i + \rho g h_i + \frac{2\sigma}{R_i} - D_0 \right]. \quad (11)$$

Решив совместно уравнения (11) для двух трубок, приняв, что $d_1 = d_2$ и $\rho \gg \rho_z$, получим

$$\rho = \frac{\alpha_2 v_2 - \alpha_1 v_1}{g(h_2 - h_1)} V_d. \quad (12)$$

Учитывая (5)

$$V_n = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{d\sigma}{\rho g}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), получено искомое выражение для плотности:

$$\rho = \left(\frac{(\alpha_2 v_2 - \alpha_1 v_1) d\sigma}{g^2 (h_2 - h_1)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Таким образом, получена зависимость плотности исследуемой жидкости с числом пузырьков газа (воздуха), выпускаемых в нее в одиночном режиме из двух измерительных трубок.

По выведенной формуле (14) построены графики зависимости плотности от переменных величин, характеризующих свойства жидкости и параметры конструкции измерительной ячейки (диаметры и длина измерительных трубок, разность глубин их погружения в исследуемую жидкость).

На рис. 3 представлена зависимость плотности жидкости от диаметра трубок.

На рис. 4 изображена зависимость плотности от длины измерительных трубок.

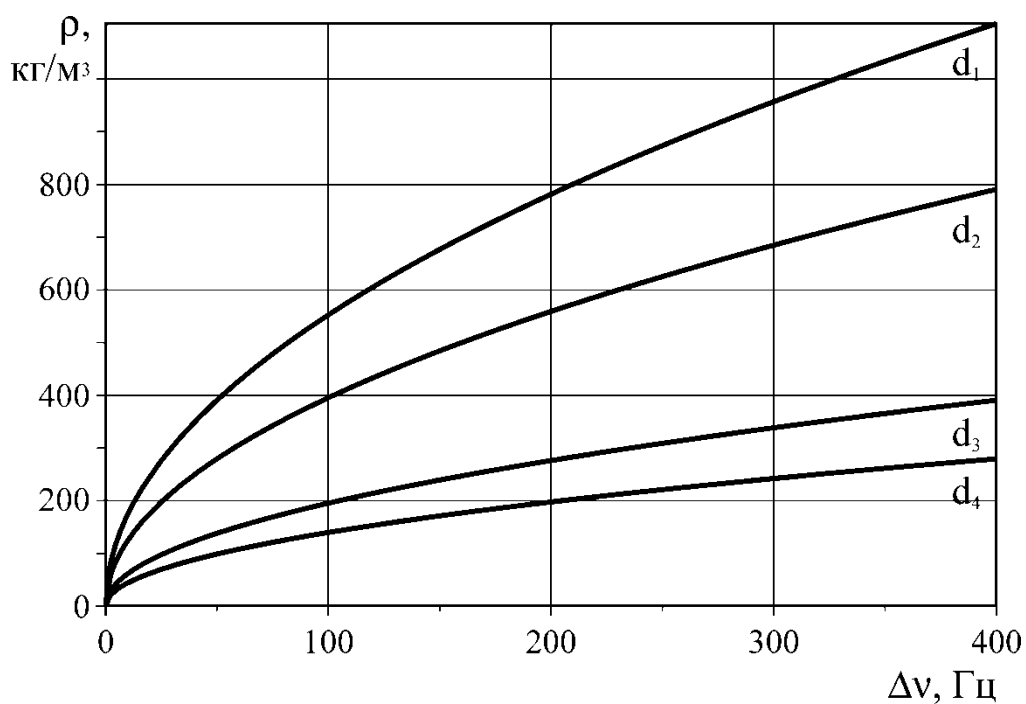


Рис. 3. Зависимость плотности от диаметра трубок: $d_1 = 0,4$ мм, $d_2 = 0,5$ мм, $d_3 = 0,8$ мм, $d_4 = 1$ мм

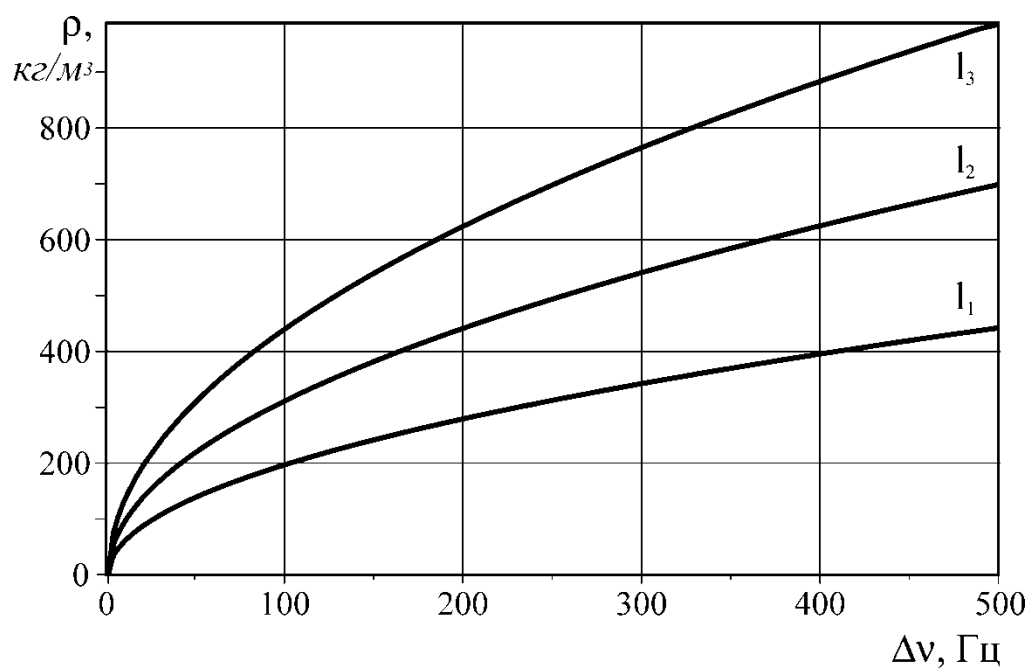


Рис. 4. Зависимость плотности от длины трубок: $l_1 = 0,1$ м, $l_2 = 0,3$ м, $l_3 = 0,5$ м

На рис. 5 представлена зависимость плотности исследуемой жидкости от разницы глубин погружения измерительных трубок в исследуемую жидкость.

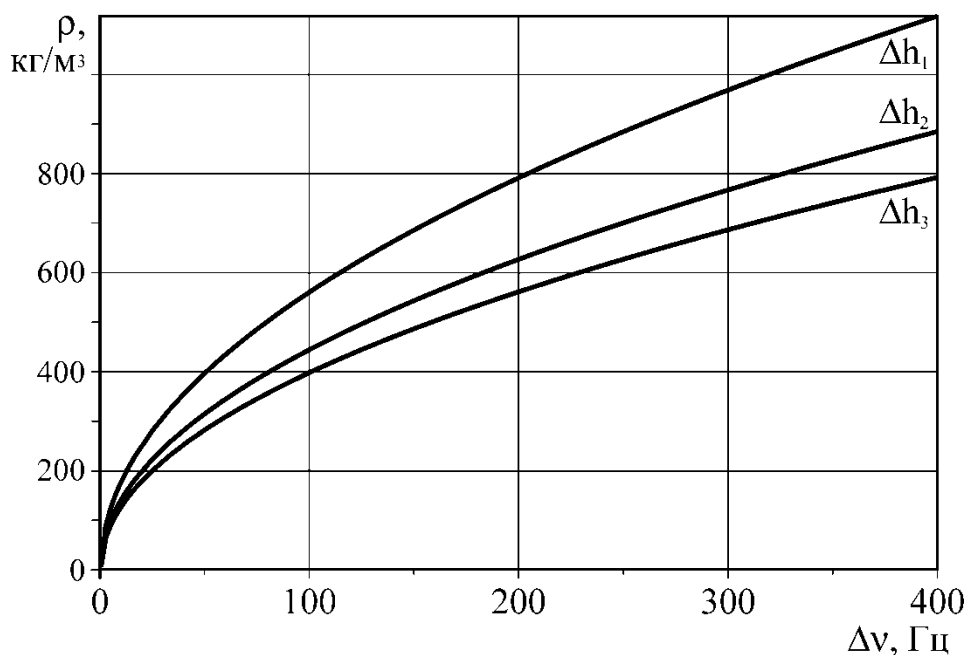


Рис. 5. Зависимость плотности от разницы глубин погружения трубок: $\Delta h_1 = 0,01$ м, $\Delta h_2 = 0,05$ м, $\Delta h_3 = 0,08$ м

Из анализа приведенных зависимостей следует:

- Изменение диаметра трубок наиболее сильно влияет на информативный параметр метода – разность частот следования пузырей (рис. 2). Учитывая то, что верхняя граница частоты ограничена величиной примерно 400 Гц, диаметр трубок целесообразно выбирать 0,3–0,5 мм;
- Влияние длины трубок на разность частот следования пузырей незначительно;
- Разницу глубин погружения трубок целесообразно выбирать в диапазоне 10–20 мм;
- Величина поверхностного натяжения жидкости (для нефтепродуктов) существенно не влияет на измерение плотности предлагаемым методом.

Таким образом, в результате теоретического рассмотрения физических процессов при барботаже получено уравнение для определения плотности с использованием разницы частот пузырьков воздуха, выходящих из измерительных трубок. С использованием этого уравнения проведен анализ влияния различных факторов на точность измерения, а также оценка границ применения метода относительно разницы частот следования пузырей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев, О.Н. Судовые энергетические установки и их эксплуатация / О.Н. Лебедев, С.А.Калашников. – М.: Транспорт, 1987. – 336 с.
2. Лебедев, О.Н. Теоретические основы процессов смесеобразования в дизелях / О.Н. Лебедев, Чирков. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 1999. – 200 с.
3. Лебедев, О.Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О.Н. Лебедев, В.А. Сомов, В.Д. Сисин. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.

© Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова, 2009

УДК 528

Г.В. Шувалов, О.А. Ясырова

СГГА, Новосибирск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

G.V. Shuvalov, O.A. Jasyrova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INSTRUMENT FOR MEASUREMENT OF DENSITY COMBUSTIBLE-LUBRIFICANT, USED IN SHIP ENERGY INSTALLATION

Results of the experimental studies are brought In work agitation-bubble method of the determination to density of the fluid ambiances.

It Is Received piece of evidence to capacity to work bubble-agitation of the method of the determination to density нефтепродуктов and are determined critical borders of the expenses of the gas, under which possible mode of the single bladders and influences of the consupcion of the gas on diameter of the bladders.

В [1, 2] рассмотрены вопросы разработки прибора для определения плотности горюче-смазочных материалов, применяемых в судовых энергетических установках. Было показано, что размер измерительных пузырьков в барботажной системе не зависит от расхода газа, а определяется только ее параметрами и, следовательно, расход газа не будет влиять на погрешность метода.

Для подтверждения сделанных выводов и полученных зависимостей были проведены экспериментальные исследования предлагаемого метода. Экспериментальные исследования проводились по двум направлениям:

- Определение критических границ расходов газа, при которых возможен режим одиночных пузырей и влияния расхода газа на диаметр пузырей;
- Экспериментальное подтверждение работоспособности пузырьково-барбо-тажного метода определения плотности нефтепродуктов.

Граница режима одиночных пузырей определялась переходом в режим сплошной струи (рис. 1).

Измерение диаметра пузырьков осуществлялось при помощи фотосъемки с последующим определением размеров пузырьков. Опыты проводились для эталонных жидкостей с разными диаметрами измерительных трубок.

Экспериментальное исследование работоспособности пузырьково-барботажного метода определения плотности нефтепродуктов проводили на макете прибора, блок-схема изображена на рис. 2.

Экспериментальная установка включает в себя измерительную ячейку (кювету) с двумя трубками (1); источники света (2); фотодиодные датчики счета пузырьков (3); блок питания (4); счетчик импульсов (5); осциллограф (6); ротаметр (7); компрессор. Фотография измерительной ячейки приведена на рис. 3.



Рис. 1. Режимы течения воздуха, не соответствующие режиму одиночных пузырей

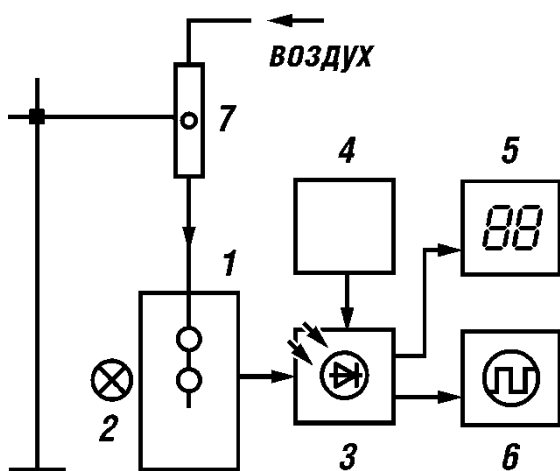


Рис. 2. Блок-схема измерительного устройства

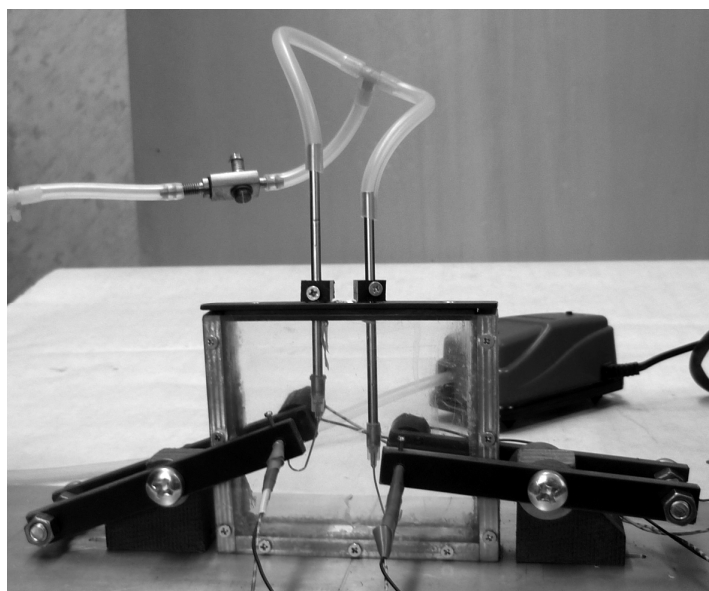


Рис. 3. Конструкция измерительной ячейки

С одной стороны кюветы в области испускания пузырьков воздуха размещены точечные источники света – лампы накаливания, с другой стороны – расположены фотодиоды. Каждый пузырек газа при движении пересекает на

своем пути световой луч, что регистрируется фотоприемником. Для каждой трубки используется своя оптопара – источник света и фотоприемник. Дополнительно величины и формы сигналов с фотодатчиков регистрировались осциллографом С1-85. Подача воздуха осуществлялась при помощи микрокомпрессора, расход воздуха контролировался при помощи ротаметра РМК-А-0,16 Г. Измерение разницы частот следования пузырей производилось при помощи цифрового счетчика СИ-8.

Кювета наполнялась испытуемой жидкостью выше уровня верхней трубки на 15 мм. После этого включался компрессор. Далее с помощью ротаметра выбирался режим одиночных пузырей. Счетчиком проводилось измерение разницы частот следования пузырей из измерительных трубок.

Результаты, полученные в опытах по определению критических границ расходов газа, при которых возможен режим одиночных пузырей, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расходы газа, соответствующие выходу из режима одиночных пузырей

Наименование жидкости	Диаметр измерительной трубки					
	$d_1 = 0,5$ мм		$d_2 = 0,7$ мм		$d_3 = 1$ мм	
	t, с	V, см ³ /мин	t, с	V, см ³ /мин	t, с	V, см ³ /мин
Бензин А-80	25,2	20,6	13,5	39,2	6,6	78
Дизельное топливо З-0,2-40	28	18,4	20	25,7	9	57
Моторное масло МС-20сп	29	17,8	11	46,8	8	64,6

Зависимость критического расхода газа от диаметра измерительной трубки изображена на рис. 4.

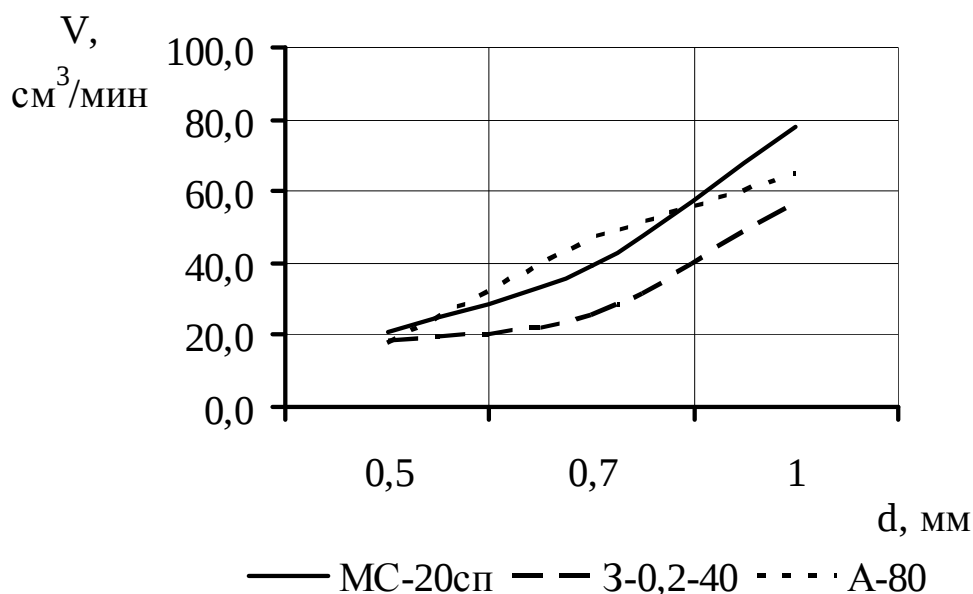


Рис. 4. Зависимость критического расхода от диаметра выходного отверстия

Исследования подтвердили теоретическое предположение о существовании для данного типа жидкостей области расхода газа, соответствующей режиму одиночных пузырей. Получены численные значения для рассматриваемых типов нефтепродуктов.

Размер пузырьков воздуха определялся по фотографиям. Проводилось по четыре измерения для трех эталонных жидкостей и трех диаметров измерительной трубки.

По полученным результатам построены зависимости для разных нефтепродуктов. Выяснено, что диаметр пузыря практически не зависит от расхода газа или влияние незначительно для режимов, соответствующих режиму одиночных пузырей (рис. 5). Для режимов расхода близких к критическому наблюдалось некоторое увеличение размера пузырька воздуха, а также форма теряла свою сферичность. Зависимость диаметра пузыря от размера измерительной трубки приведена на рис. 6.

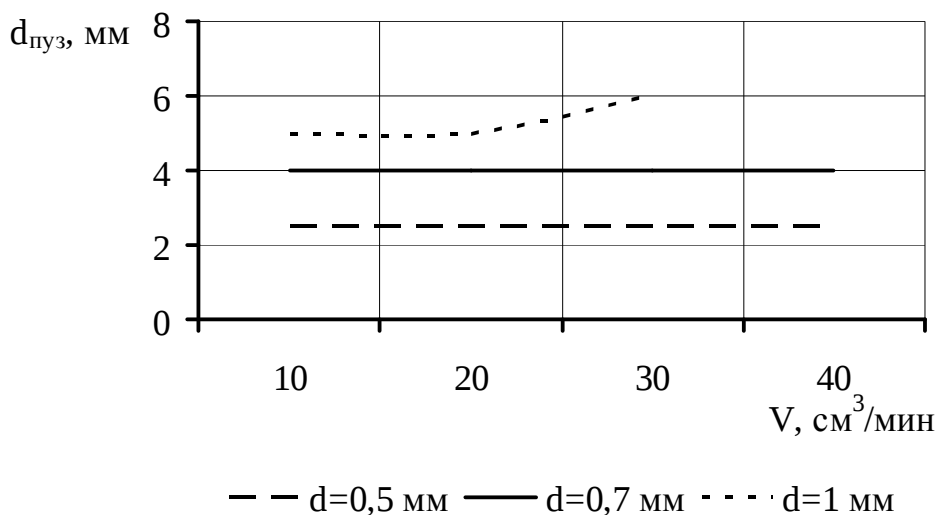


Рис. 5. Зависимость диаметра пузыря от расхода воздуха (бензин А-80)

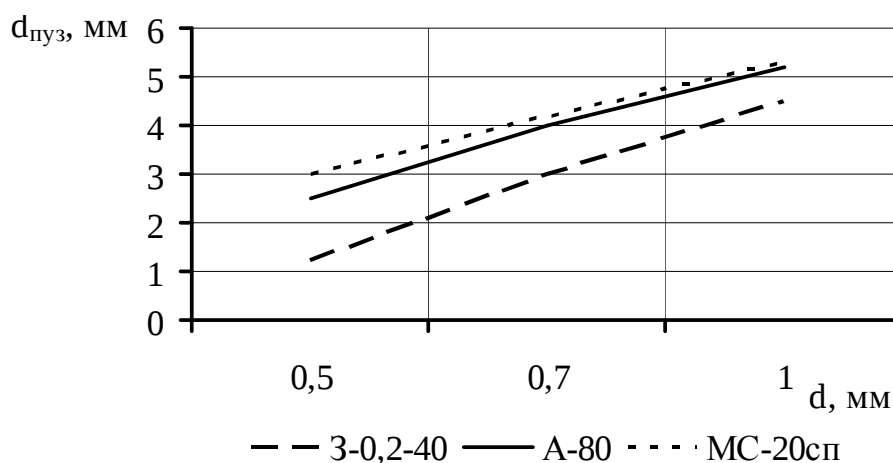


Рис. 6. Зависимость диаметра пузыря от диаметра выходного отверстия измерительной трубки

В результате эксперимента получены значения разности частот $\Delta\nu$, используемые в дальнейшем для расчета плотности бензина, дизельного топлива, моторного масла, а также смесового топлива состоящего из 50% дизельного топлива и 50% рапсового масла, с применением уравнения измерения [1].

Результаты расчета плотности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Плотность нефтепродуктов

Наименование жидкости	Плотность жидкости, кг/м^3	Значение $\Delta\nu$, Гц	Плотность жидкости рассчитанная по экспериментальным данным, кг/м^3
Бензин А-80	740	27	468
Бензин А-92	760	28	493
Дизельное топливо З-0,2-40	840	34	523
Дизельное топливо Л-0,2-40	860	35	530
Смесь рапсового масла и дизельного топлива 0,5ДТ+0,5РМ	872	36	554
Моторное масло МС-20сп	905	37	572

Из таблицы видно, что несмотря на то, что количественные значения плотности отличаются от реальных значений примерно на 30 %, тем не менее существует явно выраженная функциональная зависимость разности частот от плотности (рис. 7).

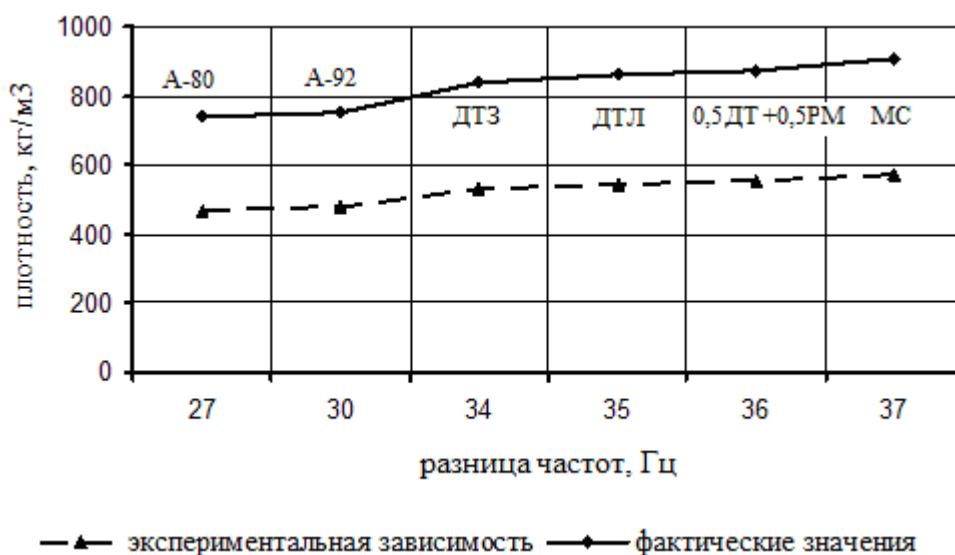


Рис. 7. Зависимость плотности от разницы частот следования пузырей

Различие между расчетными значениями и реальными показателями жидкости можно объяснить тем, что в расчетной формуле не учитывается влияние некоторых факторов, которые трудно учесть аналитически: испаряемости жидкости, растворимости газа в жидкости, охлаждении

жидкости при пропускании через нее газа. При измерениях эти факторы можно исключить градуировкой прибора по эталонным жидкостям.

С учетом проведенных исследований была разработана конструкция прибора, предназначенного для измерения плотности ГСМ и разработана методика его применения для контроля плотности.

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, О.А. Ясырова, 2009

УДК 536.24

*А.П. Ильин², Г.В. Шувалов¹, И.В. Клековкин¹,
А.В. Коршунов², Л.О. Толбанова², А.В. Мостовщиков²*

¹СГГА, Новосибирск

²Томский политехнический университет, Томск

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

*A.P. Il'in², G.V. Shuvalov¹, I.V. Klekovkin¹,
A.V. Korshunov², L.O. Tolbanova², A.V. Mostovnikov²*

¹Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

²Tomsk polytechnical university (TPU)

4 Kirova, Tomsk, Russian Federation

FEATURES OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES NANOPOWDER OF METALS

Features of physical and chemical properties nanopowder metals and ways of their definition are considered.

Физико-химические свойства нанопорошков (НП) металлов можно разделить на два вида: непрерывно изменяющиеся во времени и связанные с нестабильным состоянием и не изменяющиеся во времени, которые указывают на метастабильный характер состояния. Для получения надёжных результатов исследования НП и для их практического использования важным является установление причин изменения измеряемых характеристик и возможности ими управлять.

Изучение структуры и фазового состава НП было связано с поиском новых видов кристаллических решёток и с возможностью стабилизации металлов в рентгенаморфном состоянии. Для частиц металлов диаметром < 10 нм действительно наблюдался переход в нехарактерные для этого металла кристаллические состояния [1]. Интересным для кристаллохимии является экспериментальный факт перехода $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ при переходе от массивного состояния в наносостояние, причём размерная граница устойчивости соответствовала ~ 100 нм. Для получения НП в аморфном состоянии (стекол) необходимо создать экстремальные условия формирования наночастиц. Удобным для создания таких условий является электрический взрыв проводников в инертных газах: максимальная температура – 10^4 К, скорость охлаждения 10^8 К/с. Анализ полученных результатов эксперимента показал [2], что в условиях электрического взрыва металлы, не обладающие полиморфизмом, (Al, Cu, Ag), кристаллизуются в виде типичных

кристаллических решёток, но с пониженной рентгеновской плотностью (до 0,2 % отн.). При наличии полиморфизма в условиях электрического взрыва стимулируются кристаллические решётки с пониженной плотностью, причём такая закономерность характерна не только для металлов, но и для химических соединений. Ярким примером такой закономерности является изменение фазового состава при электрическом взрыве железного проводника в аргоне с добавкой ацетилен (5% отн.): исходный проводник – это α -Fe, а после взрыва – на 50 % γ -Fe. Из четырёх типов кристаллических решёток γ -Fe имеет минимальную рентгеновскую плотность. Аналогичные результаты получены для ряда других металлов: β -W, β -Ti и оксидов: γ -Al₂O₃, TiO₂ и др.

Одной из характеристик НП является насыпная плотность, отражающая дисперсность, состояние поверхности частиц, наличие газовой оболочки на поверхности частиц, степень удержания газов капиллярной системой НП и др [3]. Исходные нанопорошки алюминия имеют насыпную плотность 0,08 г/см³ и со временем насыпная плотность увеличивается, достигая 0,16 г/см³. В сравнении с микронными порошками перевод порошка в наносостояние приводит к снижению насыпной плотности более чем на порядок. По классификации дисперсных систем НП – это система «газ – твёрдое тело», которая может быть отнесена к аэрогелям: «твёрдая дисперсионная среда и газообразная дисперсная фаза».

По данным волюмометрического анализа (ГОСТ 10096-62) содержание металлического алюминия в НП составляет от 80 до 94 % масс. Причём содержание алюминия в пассивированных порошках зависит от вида газа – среды во взрывной камере: с увеличением молекулярной массы содержание металлического алюминия уменьшается: Al (H₂) – 94, Al (Ar) – 87, Al (Xe) – 80 % масс. Следует отметить, что сорбированный нанопорошком водород вносит погрешность в анализ: при волюмометрии результаты получаются завышенными на 2-4 %. При пассивировании воздухом происходит медленная замена газа – среды на компоненты воздуха. При этом площадь удельной поверхности в течение первых суток увеличивается на 25–30 %, а затем в течение более длительного периода времени (до шести суток) происходит стабилизация НП, и содержание алюминия остаётся постоянным на уровне 87–94 % масс. В этот период площадь удельной поверхности НП Al уменьшается согласно БЭТ на 20–25 %.

Согласно современным представлениям наночастицы имеют слоистую структуру, а не поликластерную. Кластеры металлов диаметром <10 нм имеют температуру спекания ниже комнатной. Сферическая форма наночастиц, полученных в экстремальных условиях, указывает, что частицы при охлаждении определённое время находятся в жидком состоянии и испытывают громадное давление за счёт Лапласова сжатия. В таком состоянии поры, пустоты и прочее выдавливается на поверхность частицы. Единственным типом дефектов наночастиц, сформированных в экстремальных условиях, являются смещения атомов относительно положения равновесия.

Таким образом, по совокупности физико-химических свойств нанопорошков, вещества в наносостоянии, наряду с газообразным, жидким,

твёрдым состояниями и плазмой, могут быть отнесены к новому агрегатному состоянию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Ю.И. Физика малых частиц. – М.: Наука. 1982. 359 с.
2. Тихонов Д.В. Электровзрывное получение ультрадисперсных порошков сложного состава. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. Томск. 1999. 240 с.
3. Ильин А.П., Громов А.А., Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. – Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. 154 с.

© А.П. Ильин, Г.В. Шувалов, И.В. Клековкин, А.В. Кориунов,
Л.О. Толбанова, А.В. Мостовицких, 2009

УДК 536.24

*Г.В. Шувалов¹, И.В. Клековкин¹, В.Я. Черепанов¹, А.П. Ильин²,
А.В. Коршунов², Л.О. Толбанова²*

¹СГГА, Новосибирск

²Томский политехнический университет, Томск

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

*G.V. Shuvalov¹, I.V. Klekovkin¹, V.Ja. Cherepanov¹, A.P. Il'in²,
A.V. Korshunov², L.O. Tolbanova²*

¹Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

²Tomsk polytechnical university (TPU)

4 Kirova, Tomsk, Russian Federation

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL MOTIVATION OF THE SYSTEM OF THE TESTING NANOPOWDER METAL

Parameters of the diagnostics nanoparticles precious metals are considered In article.

It Is Shown that for diagnostics нанопорошков necessary to define the following features:

- A contents of the admixtures with the help of element analysis;
- An nanostructural (the form, sizes, condition to surfaces, area to specific surface) of the feature;
- A sharing the particles on diameter;
- A parameters to chemical activity (unreactiveness).

По мере выработки месторождений ряда благородных металлов, содержащих самородные и рудные запасы, коммерческий интерес будут представлять месторождения металлов в наносостоянии, которые в настоящее время не эксплуатируются. При столь малых размерах частиц (10^{-9} м) в условиях промыва (дражный метод) такие частицы не успевают оседать, поэтому не улавливаются. При переработке рудного сырья также возможно присутствие наночастиц благородных металлов. При этом не все технологии способны улавливать и растворять наночастицы.

Цель настоящей работы – выбор параметров для диагностики наночастиц благородных металлов.

Для моделирования процессов, протекающих в процессе диагностики, в работе использовали нанопорошки молибдена и вольфрама.

Нанопорошки молибдена и вольфрама получали на опытно-промышленной установке УДП-4Г производства НИИ высоких напряжений [1].

Рост зарядного напряжения в условиях проводимых экспериментов от 19 до 29 кВ существенно увеличил энергию, выделяемую в дуговом разряде: $e_d/e_c = 0.2...1.6$. Величина же удельной введенной в проводник энергии e/e_c в данных экспериментах менялась незначительно – от 0,8 до 1,0. Поэтому четкой зависимости дисперсности порошков от величины энергии, введенной в проводник, в исследованном диапазоне энергий установить не удалось [2].

На рис. 1 показана зависимость площади удельной поверхности порошков молибдена от энергии дуговой стадии разряда. Увеличение дисперсности порошков наблюдается после превышения энергии дуговой стадии до $1,0e_c$. Порошки молибдена наибольшей площадью удельной поверхности ($S_{уд} = 3,3 \text{ м}^2/\text{г}$) получены для случая, когда энергия дуговой стадии принимала максимальное значение в условиях данного эксперимента – $1,6e_c$.

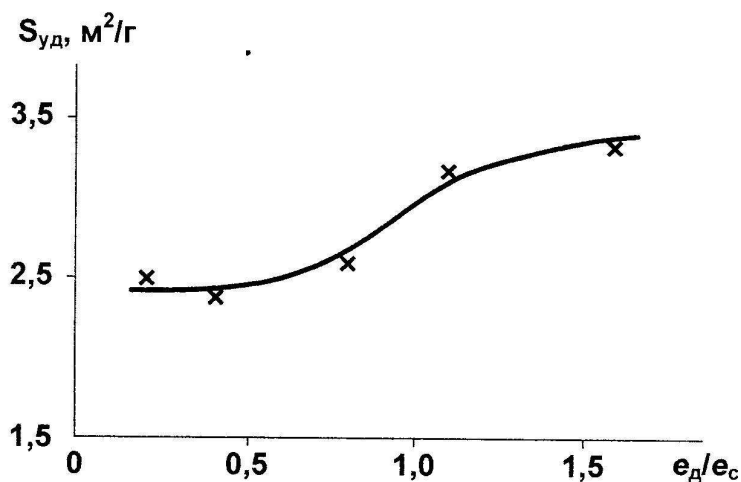


Рис. 1. Зависимость площади удельной поверхности электровзрывных порошков молибдена от энергии дуговой стадии

Полученные порошки молибдена имеют трехмодальное распределение частиц по диаметру (рис. 2), характерное для всех электровзрывных порошков, что связано с механизмом разрушения проводника и последующего охлаждения первичных продуктов ЭВП [3]. Первый максимум соответствует диаметру частиц 0,1 ... 0,12 второй – 0,6...0,9; третий – 3...8 мкм.

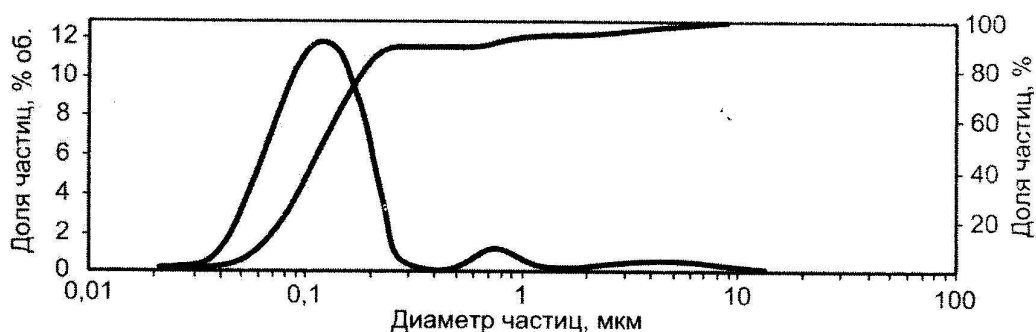


Рис. 2. Распределение по диаметру частиц порошка молибдена, полученного при ЭВП в аргоне при $e/e_c = 0,9$ и $e_d/e_c = 0,8$ (образец № 3, табл. 1)

Анализ снимков, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, показал, что продукты электровзрыва молибденовых проводников представляют собой порошки, частицы которых имеют сферическую форму. Среди частиц микрометрового диапазона имеются частицы, диаметр которых меньше, чем 100 нм. Частицы нанометрового диапазона покрывают поверхность больших частиц и образуют индивидуальные агломераты.

Активность полученных порошков молибдена определяли с помощью дифференциального термического анализа при нагревании в воздухе. Процесс окисления порошка протекал в две стадии с максимумами 441 °С и 517 °С (рис. 3) с увеличением массы образца. Наличие двух максимумов тепловыделения связано с бимодальным распределением частиц по диаметру: сначала окисляется фракция более мелких частиц, а затем – крупная фракция. При дальнейшем нагревании, начиная с 784 °С, наблюдался эндоэффект и резкое уменьшение массы образца, связанные с возгонкой оксида молибдена (VI). На термограмме НП молибдена при температуре ~307 °С наблюдался эффект выделения тепла (~8 кДж/моль), не сопровождавшийся изменением массы образца. Такой тепловой эффект объясняется протеканием релаксационных процессов в структуре НП молибдена.

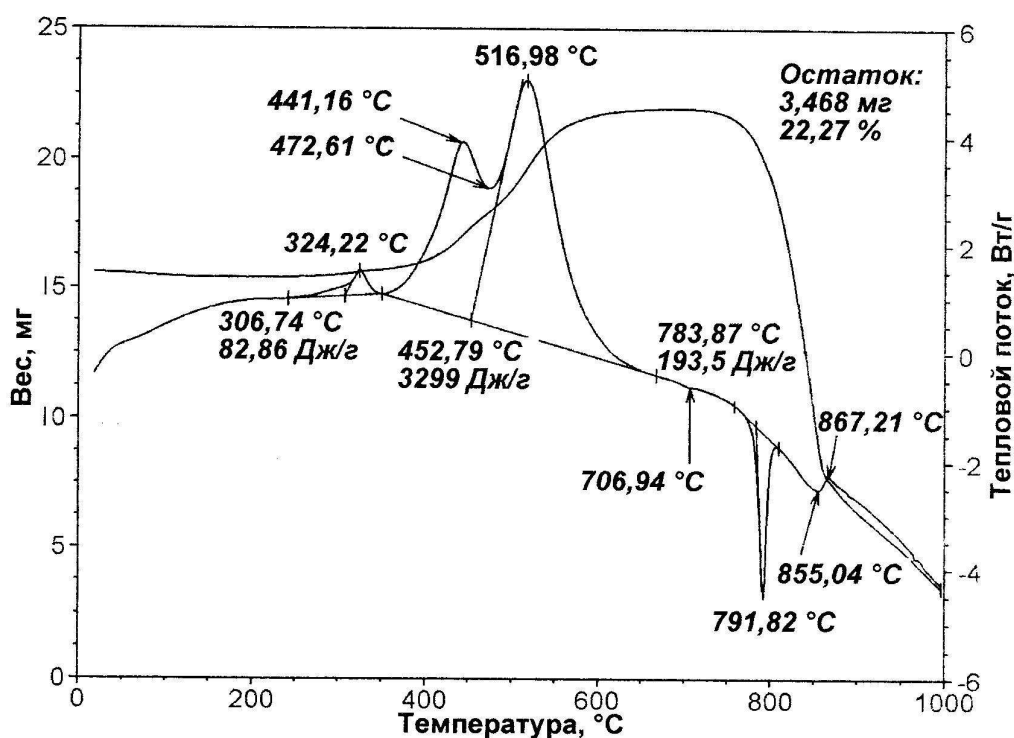


Рис. 3. Термограмма нанопорошка молибдена, полученного в атмосфере аргона при $e/e_c = 0,6$ и $e_d/e_c = 0,6$.

По результатам ДТА были рассчитаны параметры активности НП молибдена: температура начала окисления $t_{н.о.} = 350$ °С; степень окисленности $\alpha = 42,3$ %; максимальная скорость окисления $v_{max} = 0,007$ мас.%/с; удельный тепловой эффект составляет 3 299 Дж/г.

По данным электронно-микроскопических исследований частицы порошков вольфрама имеют также сферическую форму и гладкую поверхность. Наряду с частицами микронной фракции в порошках имеется фракция частиц, диаметр которых менее 100 нм. Мелкие частицы покрывают поверхность частиц микронных диаметров и образуют отдельные агломераты. Необходимо отметить, что все частицы представляют собой сферы, что указывает на прохождение их через жидкофазное состояние и на действие сил поверхностного натяжения.

Для получения нанопорошков вольфрама различной дисперсности электрический взрыв вольфрамовых проводников различных диаметров был проведен в следующих средах: в атмосфере аргона, в аргоне с добавкой 10 об. % азота, в азоте и в азоте с добавкой 5 об. % H_2 . Условия экспериментов и значения площади удельной поверхности полученных порошков представлены в табл. 1. Давление газа во всех случаях составляло $1,5 \cdot 10^5$ Па, кроме образца 9, который был получен при ЭВП в среде азота при давлении 0,3 атм. Длина взрывааемых проводников $l = 60$ мм.

Таблица 1. Площадь удельной поверхности электровзрывных порошков вольфрама в зависимости от состава газа во взрывной камере

№	d , мм	U , кВ	e/e_c	e_d/e_c	Газ	$S_{уд}$, м ² /г
1	0,2	13,7	0,5	0,8	Ar	1,5
2	0,2	13,7	0,5	0,7	Ar+10 об. % N_2	1,8
3	0,2	13,7	0,5	0,7	N_2	1,9
4	0,2	13,7	0,5	0,7	N_2 +5 об. % H_2	1,9
5	0,3	22,9	0,4	1,1	Ar	1,9
6	0,3	22,9	0,4	1,1	Ar+10 об. % N_2	2,4
7	0,3	22,9	0,7	0,8	N_2	1,7
8	0,3	22,9	0,7	0,8	N_2 +5 об. % H_2	1,7
9	0,3	22,9	0,4	0,9	N_2 , $0,3 \cdot 10^5$ Па	2,6

Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что состав газа в разрядной камере при взрыве существенно влияет на дисперсность порошков. Так, при электрическом взрыве вольфрамового проводника диаметром 0,2 мм использование азота в качестве окружающей среды позволило получить порошки вольфрама с большей площадью удельной поверхности ($S_{уд} = 1,9$ м²/г). При электрическом взрыве вольфрамового проводника диаметром 0,3 мм порошки высокой дисперсности ($S_{уд} = 2,4$ м²/г) были получены в среде аргона с добавкой азота, что в этом случае объясняется не только влиянием состава газа-среды, но и высоким значением энергии дуговой стадии разряда ($e_d/e_c = 1,1$), как это было показано ранее.

Порошки вольфрама максимальной дисперсности в условиях данных экспериментов удалось получить, понизив давление азота с $1,5 \cdot 10^5$ до $0,3 \cdot 10^5$ Па. Площадь удельной поверхности порошков в этом случае составила 2,6 м²/г (табл. 1).

Таблица 2. Параметры химической активности при нагревании в воздухе порошков, полученных электровзрывом вольфрамовых проводников

№ образца	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \% \leq 1000 ^\circ\text{C}$	$v_{\text{ox}}, \%$
1	310	465	23,7	0,0061
2	310	470	23,8	0,0070
3	320	475	23,9	0,0065
4	310	515	23,7	0,0097

Для исследованных образцов характерна зависимость второй стадии – стадии интенсивного окисления, от вида рабочего газа и от давления. Температура начала окисления второй стадии t_2 повышается при использовании химически активных газов и при уменьшении давления во взрывной камере. Максимальную скорость окисления имеет образец, полученный в азоте при давлении $0,3 \cdot 10^5$ Па, что объясняется наибольшей дисперсностью этого образца. Параметры термической активности (табл.2) коррелируют с дисперсностью исследованных порошков и с условиями их получения.

Закключение

Для диагностики металлов в наносостояния необходимо определить следующие характеристики порошков:

- Содержание примесей при помощи элементного анализа;
- Наноструктурные (форма, размеры, состояние поверхности, площадь удельной поверхности) характеристики;
- Распределение частиц по диаметру;
- Параметры химической активности (инертности).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов Д.В. Электровзрывное получение ультрадисперсных порошков сложного состава: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2000. – 237 с.
2. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В., Яблуновский Г.В. Получение нанопорошков вольфрама методом электрического взрыва проводников // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 4. – С. 68-70.
3. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение/ Под ред. А.П. Ильина. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 148 с.

© Г.В. Шувалов, И.В. Клековкин, В.Я. Черепанов,
А.П. Ильин, А.В. Коршунов, Л.О. Толбанова, 2009

УДК 536.24

*Г.В. Шувалов¹, И.В. Клековкин¹, А.П. Ильин²,
А.В. Коршунов², Л.О. Толбанова²*

¹СГГА, Новосибирск

²Томский политехнический университет, Томск

РЕАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОРОШКОВ В НАНОСОСТОЯНИИ И ПАРАМЕТРЫ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

*G.V. Shuvalov¹, I.V. Klekovkin¹, A.P. Il'in²,
A.V. Korshunov², L.O. Tolbanova²*

¹Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

²Tomsk polytechnical university (TPU)

4 Kirova, Tomsk, Russian Federation

REACTIONARY ABILITY OF POWDERS IN MILLIMICRO AND PARAMETERS OF CHEMICAL ACTIVITY NANOPOWDER OF METALS

In article features of reactionary ability of powders in millimicro and parametres of chemical activity nanopowder metals are considered. Experimental data by definition nanopowder chemical activity of aluminium, tungsten are resulted.

Нанопорошки металлов, согласно общепринятой точке зрения, обладают высокой реакционной способностью. В то же время, при их хранении, транспортировании и при переработке необходимо снижать и контролировать способность нанопорошков металлов к спеканию, самоспеканию и к взаимодействию с различными компонентами и реагентами. На основании полученных экспериментальных результатов исследований нанопорошков металлов и термодинамических расчетов было предложено использовать параметры химической активности, которые позволяют сравнивать нанопорошки не только одного металла, но и разных по природе металлов [1].

Целью настоящей работы является изучение реакционной способности различных по свойствам нанопорошков металлов и сравнить параметры их химической активности.

Для тестирования устойчивости нанопорошков (НП) и их смесей к окислению и к химическому взаимодействию предлагается использовать дифференциальный термический анализ (ДТА). На основе данных ДТА определяют четыре параметра химической активности [1]. В работе использовали термоанализатор SDT Q600; анализ проводили в режиме линейного нагрева в интервале 20–1 000 °С со скоростью нагрева 10 град/мин в атмосфере воздуха; $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучение, метод порошка [2]. Для тестирования

был выбран нанопорошок алюминия и его смеси с нанопорошком молибдена (табл. 1) и с нанопорошком вольфрама (табл. 2), которые, как известно обладают каталитическими свойствами. Для тестирования были выбраны нанопорошки алюминия, молибдена и вольфрама, полученные с помощью электрического взрыва проводников в среде аргона [3]. Исследуемые смеси подвергались ДТА, на основе которого были определены параметры химической активности для оценки термической устойчивости смесей.

Параметры химической активности НП алюминия. При нагревании в воздухе согласно ДТА (рис. 1) НП алюминия проявляет высокую активность в сравнении с другими, используемыми в данной работе, порошками.

По ТГ (рис. 1) заметна десорбция газообразных веществ, адсорбированных на поверхности частиц (~3 мас. %). Затем происходит резкое увеличение скорости роста массы (ТГ) и выделение теплоты, носящие взрывоподобный характер (ДТА).

Параметры химической активности НП молибдена и его смесей с НП алюминия. При нагревании НП молибдена (рис. 2) процесс его окисления протекает в две стадии с максимумами при 441 и 517 °С, что сопровождается увеличением массы образца. Наличие двух максимумов тепловыделения, наиболее вероятно, связано с бимодальным распределением частиц по диаметру: сначала окисляется фракция более мелких частиц, а затем – более крупная фракция. Необходимо также отметить, что вероятность образования MoO_2 при повышенных температурах мала: оксид молибдена (IV) практически мгновенно окисляется до MoO_3 и его можно получить только в восстановительной среде [4]. При дальнейшем нагревании, начиная с 784 °С, наблюдается эндоэффект и резкое уменьшение массы образца, связанные с возгонкой оксида молибдена (VI).

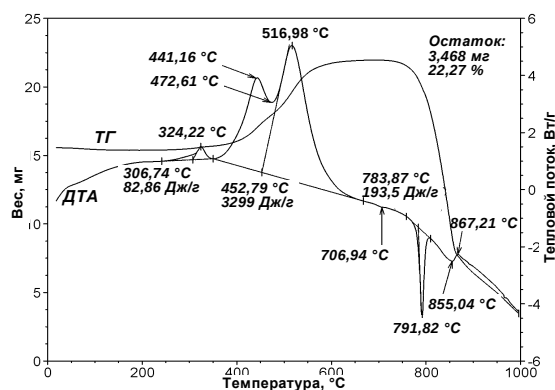
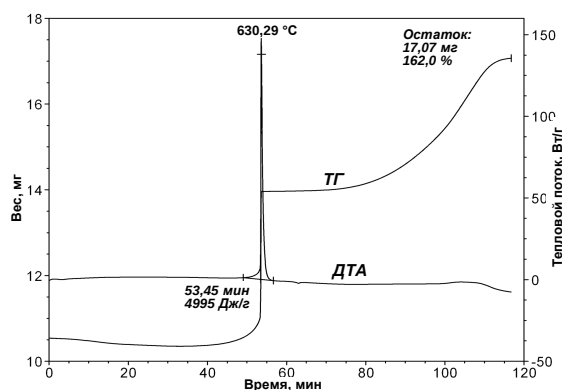


Рис. 1. Термограмма НП алюминия Рис. 2. Термограмма НП молибдена

На термограмме НП молибдена при температуре ~300 °С наблюдался эффект выделения тепла (8 кДж/моль), не сопровождавшийся изменением массы образца. Такой тепловой эффект объясняется протеканием релаксационных процессов в структуре наночастиц, что для НП молибдена обнаружено впервые [5].

Параметры химической активности исследуемых смесей (табл. 2), необходимые для оценки устойчивости к окислению и к химическому взаимодействию компонентов, были также определены по данным термического анализа.

При содержании НП молибдена в смеси менее 30 мас. % термограмма имеет вид, близкий к термограмме НП алюминия: наблюдается один узкий экзотермический экстремум окисления алюминия, сопровождающийся интенсивным окислением с большим тепловыделением и значительным приростом массы (до 4995 Дж/г и 63,8 %, соответственно, для НП алюминия).

Таблица 2. Состав исследуемых смесей НП алюминия и молибдена и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$t_{н.о.}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \%$	$v_{\max}, \%$ мас./с	$\Delta H, \text{Дж/г}$
	Al	Mo				
1	100	0	450	63,8	0,130	4995
6	90,9	9,1	400	52,5	0,130	4265
7	83,3	16,7	380	42,8	0,080	4612
8	71,4	28,6	370	20,3	0,020	4020
9	0	100	350	42,3	0,007	3299

В целом, параметры активности смесей изменялись немонотонно: максимальная скорость окисления ($v_{\max}$, мас.%/с) уменьшалась с увеличением содержания НП молибдена. При нагревании до 1000 °С степень окисленности (α , %) смесей НП ниже, чем НП алюминия без добавок и минимальна (20,3 %) для образца 3. Что касается величины удельного теплового эффекта (ΔH , Дж/г), то для смесей он меньше, чем для НП алюминия без добавок: в целом ΔH с увеличением содержания добавки НП молибдена уменьшается. С увеличением содержания НП молибдена в смеси температура начала окисления снижается от 450 °С (НП алюминия) до 370 °С (НП молибдена).

Параметры химической активности НП вольфрама и его смесей с НП алюминия. Согласно ДТА исходных порошков и их смесей и расчетам параметров активности приведены в табл. 3.

Таблица 3. Состав исследуемых смесей НП алюминия и вольфрама и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$t_{\text{н.о.}}$, °C	α , %	v_{max} , мас. %/с	ΔH , 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

Температура начала окисления ($T_{\text{н.о.}}$) НП алюминия составляла 400 °C, а НП вольфрама – 320 °C. С ростом содержания НП вольфрама в смесях $t_{\text{н.о.}}$ не изменялась (табл. 3). Для смеси НП вольфрама и алюминия, содержащей 16,7 мас. % НП вольфрама три параметра активности из четырех в несколько раз выше, чем для других составов. При нагревании в воздухе вначале окисление НП протекает относительно медленно, а затем, с увеличением количества выделяющегося тепла, процесс окисления переходит в режим теплового взрыва.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильин А.П., Яблуновский Г.В., Громов А.А. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
2. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 526 с.
3. Ильин А. П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при ТПУ // Известия ТПУ. 2003. Т. 306, № 1. С.133–139.
4. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Т. 2. – М.: Мир, 1971.–871 с.
5. Толбанова Л.О. Синтез керамических нитридсодержащих материалов сжиганием в воздухе смесей нанопорошка алюминия с нанопорошками W и Mo и порошком Cr: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 175 с.

© Г.В. Шувалов, И.В. Клековкин, А.П. Ильин,
А.В. Коршунов, Л.О. Толбанова, 2009

УДК 621.317
А.А. Попов
ОмГТУ, Омск

СПОСОБ УЧЁТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛА В МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМАХ

A.A. Popov
Omsk State Technical University (OSTU)

THE WAY THE ACCOUNT OF CONSUMPTION OF HEAT IN MULTIROOM HOUSES

The developed way allows to make the account of size of consumption of heat for each subscriber, irrespective of distributing pipes of system of heating and thus takes into account type of heating devices used in apartments.

В последнее время все более остро встает вопрос оплаты коммунальных услуг потребителями. В западных странах уже давно применяется индивидуальный учет всех энергоресурсов. В России же при отсутствии индивидуальных счетчиков прибегают к расчетному определению потребления, к вычислению так называемого норматива. Норматив – эта средняя величина энергопотребления, определенная для конкретной местности. Однако эта средняя величина является зачастую завышенной с целью покрытия неравномерности потребления или выравнивания небаланса [1].

В рамках данной работы рассмотрена проблема учета потребления и распределения тепловой энергии между квартирами.

На сегодняшний день наиболее популярным способом решения задачи поквартирного учета потребляемого тепла заключается в установке единого теплосчетчика на многоквартирный дом, по показаниям которого осуществляется расчет с теплоснабжающей организацией, и распределение суммарного потребленного количества тепла по квартирам по более или менее объективному критерию. Этим критерием может быть площадь квартиры или ее объем.

Приборный учет тепла в квартире представляется возможным лишь в случае горизонтальной разводки системы отопления в доме. В этом случае устанавливается классический счетчик тепла на вводе квартиру. Основной проблемой в этом случае остается небаланс расхода тепла по дому (отопление мест общего пользования). Получение общей картины теплопотребления по дому требует объединения всех индивидуальных теплосчетчиков в единую систему. Кроме того, горизонтальные системы отопления скорее редкость, чем правило. Большая часть жилого фонда, оборудована вертикальной разводкой, при которой установка таких теплосчетчиков будет нерентабельной.

К настоящему времени уже разработаны системы учета и распределения тепловой энергии, адаптированные к российским условиям эксплуатации. Одна из таких систем была предложена [2] и внедрена в пилотную эксплуатацию в г. Омске. Эта система может быть установлена для учета потребления тепла многоквартирным домом с последующим определением доли потребления каждой отдельной квартирой.

Предложенный способ предусматривает измерение общедомового потребления тепла, которое определяет теплосчётчик в соответствии с формулой

$$Q_{дом} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G \cdot (h_1 - h_2) \cdot d\tau, \quad (1)$$

где $Q_{дом}$ – количество теплоты, потреблённое домом; G – расход теплоносителя; h_1, h_2 – значения удельной энтальпии теплоносителя на входе и на выходе из дома.

Из уравнения теплового баланса

$$Q_{дом} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (2)$$

где Q_i – количество теплоты, потреблённое i -й квартирой, находят средний общедомовой коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ср}$

$$\alpha_{ср} = \frac{Q_{дом}}{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \cdot S_i \cdot \tau}, \quad (3)$$

где τ – продолжительность потребления тепла; ΔT_i – разность значений температуры на поверхности каждого источника тепла и окружающей его среды; S_i – площадь теплоотдающей поверхности квартирных источников тепла.

С помощью этого коэффициента затем рассчитывают потребления тепла каждой квартирой по формуле распределения

$$Q_i = \alpha_{ср} \Delta T_i \cdot S_i \cdot \tau. \quad (4)$$

Данная методика позволяет достаточно корректно поквартирно распределять теплопотребление в многоквартирном доме. Справедливость такого метода тем выше, чем более идентичны характеристики установленных отопительных приборов.

Однако, разные типы отопительных приборов обладают различными характеристиками и коэффициентами теплоотдачи. Это обстоятельство может быть учтено путем введения корректирующего коэффициента, характеризующего эксплуатационные особенности применяемых отопительных приборов, а также их тип.

В данной работе рассматривается способ определения потребления тепла локальными потребителями в многоквартирном доме с максимальной точностью, обусловленной учетом всех типов отопительных приборов,

установленных в каждой квартире, а также независимо от типа разводки системы отопления (вертикальная, горизонтальная, лучевая).

Указанная цель и технический результат достигаются следующим образом.

В формулу Ньютона для конвективного теплообмена вводится коэффициент тепловой эффективности отопительного прибора, который учитывает различные их типы. Для каждого типа отопительного прибора должен быть известен коэффициент тепловой эффективности.

Тогда выделенное каждым отопительным прибором количество теплоты определяется выражением

$$Q_i = \beta_i \cdot \alpha_{cp} \cdot S_i \cdot \Delta T \cdot \tau, \quad (5)$$

где β_i – индивидуальный коэффициент тепловой эффективности каждого отопительного прибора. Этот коэффициент определяется по следующей формуле:

$$\beta_i = \frac{q_i}{q_0}, \quad (6)$$

где q_i – номинальная плотность теплового потока на поверхности i -го отопительного прибора, q_0 – плотность теплового потока на поверхности базового отопительного прибора.

Из (6) видно, что параметры любого отопительного прибора, установленного у квартиросъемщика, можно привести к параметрам базового с помощью безразмерного коэффициента тепловой эффективности.

В качестве базового лучше выбрать тот тип отопительного прибора, который установлен в данном доме в наибольшем количестве.

В этом случае с помощью найденного среднего коэффициента теплоотдачи α_{cp} будет более точно определено количество теплоты, отданное отопительными приборами, установленными в квартирах.

Введя значение β_i , можно не только откорректировать величину потребления тепла каждым отопительным прибором в любой квартире. Кроме этого произойдет перерасчет среднего значения коэффициента теплоотдачи, который находят с учетом уравнения теплового баланса по формуле (3).

Предлагаемый способ в экспериментальном варианте использован в информационно-измерительной системе определения расхода тепла в 80-ти квартирном многоэтажном доме в феврале-мае 2007 года в г. Омске. Способ подтвердил высокую эффективность и корректность определения расхода тепла по каждой квартире.

Рассмотрим данную методику на примере использования трех различных радиаторов: российского МС-140, итальянского Calidor Super и немецкого Arbonia. Их номинальные тепловые потоки и площади поверхностей теплоотдачи приведены в табл. 1.

Примем общедомовое потребление тепла равное 1 Мкал в час (что составляет 1,163 кВт), разность значений температуры для всех отопительных приборов равной 40 °С, промежуток времени – 1 час.

Определим коэффициенты теплоотдачи и теплопотребления способом, приведенным в Патенте РФ № 2138029. Далее, используя формулы (2), (5), (6), определим значения коэффициентов теплоотдачи, тепловой эффективности и теплопотребления. Данные действия проведем в двух вариантах: когда в качестве базового отопительного прибора выступают МС-140-500 и Arbonia 2050-500. Полученные данные внесем в табл. 2.

Таблица 1. Параметры отопительных приборов, необходимых для расчета плотности теплового потока

Наименование отопительного прибора	Номинальный тепловой поток, кВт	Площадь теплоотдачи, м ²
МС-140-500	0,1850	0,244
Calidor Super	0,1940	0,480
Arbonia 2050-500	0,0935	0,144

Таблица 2. Расчетные значения тепловой эффективности

Тип отопительного прибора	Значения без учета коэффициента тепловой эффективности отопительного прибора		Значения с учетом коэффициента тепловой эффективности отопительного прибора					
	$\alpha_{cp}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	теплопотребление, Вт	Базовый МС-140-500			Базовый Arbonia 2050-500		
			$\alpha_{cp}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	β_i	теплопотребление, Вт	$\alpha_{cp}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	β_i	теплопотребление, Вт
МС-140-500	33,4965	326,9280	46,6616	1	455,4172	39,9496	1,168	455,4172
Calidor Super		643,1320		0,533	477,0495		0,623	477,0495
Arbonia 2050-500		192,9401		0,856	229,8430		1	229,8430

Сравнивая полученные значения с рассчитанными ранее можно сделать вывод, что независимо от выбора базового типа радиатора значения расхода по каждому отопительному прибору получаются одинаковыми.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет производить более корректно распределение тепловой энергии между отопительными приборами. Кроме того, данный метод корректировки не требует дополнительных затрат на стендовые испытания. Он лишь уточняет значения индивидуального потребления, не внося дополнительных погрешностей в измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитина, С.В. Поквартирный учет и регулирование тепла: обзор существующего оборудования и способов учета / С.В. Никитина // Энергосбережение. – 2003. – № 2. – С. 40–43.
2. Пат. 2138029 Российская Федерация, МПК 6 G 01 K 17/08 Способ определения расхода тепла локальными потребителями, входящими в объединённую систему потребителей тепла / В.С. Казачков; опубл. 20.09.1999, Бюл. № 26. – 4 с.: 1ил.

© А.А. Попов, 2009

УДК 697.1
М.Ю. Северин
ОмГТУ, Омск

УЧЕТ ТЕПЛА В МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМАХ

M.Yu. Severin
Omsk State Technical University (OSTU)
Prospekt Mira 11, Omsk, 644050, Russian Federation

HEAT CALCULATION IN APARTMENT HOUSE

At present in Russia more and more sharply stands a question of payment of municipal service by consumers. Reform of municipal economy has led to the fact the consumer has risen before a choice: whether to continue to pay under rule which increase in the unknown image, or to pass to the account of the consumption for the purpose of reception of real figure energy consumption. This reform has defined one more step of transition to capitalist relations.

The instrument calculation of heat in apartment is obviously possible only in case of horizontal distributing of heating system in the house. In this case the classical counter of heat on input apartment is established. The basic problem in this case remains irregular of heat expense in the house (heating of places of the general using and others). Overall picture reception on use of heat in the house demands association of all individual heat of counter in uniform system. Besides, horizontal systems of heating are faster an occasion than a rule. The available housing most part is equipped by vertical distributing at which installation of such heat of counter will be unprofitable.

В качестве комплексного решения выступает единая информационно-измерительная системы, которая содержит информацию о структуре системы отопления в доме, а также позволяет распределять затраты на отопление для каждого отдельного потребителя.

Данный способ определения количества тепла основан на использовании закона Ньютона-Рихмана, согласно которому,

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \cdot t, \quad (1)$$

где Q – количество тепла, использованное потребителем;

α – коэффициент теплоотдачи;

S – площадь поверхности теплоотдачи объекта;

T_1 – температура поверхности теплоотдачи объекта;

T_2 – температура охлаждающей среды;

t – время потребления тепла.

Такой способ предусматривает определение общего расхода тепла объединенной системой потребителей тепла за конкретное время теплоотдачи теплоистонком. Этот расход определяет домовый счетчик тепла.

$$Q_{\text{дом}} = \int_{t_1}^{t_2} G \cdot (h_1 - h_2) \cdot dt, \quad (2)$$

где $Q_{\text{дом}}$ – общедомовое потребление тепла;

G – расход теплоносителя на вводе дома за время T ;

h_1, h_2 – энтальпии теплоносителя на входе и на выходе из дома, пропорциональные соответствующим температурам.

Затем с помощью уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{дом}} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (3)$$

где Q_i – потребление тепла i -й квартирой;

Из выражения (3) при помощи (1) находится средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$ по объединенной системе потребителей тепла.

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{дом}}}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot \Delta T_i \cdot t}, \quad (4)$$

где t – время теплоотдачи теплоисточника;

S_i – площадь поверхности теплоотдачи теплоисточника локального потребителя тепла;

ΔT_i – разность температур на поверхности теплоисточника локального потребителя тепла и охлаждающей среды локального потребителя тепла;

n – количество отопительных приборов у локальных потребителей тепла.

С помощью этого коэффициента рассчитывается расход тепла локальным потребителем за то же конкретное время потребления тепла.

Однако, разные типы применяемых отопительных приборов обладают различными характеристиками и коэффициентами теплоотдачи. Ввиду усреднения коэффициента теплоотдачи по дому в расчетах индивидуального теплоснабжения появляется ошибка. Она может быть устранена путем введения корректирующего коэффициента, характеризующая эксплуатационные особенности применяемых приборов, их тип.

Целью работы является описание способа определения расхода тепла локальными потребителями, входящими в объединенную систему потребителей тепла с максимальной точностью и с учетом всех типов отопительных приборов (радиаторов), установленных в каждой квартире, а также независимо от типа разводки системы отопления (вертикальная, горизонтальная, лучевая и др.).

Указанная цель и технический результат реализуются следующим образом.

В формулу Ньютона – Рихмана (1) вводится коэффициент тепловой эффективности радиатора, который учитывает различные типы отопительных приборов, установленных у локальных потребителей. Для каждого типа отопительного прибора должен быть заранее найден свой коэффициент тепловой эффективности.

Тогда расход тепла для каждого отопительного прибора в объединенной системе потребителей тепла определяется выражением:

$$Q_i = \beta_i \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot S_i \cdot \Delta T \cdot t, \quad (5)$$

где β_i – коэффициент тепловой эффективности каждого конкретного отопительного прибора, установленного у локального потребителя тепла. Данный коэффициент определяется по следующей формуле:

$$\beta_i = \frac{q_{\text{уд.}i}}{q_{\text{уд.б}}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{уд.}i}$ – удельный номинальный тепловой поток i -го отопительного прибора;

$q_{\text{уд.б}}$ – удельный номинальный тепловой поток, отопительного прибора, выбранного в качестве базового;

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{дом}}}{t \cdot \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot S_i \cdot \Delta T_i}, \quad (7)$$

В настоящее время применяются сотни видов отопительных приборов, имеющих разные эксплуатационные характеристики. В технической документации, как правило, приводятся значения номинального теплового потока и площади одной секции радиатора. Из этих данных видно, что, имея равные значения номинального теплового потока, существующие радиаторы могут значительно отличаться по площади поверхности секции. Эти параметры не учитываются на сегодняшний день ни одной системой (устройством) учета тепла локальными потребителями. Но поскольку они являются основными эксплуатационными характеристиками радиаторов отопления, то могут быть взяты за основу для корректировки величины теплопотребления.

В предлагаемом способе корректирующей величиной, которая учитывает различия между типами отопительных приборов, будет являться коэффициент тепловой эффективности радиатора – отношение удельного номинального теплового потока каждого радиатора к удельному тепловому потоку радиатора, выбранного в качестве базового. При этом величины удельных номинальных тепловых потоков рассчитываются по данным технических паспортов радиаторов, а коэффициент тепловой эффективности радиатора β_i находится из (6).

Этот коэффициент должен учитываться при расчете величины потребления тепла каждым отопительным прибором у всех локальных потребителей тепла.

Для определения коэффициента β_i необходимо найти удельный номинальный тепловой поток – это величина, равная отношению номинального теплового потока, создаваемого радиатором, к площади его поверхности:

$$q_{\text{уд.}i} = \frac{q_i}{S_i}, \quad (8)$$

где q_i – номинальный тепловой поток, создаваемый i -м радиатором;
 S_i – площадь поверхности теплоотдачи i -го радиатора.

Далее выбирается тип радиатора, который будет считаться базовым. Рассчитанный для этого радиатора удельный номинальный тепловой поток и будет считаться базовым значением удельного потока $q_{уд.б.}$. Из (6) видно, что параметры любого радиатора, установленного у квартиросъемщика, можно привести к параметрам базового с помощью безразмерного коэффициента тепловой эффективности.

В качестве базового можно выбрать любой тип отопительного прибора: с максимальной, минимальной или средней удельной теплоотдачей. Но лучше выбрать тот тип радиатора, который установлен в данном доме в наибольшем количестве.

В этом случае с помощью найденного среднего коэффициента теплосъема $\alpha_{ср}$ будет более точно определено количество тепла, отданное отопительными приборами у локальных потребителей тепла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Европейский стандарт EN834. Распределители затрат на отопление для учета значений потребления от отопительных поверхностей в помещении. Приборы с электрическим снабжением [электронный ресурс].– режим доступа: <http://www.abok.ru/>

2. Европейский стандарт EN835 Распределители затрат на отопление для учета значений потребления от отопительных поверхностей в помещении. Приборы, не потребляющие электрическую энергию, основанные на принципе парообразования [электронный ресурс].– режим доступа: <http://www.abok.ru/>

3. Низовцев, М.И. Влияние режимных параметров и направления подачи теплоносителя на работу регистраторов расхода тепла/ М.И. Низовцев, В.И. Терехов, З.П. Чепурная// Теплосиб-2006: материалы конференции.– Новосибирск.– 2006.–с.48-53

4. Никитина, С.В. Поквартирный учет и регулирование тепла: обзор существующего оборудования и способов учета/С.В. Никитина//Энергосбережение.– 2003.– №2.– с.40-43.

5. Распределение и учет энергоресурсов в квартирах многоэтажных жилых домов при установке в них автоматизированной системы/ В.С. Казачков [и др.]// Энергосбережение и энергетика в Омской области.– 2005.– №4 (17).– с.

© М.Ю. Северин, 2009

УДК 536.6

Н.А. Курбатова, Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов
СГГА, Новосибирск

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПОЛОСТИ МОДЕЛИ АЧТ

N.A. Kurbatova, D.P. Trocenko, V.Ya. Cherepanov
Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)
10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

MEASURING INSTALLATION FOR RESEARCHES OF TEMPERATURE AND THERMAL FIELDS OF A CAVITY OF ABSOLUTELY BLACK BODY

The measuring installation for study of dependences of factor of blackness absolutely black body from heterogeneity of temperature and density of a thermal flow of a radiating cavity, emissive of her surface and diameter of a target aperture is developed.

Для определения метрологических характеристик различных оптико-электронных приборов и комплексов все большее распространение получают различные излучатели, реализующие абсолютно черное тело (АЧТ). Модели АЧТ осуществляют в виде полости с хорошо поглощающими внутренними стенками, снабженной небольшим отверстием. Условие малости отверстия заключается в том, что его площадь должна быть намного меньше площади внутренней поверхности полости АЧТ [1]. Кроме этого, строгое выполнение законов «черного» электромагнитного излучения соблюдается лишь при условии постоянства и однородности температурного поля излучающей полости.

Близость излучения реальных тел к такому черному излучению определяется коэффициентом черноты ε (коэффициентом теплового излучения, степенью черноты, излучательной способностью), который для реальных тел может изменяться в диапазоне $0 < \varepsilon < 1$. Для моделей АЧТ близость этого коэффициента к единице определяется, как правило, расчетным путем [2].

В данной работе рассмотрена измерительная установка, разработанная для изучения влияния указанных условий на коэффициенты черноты тепловых излучателей в виде модели АЧТ.

Схема установки приведена на рис. 1.

Установка состоит из прецизионного жидкостного термостата 1, в рабочее пространство которого помещается тепловой излучатель 2 с выходным отверстием 3, тепловой поток через которое измеряется датчиком 4. Излучатель выполнен в виде куба из стеклотекстолита, покрытого полированной медной фольгой. На внутренней поверхности каждой грани, имеющей размер (150×150) мм,

расположены датчики теплового потока в виде дисков диаметром 25 мм и толщиной 2 мм. Рядом с этими датчиками расположены чувствительные элементы 5 (спаи) дифференциальных медь-константановых термоэлектрических датчиков температуры. Сигналы всех двенадцати датчиков измеряет многоканальный измеритель 6. Измеренные значения отображаются с разрешением в 1 мкВ на мониторе компьютера 7.

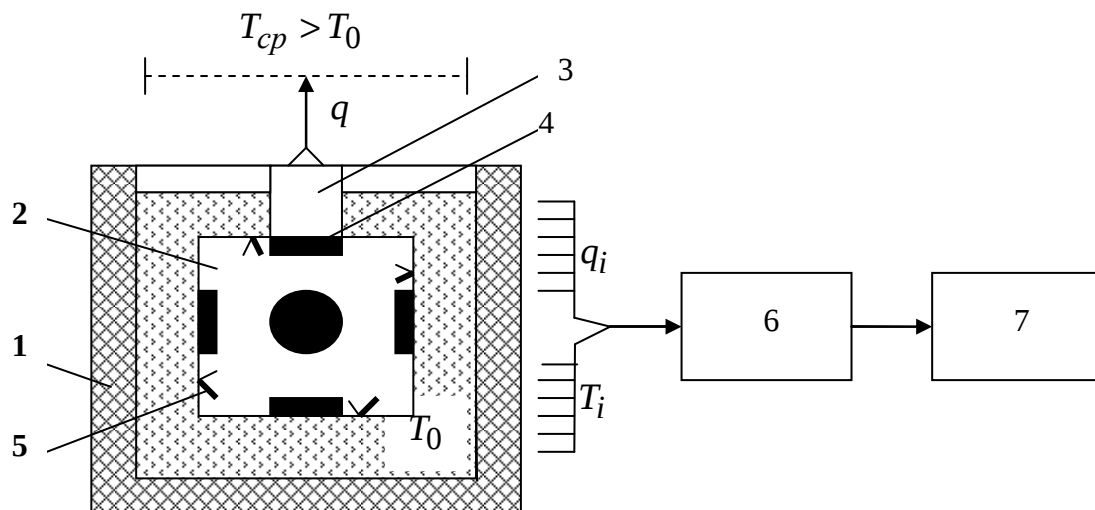


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – термостат, 2 – излучатель, 3 – выходное отверстие, 4 – датчик теплового потока, 5 – датчик температуры, 6 – измеритель сигналов, 7 – компьютер

Термостат обеспечивает постоянство температуры T_0 и однородность ее распределения по объему рабочей камеры на уровне ± 5 мК в диапазоне от 20 до 150 °С. Предусмотрена также возможность термостатирования излучателя в ваннах с тающим льдом и кипящей водой.

В установке использовались термоэлектрические датчики теплового потока с коэффициентом преобразования от 70 до 80 Вт/(м²·мВ). Значения этих коэффициентов определялись с погрешностью 2 % в предварительных опытах с помощью теплотрического компаратора КТМ-01 [3] и эталонного датчика теплового потока, прослеживаемого к Государственному первичному эталону единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 176-2008. Эталонный датчик размещен в отверстии излучателя. Датчики теплового потока и измеритель их сигналов обеспечивают регистрацию малых потоков с плотностью менее 0,1 Вт/м².

Значение коэффициентов черноты внутренней поверхности излучателя и поверхности датчиков теплового потока также определялись в предварительных опытах с помощью терморadiометра ТРМ-И [4].

Используемые в установке дифференциальные термоэлектрические датчики имеют чувствительность около 40 мкВ/К, что позволяет измерять разности значений температуры менее 0,05 °С.

При помещении излучателя в термостат через выходное отверстие излучателя проходит тепловой поток плотностью q , направление и интенсивность которого определяется в соответствии с законом Стефана-Больцмана разностью четвертых степеней значений абсолютной температуры T_0 излучателя и температуры T_{cp} среды. Если $T_0 < T_{cp}$, например, когда излучатель помещен в тающий лед, он становится приемником излучения, и тепловой поток q становится направленным в полость такого приемника.

Разработанная установка позволяет установить экспериментальные зависимости коэффициента черноты излучателя (по показаниям эталонного датчика) от характера распределения температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности граней куба, а также от коэффициента черноты этих поверхностей и размеров выходного отверстия. Это позволит выработать экспериментально обоснованные рекомендации к построению моделей АЧТ различных конструкций, а также создавать излучатели с контролируемым коэффициентом черноты излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Статическая физика. – М. «Наука», 1964. – 568 с.
2. Куинн, Т. Температура. – М.: «Мир», 1985. – 448 с.
3. Черепанов, В.Я. Методы и средства определения метрологических характеристик контактных преобразователей теплового потока // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С.17-21.
4. Парфинский В.А., Середенко М.М., Шипунов В.Л. Физические основы метода измерения степени черноты на терморadiометре ТРМ // Вопросы авиационной науки и техники. Научно-технический сборник. – 1989. – № 5. – С.32 - 34.

© Н.А. Курбатова, Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов, 2009

УДК 528

А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров, М.В. Бодров

ИТ СО РАН, Новосибирск

АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ВОДОНЕФТЯНОЙ СМЕСИ В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

A.F. Serov, V.N. Mamonov, A.D. Nazarov, M.V. Bodrov

Institute of Thermophysics of Russian Academy of Science (IT RAS)

Lavrentyev aven., 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

CALCULATION ALGORITMS FOR VELOCITY OF WATER-OIL FLOW IN A SLOT CHANNEL

The development of calculation algorithm for the velocity of the water-oil mixture in a slot channel of a measurement device is shown. The cyclic algorithm for calculation of the flow parameters for low Re numbers is grounded. Algorithm-to-algorithm transitions are shown depending on combination of flow parameters and components, introduced into the software.

1. Введение

Получение достоверной информации о добываемой нефти дает возможность судить об эффективности разработки нефтяного пласта, принимать своевременные решения о начале регламентных работ по профилактике и ремонту скважины.

Современные нефтяные трубопроводы снабжены сложными измерителями параметров нефтеводяной смеси (НВС). Являясь первичными устройствами, они подготавливают исходные данные для алгоритмов вычислительных устройств.

Разработанный коллективом авторов универсальный алгоритм обработки первичных измерительных данных в соответствии с различными комбинациями установочных и калибровочных параметров позволил создать устойчивый информационно-измерительный комплекс для определения промышленного дебета каждой отдельной скважины, а так же для представления данных в принятом виде и формирование архива, полноценно отражающего параметры потока.

Разработанный информационно-измерительный комплекс может быть частью системы «интеллектуальных» скважин, которые обеспечивают непрерывный сбор данных, регулирование потока и интеграцию всех систем для обеспечения дистанционного управления дебитом [1].

В докладе представлен алгоритм вычисления скорости потока водонефтяной смеси, а так же кратко описана аппаратура и методы регистрации первичных параметров.

2. Аппаратура и методы регистрации параметров

Для выполнения в режиме реального времени непрерывных измерений фракционного состава и фазовых дебитов водонефтяных потоков скважины была разработана универсальная и многоуровневая информационно-измерительная система, в состав которой вошла аппаратура осуществляющая измерение объёма и массы нефти и воды.

Анализ требований к измерительному комплексу позволил определить состав расходомера двухфазной смеси (нефть – вода) и выбрать методы определения основных параметров смеси: объемный расход смеси и процентное содержание влаги в смеси. Расход смеси вычисляется по оперативным данным о перепаде давления на особом сужающем устройстве, скорости и температуре потока. Концентрация влаги определяется поточным влагомером и позволяет определить объем добытой пластовой воды [2].

Датчики оперативных данных представляют собой законченные цифровые приборы на базе программируемых микроконтроллеров, которые объединяются в промышленную сеть по средствам RS-485 интерфейса и подключаются к «вычислителю», в котором реализованы функции сбора, хранения и обработки информации (рис. 1).

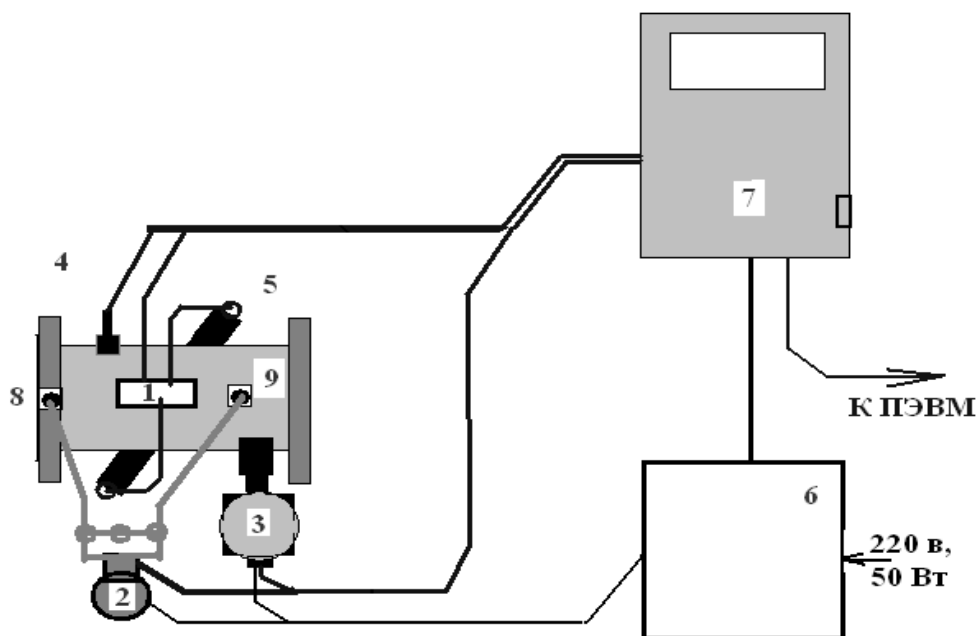


Рис. 1. Схема измерительного комплекса: 1 – ультразвуковой измеритель скорости; 2 – дифференциальный манометр; 3 – влагомер; 4 – датчик температуры; 5 – датчики измерителя скорости; 6 – блок питания; 7 – вычислитель; 8, 9 – штуцера отбора давления

3. Алгоритм вычислений и управление данными в системе

Микропроцессорный блок обработки данных («Вычислитель») представляет встраиваемый промышленный компьютер Pentium III,

работающий под специализированной операционной системой X-Linux (embedded Linux), что позволило создать на этой платформе сложные многопоточные приложения. Эти приложения отвечают всем требованиям системы по надёжности, быстродействию и обеспечивают работу сложного алгоритма сбора, хранения и управления данными.

Программное обеспечение (ПО) измерительного комплекса состоит из двух частей: ПО регистрации и расчёта технологических данных и ПО просмотра и обработки сохранённых данных и выдачи отчетных форм.

ПО регистрации и расчёта технологических данных реализует аддитивный алгоритм для вычисления массы нефти (рис. 2). Он базируется на избыточном объеме получаемых данных, что позволяет восстанавливать недостоверные данные по отдельным параметрам.

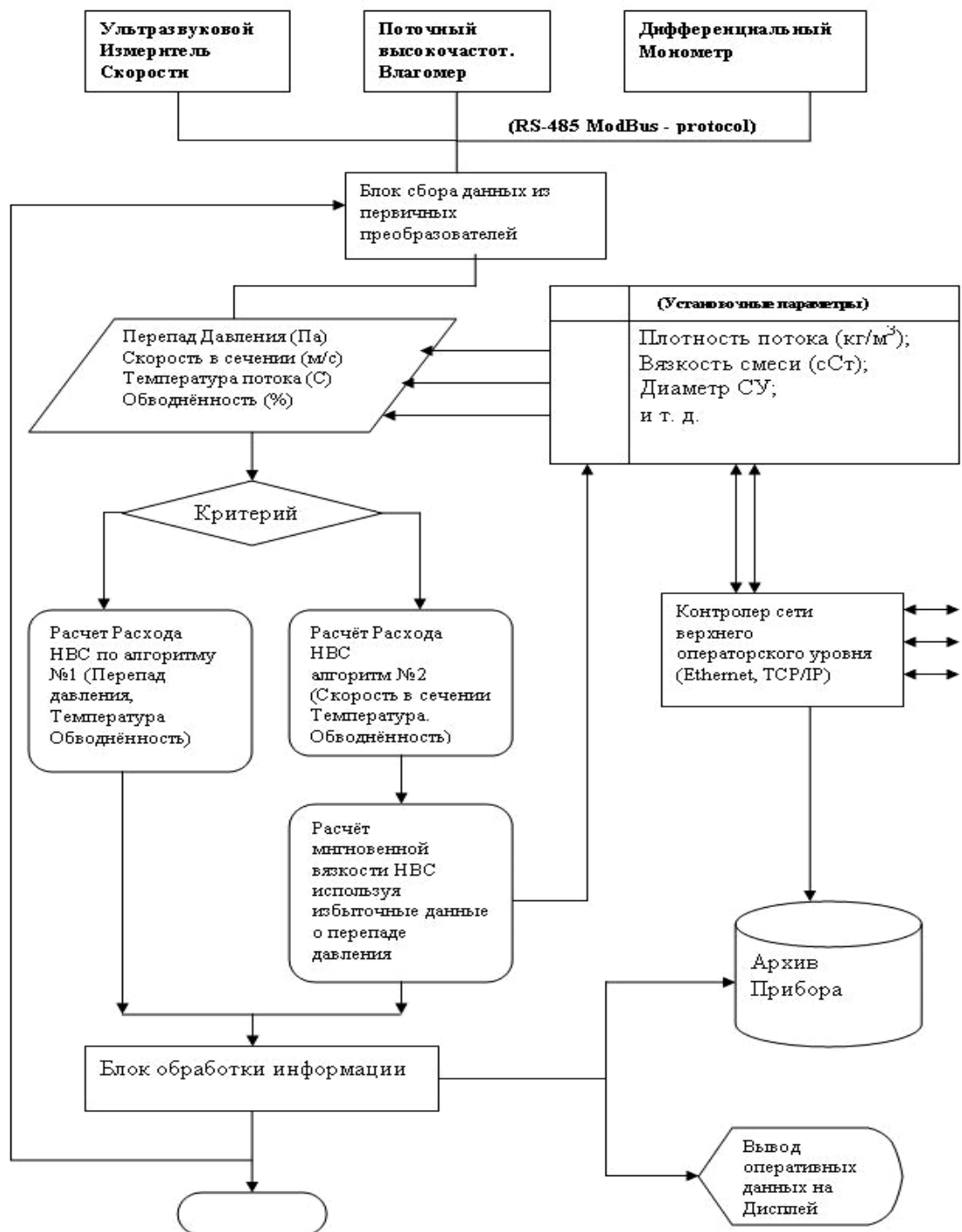


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчёта расхода НВС

При отказе одного, или нескольких первичных приборов, алгоритм должен продолжить вычисление расхода, используя либо параметры, полученные при предыдущих итерациях, либо использовать константы, введенные оператором. Разработанный алгоритм вычисления скорости потока включает несколько подалгоритмов для разных ситуаций, которые возникают в процессе получения первичной информации от измерительных устройств.

Базовый алгоритм расчёта использует скорость потока определённую по времени распространения ультразвукового сигнала. В соответствии с калибровочными параметрами «Вычислитель» автоматически вносит поправку на коэффициент, учитывающий профиль деформации потока НВС в измерительном канале.

Но, как известно, акустические ультразвуковые измерения очень чувствительны к характерным параметрам НВС (газосодержание, содержание твёрдых фракций в потоке) и не всегда могут давать достоверную информацию. Поэтому, для повышения надежности системы, анализируется достоверность данных о скорости и при низкой достоверности вступает в действие алгоритм, который основан на вычислении скорости потока НВС по данным о перепаде давления на сужающем устройстве и предварительной информации о плотности и вязкости смеси. В основе алгоритма лежит зависимость безразмерного аргумента «Ф» от числа Рейнольдса, полученной на этапе калибровки:

$$\Phi = d^2 \cdot \Delta P / (\rho \cdot v^2), \quad (1)$$

где $d, \text{ м}^2$ – диаметр трубы измерительной секции;

$\Delta P, \text{ Па}$ – перепад давления на сужающем устройстве;

$\rho, \text{ кг/м}^3$ – плотность смеси;

$v, \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематическая вязкость смеси.

Одновременное использование в системе учета измерителей перепада давления и скорости потока дает избыточность информации для расчета расхода смеси. Но повышает устойчивость работы измерительно-вычислительного комплекса и увеличивает надежность получения достоверной информации. Кроме того, дополнительные данные дают возможность при использовании итерационного метода вычислить мгновенное значение вязкости водонефтяного потока, что существенно повышает достоверность получения текущего значения скорости.

«Вычислитель» автономно накапливает архив почасовых и посуточных значений расхода смеси, а так же регистрирует информацию о работе системы в целом (время включения, количество недостоверных измерений, журнал ошибок и т. д.).

ПО просмотра и обработки сохраненных данных позволяет считывать архивную информацию из вычислителя, изменять настройки системы и формировать отчёты о количестве добываемой продукции. Связь внешнего компьютера с блоком «вычислителя» осуществляется по средствам TCP/IP протокола, что позволяет объединять несколько «вычислителей» в распределённую информационную систему. Доступ к микропроцессорной системе обработки данных может осуществляется как с помощью Ethernet, так и по средствам беспроводного интерфейса Wi-Fi [3].

Выводы

1. Ввод в вычислительный алгоритм избыточных взаимозаменяемых данных существенно повышает надежность работы информационно-измерительного комплекса.

2. Созданный алгоритм и информационно-измерительный комплекс безусловно положительно повлияют на развитие наукоемкой отрасли для

нефтегазовой промышленности и приведут к созданию принципиально новых технологий эксплуатации объектов отрасли, таких как «интеллектуальные скважины».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.А. Булгаков, и др. (ОАО НПФ «Геофизика»), И.А. Исхаков, и др.(АНК «Башнефть») Современные интеллектуальные инструменты для обеспечения качественного бурения наклонно-направленных скважин. *"Бурение и нефть"*, № 12, 2002 г.
2. А.Ф. Серов, А.Д. Назаров, М.В. Бодров, Аппаратура и алгоритм для определения содержания нефти в смеси у скважины. Сборник материалов Международного научного конгресса Гео-Сибирь-2007, т. 5, с. 218 – 224, 25 – 27 апреля 2007 г., Новосибирск, СГГА.
3. Бодров М.В. Информационная система для автоматизированного контроля нефтедобычи//сб., тез., докл. IX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям – Кемерово, 2008.

© А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров, М.В. Бодров, 2009

УДК 528

А.Д. Назаров

ИТ СО РАН, Новосибирск

ПОТОЧНЫЙ ВЛАГОМЕР СЫРОЙ НЕФТИ

A.D. Nazarov

Institute of Thermophysics of Russian Academy of Science (IT RAS)

Lavrentyev aven., 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

FLOW HUMIDITY METER FOR CRUDE OIL

A simple flow humidity meter for the water-oil mixture was developed and tested experimentally. Its operation principle is based on registration of absorbed energy of the high-frequency electromagnetic field, released by an emitter, at its interaction with a medium of the water-oil mixture inside a tube. The setup for humidity meter testing, construction features and main parameters of the device are presented.

Наличие достоверной информации о содержании в смеси долей нефти и воды позволяет оценивать предполагаемое количество добытой товарной нефти, определять стратегию и тактику обработки водонефтяной смеси для получения ее максимального количества, судить об эффективности разработки продуктивного пласта и рентабельности эксплуатации скважины, принимать своевременно верные решения о начале работ по обработке призабойной зоны пласта и ремонту скважины, производить оценку эффективности применения новых технологий и т. д.

Создан прибор контроля обводненности добываемой нефти, который может давать информацию о содержании воды в статическом режиме и в потоке смеси, текущей по трубопроводу. Влагомер может использоваться автономно и в составе автоматизированных систем сбора информации [7].

Принцип действия основан на регистрации поглощения энергии ВЧ электромагнитного поля в районе излучателя при взаимодействии с водонефтяной смесью. Диэлектрическая проницаемость смеси зависит от количества долей и диэлектрической проницаемости нефти ($\epsilon_n = 3 - 5$ [6]) и воды ($\epsilon_s = 78 - 85$ [6]).

Из уравнений Максвелла [1] следует, что распространение электромагнитного поля в веществе зависит от электрических и магнитных свойств компонент, и плотность энергии ω равна:

$$\omega = \frac{1}{8\pi} (\vec{E}D + \vec{H}B) [1],$$

где $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$ – электрическая индукция, $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ – напряженность магнитного поля.

Учитывая, что относительная магнитная постоянная воды $\mu_{\text{воды}} \approx 1$ и содержание магнетиков мало, можно принять, что плотность высокочастотной энергии в смеси в основном определяется напряженностью электрического поля и относительной диэлектрической постоянной смеси. В этом случае, потребляемая мощность от генератора будет определяться комплексным сопротивлением системы излучатель – среда, и равна [2, 5]:

$$P = \frac{U_{\text{ген}}}{Z_{\text{изл}}},$$

где $U_{\text{ген}}$ – напряжение СВЧ генератора, $Z_{\text{изл}}$ – комплексное сопротивление излучателя и фидера генератор – излучатель – материальная среда.

Выбор длины волны СВЧ поля близкой к парамагнитному резонансу молекул воды усиливает поглощение СВЧ энергии в водонефтяной смеси, тем самым увеличивая эффект определения содержания влаги в растворе [3, 4].

Фотография и структурная схема измерителя для случая определения влажности в движущейся по трубопроводу смеси, приведена на рис. 1. В данном приборе значение частоты СВЧ поля выбрано 432 МГц. Выбор частоты определил конструкцию СВЧ зонд в виде укороченного диполя. Для коррекции краевых эффектов введены диэлектрические вставки.

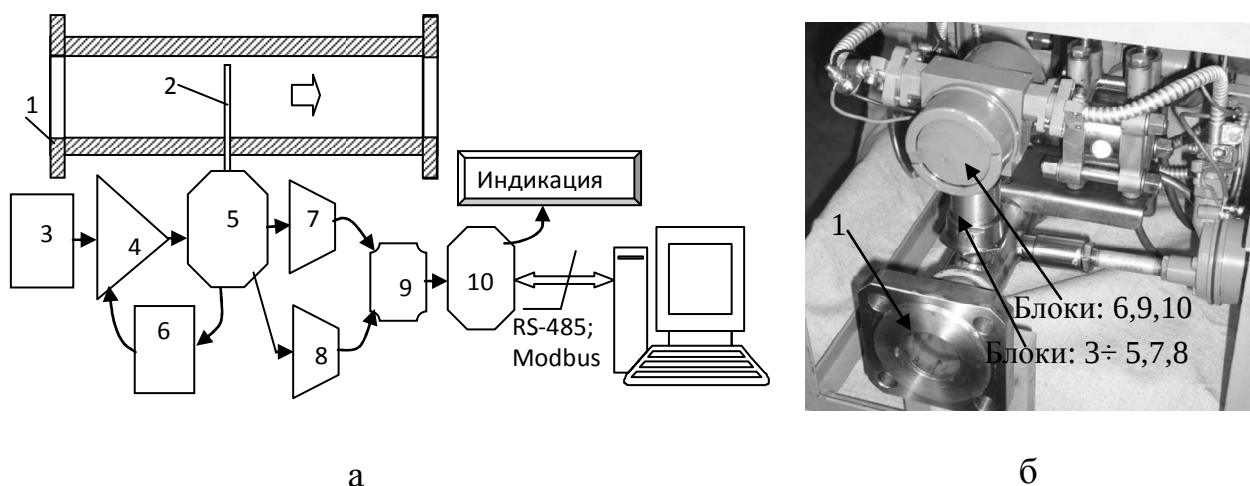


Рис. 1. Влагомер поточный: а – структурная схема; б – фотография в составе устройства учета нефти; 1) трубопровод; 2) излучатель; 3) СВЧ генератор; 4) СВЧ усилитель; 5) схема согласования; 6) АРУ; 7,8) детектор; 9) выходной блок; 10) микроконтроллер

В трубопровод 1 с потоком смеси помещен излучатель электромагнитной энергии 2, к которому через схему согласования 5 и высокочастотный усилитель 4 подводится СВЧ сигнал от генератора 3. Устройство автоматической регулировки уровня (АРУ) 6 поддерживает на постоянном уровне значение амплитуды переменного СВЧ-сигнала на выходе усилителя. Через детекторы 7 и 8 в выходной блок 9 поступает сигнал об электромагнитной энергии, подводимой

к излучателю до и после взаимодействия со средой. В блоке 9 выделяется сигнал пропорциональный концентрации воды в смеси, и подается в микроконтроллер 10. В микроконтроллере аналоговая электрическая величина конвертируется в цифровой код. Используя данные калибровки, микроконтроллер выделяет соответствующее значение концентрации воды в смеси, выдает на индикацию, и формирует архив данных по часам, суткам, месяцам. К прибору может подключаться компьютер по интерфейсу RS-485, работающий по Modbus протоколу. При оснащении специальной программой обмена, архивные данные прибора становятся доступными для считывания и обработки в компьютере.

Тарировка СВЧ влагомера выполняется на специальном стенде (рис. 2) или на действующей установке по известным параметрам смеси.

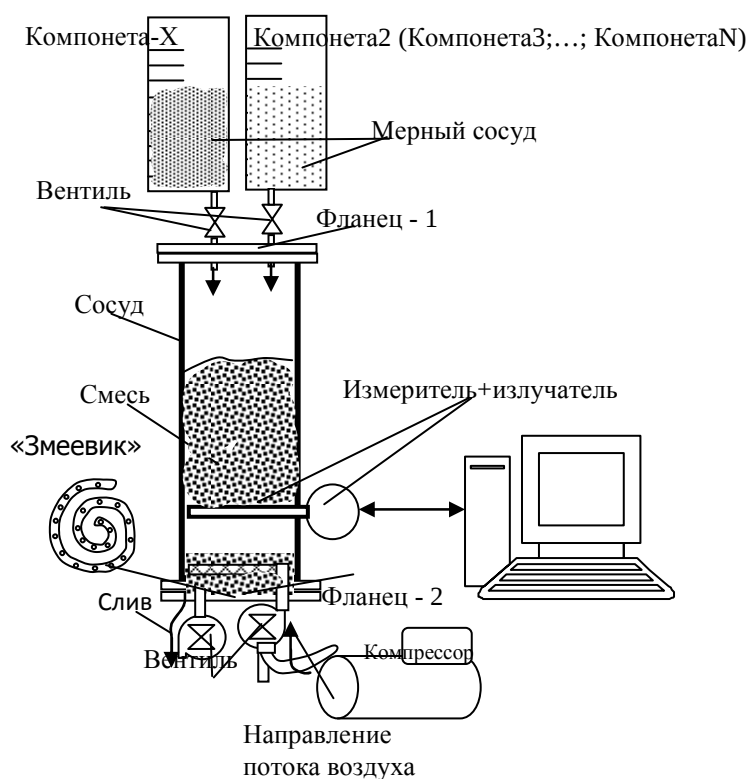


Рис. 2. Стенд калибровки
СВЧ-измерителя влажности

Излучатель прибора, пропущенный через уплотнитель в стенке, взаимодействует со смесью в нижней части сосуда. Водонефтяная смесь заливается через фланец-1. Через фланец-2 – сливается. С целью предотвращения расслаивания жидкостей на дне сосуда размещена свернутая трубка с отверстиями («змеевик»), через которые из компрессора подается воздух. Микроконтроллер имеет режим калибровки, при котором заданному

значению количеству влаги в смеси автоматически записывается в память контроллера показания измерительной схемы прибора. Проведя измерения с несколькими значениями концентрации воды в смеси, программа микроконтроллера формирует калибровочную зависимость, которая используется в рабочем режиме измерения концентрации влаги в водонефтяной смеси. Режим калибровки влагомера может быть автономным, т.е. проводится одним прибором, или под управлением компьютера, что позволяет подключить возможности программного обеспечения мощного вычислительного устройства (наблюдать за формированием калибровочной зависимости в графическом виде).

На рис. 3 показана зависимость показаний прибора от концентрации воды в водонефтяной смеси, полученная в процессе калибровки. При приготовлении образцовых жидкостей использовались «сухая» нефть и пластовая вода, которые получили путем разделения воды и нефти из смеси.

Выбор оптимального соотношения активной и реактивной части в комплексном сопротивлении системы (блок согласования – излучатель – среда) позволил получить линейную зависимость сигнала измерителя от концентрации влаги в водонефтяной смеси. Из этого следует, что калибровочная зависимость для определения количества влаги в водонефтяной смеси может быть определена по двум точкам: обезвоженная нефть и вода.

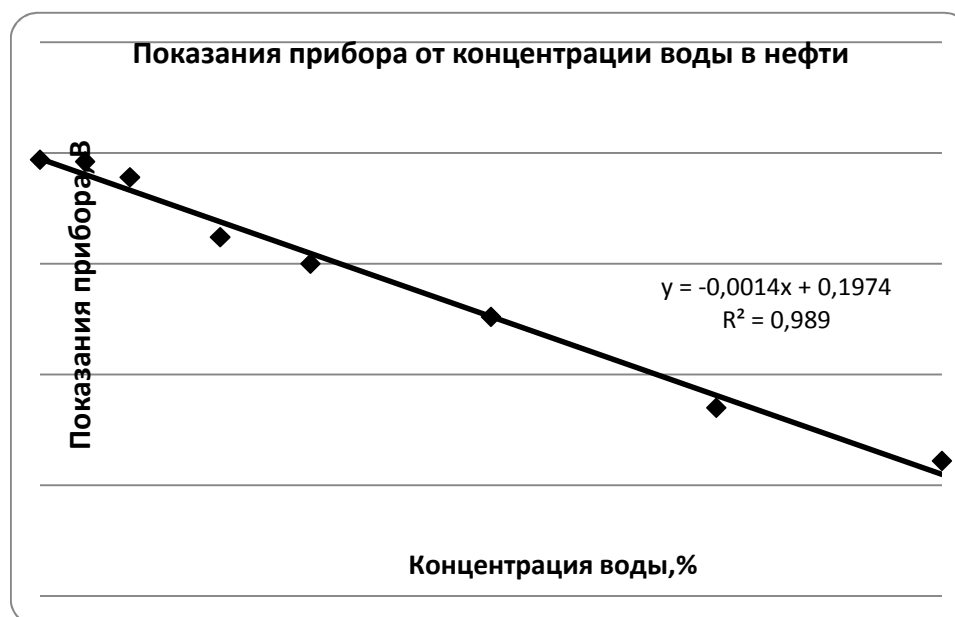


Рис. 3. Показания прибора от концентрации пластовой воды в нефти

Экспериментально определено влияние неорганических примесей (загрязненность, соленость и т.п.) на показания влагомера. Исключить влияние данных факторов позволяет начальная тарировка двумя компонентами – нефть и пластовая вода, выделенная после отделения из пробы нефти. В случае не полного отделения газа из потока смеси следует учитывать его присутствие в

потоке смеси, так как диэлектрическая проницаемость газа близка нефти ($\epsilon_{\text{газ}} = 1 - 2$), и объем газа в районе измерителя учитывается как нефть.

При тарировке применялось периодическое перемешивание смеси рассол – нефть воздухом, поэтому истинное значение влажности определялось в момент завершения обезгаживания. На рис. 4 показана зависимость сопротивления излучателя при регистрации влажности различных по качеству жидкостей. Наблюдается три интервала: обезвоженная нефть, смесь рассол – нефть после перемешивания и обезгаживания, и процесс расслоения компонент смеси.

Прибор можно настроить на диапазон для измерения от 0 % до 100 % влаги в смеси или на отдельные диапазоны (0 % до 50 % или от 50 % до 100 % влаги в смеси). Эксперименты показали, что при использовании прибора с возможностью измерения $0 \div 100$ %, погрешность измерения от полной шкалы составляет ± 5 %, а при использовании влагомера с настройкой на отдельный диапазон, погрешность равна $\pm 2,5$ %.

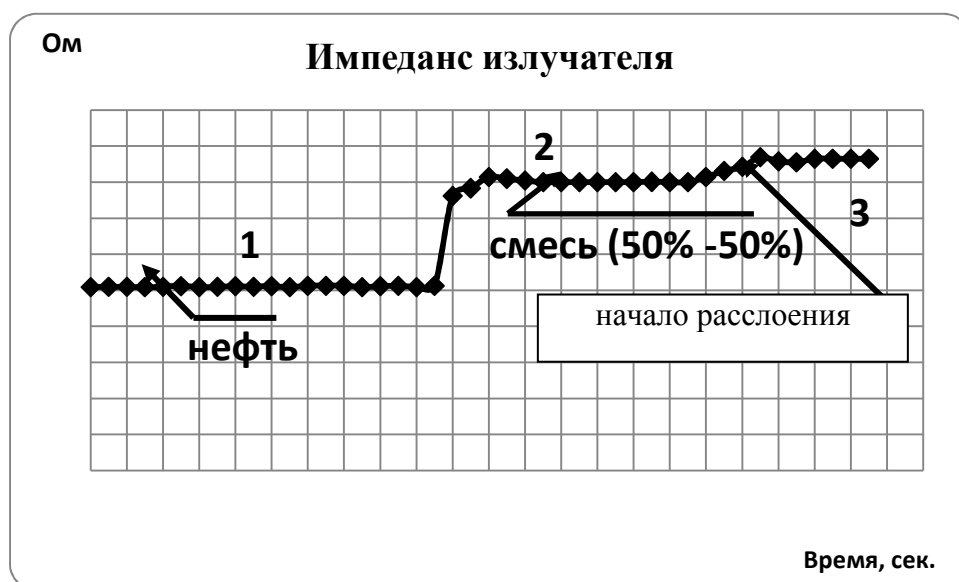


Рис. 4. Сопротивление излучателя при разных смесях

Выводы:

1. Прибор, основанный на эффекте поглощения энергии СВЧ электромагнитного поля внешней средой пригоден для определения влаги в водонефтяной смеси в разных технологических задачах нефтепромысла.

2. Для калибровки измерителя достаточно двух точек: 1) обезвоженная нефть и 2) рассол (вода). Следовательно, тарировку прибора можно проводить в полевых условиях.

3. Для повышения точности тарировать прибор следует продуктами, полученными при расслоении добытой смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория поля, 6 изд., (Теоретическая физика, т. 2), М., 1973 г.

2. Тамм И.Е., Основы теории электричества, 9 изд., М., 1976 г.
3. Айзенберг Г.З., Коротковолновые антенны, М., 1962 г.
4. Хайкин С.Э., Электромагнитные волны, 2 изд., М. – Л., 1964 г.
5. И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ, «Высшая школа», М. 1970 г.
6. Дж. Кэй и Т. Лэби, Таблицы физических и химических постоянных, издание второе переработанное, перевод с 12-го английского издания под редакцией К.П. Яковлева, Государственное издательство физико-математической литературы, М., 1962 г, 248 с.
7. ГОСТ 2477-65. Нефть и нефтепродукты. Методы определения содержания воды.

© А.Д. Назаров, 2009

УДК 389:796/.799

Ю.В. Титова

ОмГТУ, Омск

ИЗМЕРЕНИЯ В СПОРТЕ

Yu.V. Titova

Omsk State Technical University (OmGTU)

11 Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

MEASUREMENTS IN SPORTS

Metrology is necessary for us everywhere and today there is no area without using it. Metrology takes place everywhere: in building, medicine, engineering, sport, transport and trade. The main purpose of metrology is a security of unity and accuracy of measurements. Measurements in sport are used for the determining sport results, for the control of competition conditions and sportsmen physical state of the sportsmen and besides it is used drags-control. During organizing the competitions large attention is given on conditions and the characteristics of sport inventory and the equipment and buildings, which are used. Together with the determination of the quality of competing routes, pour on, sectors, tracks, ski tracks, the physical dimension such as length, width, relative and absolute height are either had to be tested. In this direction, in the contemporary sport, the quite foremost technical achievements are used. The metrological sport characteristics which influence on competition results and sportsmen achievements are regarded in this paper.

Метрология нам необходима везде и всюду и сейчас нет ни одной области нашей деятельности, где бы она не находила своего применения. Метрология присутствует везде: в строительстве и медицине, в машиностроении и спорте, в транспорте и торговле. Основной задачей общей метрологии, является обеспечение единства и точности измерений. Измерения в спорте используют для определения спортивных результатов, для контроля условий соревнований и физического состояния спортсмена, допинг-контроля. При организации соревнований большое внимание уделяют состоянию и параметрам спортивного инвентаря и оборудования, зданий и сооружений. Наряду с определением качества соревновательных трасс, полей, секторов, треков, лыжни, склонов, точному измерению подлежат их физические размеры: длина, ширина, относительная и абсолютная высота. В этом направлении, в современном спорте, используют самые передовые технические достижения. В данной работе рассмотрены метрологические спортивные параметры, от измерения которых зависят результаты соревнований и достижения спортсменов.

Развитие науки и техники всегда было тесно связано с прогрессом в области измерений. В физике, механике и других науках именно измерения позволяли точно установить зависимости, отражающие объективные законы природы.

Большое значение измерений для науки подчеркивали многие ученые: *«Измеряй все доступное измерению и делай доступным все недоступное ему»* (Г. Галилей); *«Наука начинается с тех пор, как начинают измерять, точная наука немыслима без меры»* (Д.И. Менделеев); *«Каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить»* (Дж. Кельвин).

В повседневной практике человечества измерение – вполне обычная процедура. Измерение наряду с вычислением непосредственно связано с материальной жизнью общества, так как оно получило развитие в процессе практического освоения мира человеком. Измерение, так же как счет и вычисление, стало неотъемлемой частью общественного производства и распределения, объективной отправной точкой для появления математических дисциплин, и в первую очередь геометрии, а отсюда и предпосылки развития науки и техники.

В самом начале, в момент своего возникновения, измерения, сколь бы различными они ни были, носили элементарный характер. Так, исчисление множества предметов определенного вида основывалось на сравнении с числом пальцев. Измерение длины тех или иных предметов строилось на сравнении с длиной пальца руки, стопы или шага. Этот доступный способ являлся изначально в буквальном смысле «экспериментальной вычислительной и измерительной техникой». Прошли целые столетия, прежде чем развитие математики и других наук, появление измерительной техники, вызванное потребностями производства и торговли, коммуникациями между отдельными людьми и народами, привело к появлению хорошо разработанных и дифференциальных методов и технических средств в самых различных областях знаний.

Сейчас трудно себе представить какую-либо деятельность человека, в которой не использовались бы измерения. Измерения ведутся в науке, промышленности, сельском хозяйстве, медицине, торговле, военном деле, при охране труда и окружающей среды, в быту и т. д.

В настоящее время все более широкое применение измерений отмечается и в спортивной науке и практике. Следует отметить, что значительное возрастание роли разнообразных средств и методов измерений в физическом воспитании и спорте за последние 10–15 лет обусловлено, прежде всего, общими тенденциями развития современной спортивной науки и влиянием на нее научно-технического прогресса. При этом в спортивной науке и практике используются почти все существующие в технике виды и методы измерений (оптикоэлектронные, радиоэлектронные, биофизические, биохимические, ультразвуковые и другие). Эти многочисленные средства и методы измерений широко используются для решения самых разнообразных задач комплексного контроля и управления процессом подготовки спортсменов высокой квалификации.

Измерения на определенном этапе своего развития привели к возникновению метрологии, которая в настоящее время определяется как «наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и требуемой точности».

Основной задачей общей метрологии является обеспечение единства и точности измерений. Спортивная метрология как научная дисциплина представляет собой часть общей метрологии. К ее основным задачам относятся:

1. Разработка новых средств и методов измерений;
2. Регистрация изменений в состоянии занимающихся под влиянием различных физических нагрузок;
3. Сбор массовых данных, формирование систем оценок и норм;
4. Обработка полученных результатов измерений с целью организации эффективного контроля и управления учебно-тренировочным процессом.

Однако как учебная дисциплина спортивная метрология выходит за рамки общей метрологии. Так, в физическом воспитании и спорте помимо обеспечения измерения физических величин, таких как длина, масса и т. д., подлежат измерению педагогические, психологические, биологические и социальные показатели, которые по своему содержанию нельзя назвать физическими. Методикой их измерений общая метрология не занимается, и, поэтому, были разработаны специальные измерения, результаты которых всесторонне характеризуют подготовленность физкультурников и спортсменов.

Использование методов математической статистики в спортивной метрологии дало возможность получить более точное представление об измеряемых объектах, сравнить их и оценить результаты измерений.

В практике физического воспитания и спорта проводят измерения в процессе систематического контроля, в ходе которого регистрируются различные показатели соревновательной и тренировочной деятельности, а также состояние спортсменов. Такой контроль называют комплексным. Это дает возможность установить причинно-следственные связи между нагрузками и результатами в соревнованиях. А после сопоставления и анализа разработать программу и план подготовки спортсменов.

Таким образом, предметом спортивной метрологии является комплексный контроль в физическом воспитании и спорте и использование его результатов в планировании подготовки спортсменов.

Любой вид спорта связан с теми или иными измерениями. Начнем с измерения длины, расстояний. Точные измерения в этой области являются необходимым элементом многих олимпийских видов спорта, включая прыжки в длину, метание диска, копья, молота, толкание ядра... Кроме того, измеряются физические параметры спортивных объектов: длины беговых и плавательных дорожек, треков, лыжных трасс, размеры игровых площадок, кортов, рингов, футбольных полей и т.п. При прыжках в длину (расстояния 6...9 м) измерения простой рулеткой еще допустимы, т.к. возможные ошибки (несколько миллиметров) весьма незначительны, то в метании копья или молота (расстояние в 10 раз больше) ошибка измерения результата рулеткой будет уже

существенной (несколько сантиметров). Разница же между результатами соперников может составлять всего 1 см. Поскольку победа имеет огромную значимость в современном спорте, объективность и точность измерений таких расстояний уже давно обеспечиваются с помощью специальных лазерных дальномеров.

В измерении высоты тоже очень много интересного: это касается не только высоты планки в секторе для прыжков в высоту, но и высоты ворот, сеток, барьеров, трамплинов для прыжков в воду, т. е. расстояний от земли и до какого-то уровня.

Одним из самых серьёзных, ключевых спортивных параметров является время преодоления дистанции. В различных видах спорта в зависимости от скорости передвижения спортсменов используется различная точность измерения времени. Как правило, она находится в пределах 0,001–0,1 с. Современные особо точные часы могут отклониться на одну секунду лишь за 30 млн. лет, что само по себе очень высокое достижение. Обеспечение необходимой точности измерения временного интервала с технической точки зрения не представляет особой трудности, тем не менее, специфика спорта накладывает на этот процесс свои особенности, что связано в первую очередь с проблемами определения момента старта и финиша. Совершенствование измерений происходит за счет технических новинок. К ним среди распространенных в настоящее время приборов относятся различные фотодатчики и микрочипы, системы регистрации фальстарта, системы фотофиниша, которые сравнительно легко позволяют с точностью до одной тысячной секунды и в долях сантиметра определять победителя в беге, плавании, лыжных и велосипедных гонках, в скоростном спуске и в других видах спорта.

Важной для спорта также является регистрация скорости. Знание скорости требуется спортсменам для мониторинга своего движения по дистанции. Особенно это необходимо велосипедистам и бегунам на длинные дистанции. Что касается марафонцев, то они используют самую последнюю технику – приёмники глобальной системы позиционирования (GPS). Эти приборы позволяют спортсменам не только точно контролировать свою текущую скорость, но и после соревнования или тренировки анализировать прохождение дистанции в каждой её точке.

Рассмотрим еще один параметр – массу. Эти измерения касаются не только спортивных снарядов – ядра, копья, диска, штанги, саней и др. Измеряют также массу участников соревнований при установлении их весовых категорий. В настоящее время допустимые отклонения при определении весовых категорий спортсменов и при регистрации рекордов составляют 0,005 %.

В ряде спортивных дисциплин важными являются условия погоды. Так, в легкой атлетике производятся измерения скорости ветра, которая может повлиять на результаты бега и прыжков, в парусных регатах, где в условиях безветрия соревнования вообще невозможны, при прыжках на лыжах с трамплина, где боковой ветер может угрожать жизни спортсменов. Контролю подлежит температура снега и льда в зимних видах спорта, температура воды в водных видах спорта. Если соревнования проводятся на открытом воздухе, то в

случае осадков определенной интенсивности они могут быть прерваны (например, теннис, бадминтон, прыжки с шестом).

В спорте особое значение придается допинг-контролю. С этой целью разрабатывается дорогостоящее оборудование, которым оснащаются современные антидопинговые лаборатории.

При организации крупных соревнований большое внимание уделяется состоянию и параметрам спортивного инвентаря и оборудования. Так, например, все снаряды для метаний по правилам соревнований должны строго соответствовать определенным размерам и весу. В зимних видах спорта, где большое значение имеет эффективность скольжения, например в бобслее, имеются ограничения по температуре полозьев, которая тщательно измеряется непосредственно перед стартом. Строго контролируются параметры ворот, разметки полей и площадок, мячей и сеток, щитов, корзин и т.п. В некоторых случаях тщательно проверяется экипировка спортсменов, например в прыжках на лыжах с трамплина, чтобы она не представляла собой своеобразный парус.

Кроме измерительных процедур существует необходимость контроля физического состояния спортсменов, их подготовленности на данный момент времени. С этой целью в спорте используется самое современное медицинское оборудование. Среди такого оборудования наиболее значимыми являются различного рода газоанализаторы, системы биохимического контроля и диагностики состояния сердечно-сосудистой системы. Таким оборудованием оснащаются все диагностические спортивные лаборатории. Кроме того, в диагностических лабораториях необходимы стационарные беговые дорожки, велоэргометры и другие современные приборы. Всё это лабораторное оборудование имеет высокоточную измерительную технику и тщательно калибруется.

В настоящее время возрастает роль метрологии как неотъемлемой основы спорта. Развитие спорта не имеет пределов, так же как не имеет пределов точность измерений. Потребность в измерительных средствах при проведении спортивных соревнований огромная. Только при регистрации спортивных достижений необходимы тысячи разных приборов и систем, которые обеспечивают объективность, справедливость и сопоставимость результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев, Л.К. Некоторые аспекты спортивной метрологии / Л.К. Исаев // Мир измерений. – 2008. – № 10.
2. Кулаков, В.Н. Измерения в спорте / В.Н. Куликов // Мир измерений. – 2008. – № 1.
3. Начинская, С.В. Спортивная метрология: учеб. пособие / С.В. Начинская. – М.: Академия, 2005. – 240 с.

УДК 658.516
Е.П. Куницына
ОмГТУ, Омск

САМООЦЕНКА В ОРГАНИЗАЦИИ

E.P. Kunitsina
Omsk State Technical University (OmSTU)
11 Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

SELF-EVALUATION OF ORGANIZATION

Advantages of implementation of self-evaluation, the term “The Self-evaluation of organization process”, criteria of self-evaluation and two models of self-evaluation (ISO 9004 Model and Model of government award in area of quality of Russian Federation) are identified in the paper. Self-evaluation can give us a general conception about organization’s activities and about a level of management system’s of quality development. Self-evaluation can also help us to determine areas of organization, which need improvement and to determine priorities.

The purpose of self-evaluation is to furnish organization’s references educated on facts which concern a range of use of resources for improvement organization’s activities.

Мы живем в динамичном, быстро меняющемся мире. Это в полной мере относится и к современному рынку: растут требования потребителей к продукции и услугам, развиваются технологии, меняются условия конкурентной борьбы. Поэтому успешная работа любой организации на рынке неосуществима без постоянного совершенствования ее деятельности, нацеленной на улучшение качества продукции и услуг. Совершенствование деятельности организации невозможно без периодического анализа фактического состояния работы по качеству и ее результатов. Только опираясь на результаты такого анализа, можно наметить и реализовать следующие шаги в улучшении деятельности. Такой всесторонний анализ в мировой практике получил название самооценки.

Самооценка – тщательное оценивание, проводимое руководством организации, итогом которого является мнение о зрелости системы менеджмента. Она может использоваться организацией для сравнения своей деятельности с лучшими достижениями внешних организаций и показателями мирового уровня по данному виду деятельности.

Процесс самооценки позволяет компании лучше осознать свои сильные стороны и определить те их области своей деятельности, совершенствование которых может привести к продвижению в бизнесе.

Объекты самооценки: самооценка может осуществляться для всей компании, для некоторого направления деятельности компании, для одного из подразделений компании.

Преимущества проведения самооценки организации

Международная практика показала, что проведение самооценки дает организации такие преимущества, как:

- Использование при оценке своей деятельности и ее результатов единого комплекса критериев, который нашел широкое применение во многих странах;
- Систематический подход к совершенствованию деятельности;
- Получение объективных оценок, основанных на фактах, а не на личном восприятии отдельных работников или руководителей;
- Обучение персонала применению принципов всеобщего (тотального) управления качеством;
- Внедрение различных инициатив и передовых методов управления качеством в повседневную деятельность организации;
- Выявление и анализ процессов, в которые можно ввести улучшения;
- Определение глубины изменений, происшедших с момента проведения предыдущей самооценки;
- Возможность распространения передового опыта лучших подразделений организации или других организаций;
- Возможность признания и стимулирования посредством премирования достижений подразделений и работников;
- Возможность сравнения с лучшими результатами, достигнутыми как в данной организации, так и в других.

Понятие «процесс самооценки организации»

Под термином «процесс самооценки организации» понимается совокупность мероприятий, направленных на изучение состояния и возможностей компании. Большое значение имеет выявление как положительных, так и отрицательных сторон функционирования организации. Периодичность проведения самооценки обеспечивает регулярное выявление возникающих недостатков, составление планов их устранения, осуществление контроля изменений и, следовательно, позволяет оптимизировать работу фирмы на благо клиента и персонала. Результат самооценки – целенаправленное планирование мероприятий, строгое выполнение которых приводит к достижению реального прогресса.

Критерии оценки

Одним из основных моментов процесса самооценки является определение критериев оценки. Анализ претендентов на премию М. Бэлдриджа проводится в соответствии со следующими семью критериями:

#№	Критерий оценки	Значимость критерия, %	Комментарий
11	Руководство	10	Оцениваются успехи высшего руководства.
22	Информация и анализ	7	Оцениваются успехи компании в сборе и анализе информации и использование этой информации для улучшения качества деятельности.
33	Стратегия планирования качества	6	Оцениваются успехи компании в интеграции требований потребителя для улучшения качества работы.
44	Человеческие ресурсы	15	Изучается вопрос о том, насколько успешно компания вовлекает своих служащих в работу и как ею используются знания и опыт.
55	Уверенность в качестве товаров и услуг	14	Оценивается деятельность компании в достижении хорошего качества всех операций технологического процесса и в реализации цели постоянного их улучшения.
66	Результаты качества	18	Изучаются успехи компании в работе по улучшению качества, оцениваемые соответствующими количественными показателями качества и подтвержденные результатами измерений.
77	Фокус на потребителя и удовлетворение его нужд и пожеланий	30	Анализируется вопрос о том, насколько хорошо компания определяет требования потребителей к своей продукции и насколько хорошо эти требования удовлетворяются.

Модель самооценки в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9004-2001

Особенности метода самооценки по ГОСТ Р ИСО 9004 таковы, что он может:

- Применяться ко всей системе менеджмента качества или ее части, или к любому процессу;
- Применяться к организации в целом или ее части;
- Быть быстро осуществлен внутренними средствами;
- Быть осуществлен многопрофильной группой или одним работником организации при поддержке высшего руководства;
- Сформировать входные данные для более всестороннего процесса самооценки системы менеджмента;
- Определить и облегчить расстановку приоритетов возможностей для улучшения;
- Способствовать развитию системы менеджмента качества в направлении уровня мирового класса.

Метод оценки, изложенный в стандарте ИСО 9004:2000, предназначен для оценивания уровней развития системы менеджмента качества по каждому основному разделу стандарта (посредством балльной шкалы от 1 до 5):

- Уровень 1 – нет формализованного подхода (систематический подход к проблемам отсутствует, нет результатов или они слабые),
- Уровень 2 – подход, основанный на реакции на проблемы (наличие минимальных данных о результатах улучшения),

- Уровень 3 – устоявшийся формализованный системный подход (системный процессный подход, систематические улучшения на ранней стадии),
- Уровень 4 – акцент на постоянное улучшение (хорошие результаты и устойчивые тенденции улучшения),
- Уровень 5 – лучшие показатели в классе деятельности (сильно интегрированный процесс улучшения).

В стандарте ГОСТ Р ИСО 9004 приведены типичные вопросы для самооценки в соответствии с разделами стандарта. Каждой организации предлагается разработать свой список вопросов, которые соответствуют ее потребностям.

Модель премии правительства Российской Федерации в области качества

Российская Модель премий по аналогии с Европейской также включает две группы критериев:

1. Первая группа критериев характеризует, как организация добивается результатов в области качества, что делается для этого («возможности»).
2. Вторая группа критериев характеризует, что достигнуто («результаты»).

Модель премии Правительства Российской Федерации в области качества изображена на рис. 1. Цифры у каждого критерия показывают максимальное число баллов, которое может получить организация по этому критерию, и какой процент это составляет от общей суммы баллов. Рассмотрим подробнее содержание составляющих каждого критерия модели.



Рис. 1. Модель премии правительства Российской Федерации в области качества

Критерий 1: Лидирующая роль руководства.

Как руководители организации всех уровней определяют ее предназначение, вырабатывают стратегию развития и способствуют их реализации; как они формируют ценности, необходимые для достижения долгосрочного успеха, и внедряют их с помощью соответствующих мероприятий и личного примера; на сколько они вовлечены в деятельность, обеспечивающую развитие и внедрение системы менеджмента организации.

Критерий 2: Политика и стратегия организации в области качества.

Как организация реализует свои предназначение и стратегию развития посредством ориентации на потребности заинтересованных сторон, разработку политики, планов, целей и процессов.

Критерий 3: Персонал.

Как организация управляет персоналом, развивает и использует его знания и потенциал на индивидуальном уровне, на уровне групп и всей организации; как она планирует виды деятельности в целях претворения в жизнь политики и стратегии, а также в целях эффективной реализации своих процессов.

Критерий 4: Партнерство и ресурсы.

Как организация планирует внутренние ресурсы и свои взаимоотношения с внешними партнерами и как управляет ими в целях претворения в жизнь политики и стратегии, а также в целях эффективной реализации своих процессов.

Критерий 5: Процессы, осуществляемые организацией.

Как организация проектирует процессы, осуществляет менеджмент процессов и совершенствует их в целях претворения в жизнь политики и стратегии, а также полного удовлетворения и создания ценности для своих потребителей и других заинтересованных сторон.

Критерий 6: Удовлетворенность потребителей качеством продукции и услуг.

Результаты, которых добилась организация в отношении удовлетворения интересов внешних потребителей.

Критерий 7: Удовлетворенность персонала.

Результаты, которых добилась организация в отношении удовлетворения своего персонала.

Критерий 8: Влияние организации на общество.

Результаты, которых добилась организация в отношении удовлетворения интересов общества на местном, национальном и мировом уровнях.

Критерий 9: Результаты работы организации.

Результаты, которых добилась организация в отношении запланированных целей в работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ссылка http://naceks.karaganda.kz/pages/conc_01/02_07.htm.
2. Ссылка <http://www.deming.ru/TehnUpr/SamSisUprOrg.htm>.
3. Ссылка <http://www.iskoz.com/articles/art6.html>.
4. ГОСТ Р ИСО 9004 – 2001.

УДК 658.516.58:379.85

О.В. Коробейникова

ОмГТУ, Омск

СЕРТИФИКАЦИЯ УСЛУГ В СФЕРЕ ТУРИЗМА

O.V. Korobeinikova

Omsk State Technical University (OmGTU)

Prospect mira 11, Omsk, 644050, Russian Federation

CERTIFICATION OF SERVICES IN TOURISM

The certification of tourist services in Russia today is completely voluntary. In today's environment where more and more countries are involved in the global international market of tourist services, there is a need to assess the reliability and performance of tourism firms. This assessment supports certification, ensuring that the tourism product or service comply with certain requirements and has the proper quality. Certification of the quality of tourist activities to increase the number of reliable partners, to improve the competitiveness of the organization and get more customers interested in the quality of tourist services.

В России с июля 1994 года введен в действие ГОСТ Р 50646-94 «Услуги населению. Термины и определения». В соответствии с этим документом под *услугой* понимается результат непосредственного взаимодействия исполнителя и потребителя, а также собственной деятельности исполнителя по удовлетворению потребности потребителя. По функциональному назначению услуги, оказываемые населению, подразделяются на материальные, нематериальные и социально-культурные. Остановимся на социально-культурных, так как именно к ним относят туристские услуги. Социально-культурная услуга – это услуга по удовлетворению духовных, интеллектуальных потребностей и поддержание нормальной жизнедеятельности потребителя. Она обеспечивает поддержание и восстановление здоровья, духовное и физическое развитие личности, повышение профессионального мастерства. В соответствии с ГОСТ Р 50690-2000 «Туристские услуги. Общие требования» туристская услуга – это результат деятельности туристского предприятия по удовлетворению соответствующих потребностей туристов. В последнее время туризм приобрел значение социального явления. Он перешел из категории элитного продукта в категорию продукта, доступного потребителю. Появляется все больше туристских фирм и компаний, что дает нам возможность выбрать наиболее подходящую. Изобретение транспорта дало скачок в развитии международного туризма, позволило расширить географию туризма, сократить время перемещения из одной страны в другую с большим комфортом. С вступлением

в силу Федерального закона от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании» сертификация для туристской деятельности носит добровольный характер, поэтому никаких штрафов и санкций за ее отсутствие не предусмотрено. Но туристские фирмы чаще всего стараются получить сертификат на оказание туристских услуг, чтобы предъявить своему клиенту дополнительную документально оформленную гарантию своей качественной работы и заверить его в том, что услуги будут оказаны на соответствующем уровне. В различных регионах Российской Федерации действуют аккредитованные органы по сертификации туристских услуг, в которых можно получить сертификат. В Омске – это Орган по сертификации продукции и услуг ООО «Центр сертификации и экспертизы "Омск-Тест"». При сертификации туристского продукта проверяются показатели, характеризующие услуги и условия обслуживания, путем анализа информационно-рекламных проспектов, договоров с туристами, туристских путевок, паспортов маршрутов, туристских ваучеров, договоров с гостиницами, транспортными организациями, со страховыми компаниями, с иностранными фирмами и пр. Работники органа по сертификации обязаны обеспечить конфиденциальность информации, ее разглашение влечет дисциплинарную и гражданско-правовую ответственность и обязанность возместить убытки, причиненные этими действиями.

Цели сертификации – защита потребителей туристских услуг от недобросовестной деятельности организаций, которые их предлагают; защита жизни, здоровья и имущества туриста; подтверждение заявленных показателей качества туристского обслуживания; формирование благоприятной общественной, правовой и экономической среды для интенсивного развития туристского и гостиничного бизнеса; выработка мер государственной поддержки туризма как важного сектора экономики.

В настоящее время действуют следующие стандарты, регулирующие туристскую деятельность:

ГОСТ Р 50690-2000 «Туристские услуги. Общие требования»;

ГОСТ 28681.3-95/ГОСТ Р 50644-94 Туристско-экскурсионное обслуживание. Требования по обеспечению безопасности туристов и экскурсантов;

ГОСТ 30335-95/ГОСТ Р 50646-94 Услуги населению. Термины и определения;

ГОСТ 28681.1-95/ГОСТ Р 50681-94 Туристско-экскурсионное обслуживание. Проектирование туристских услуг.

В них изложены обязательные требования к туристско-экскурсионному обслуживанию, которые необходимы для получения сертификата туристской организацией. После изучения каждого из них можно вынести некоторые общие положения, которые являются очень важными и применимыми к каждой туристской организации:

- 1) Безопасность туристов;
- 2) Достоверность информации, предоставляемая клиентам;

3) Регионы, предлагаемые туристскими фирмами для отдыха, должны быть экологически чистыми/безопасными для здоровья;

4) Высокая профессиональная подготовка сотрудников туристских организаций.

Нормативные документы классифицируют туризм на въездной, выездной и внутренний. Под въездным туризмом понимаются путешествия в пределах России лиц, не проживающих постоянно в стране. Внутренний туризм – это путешествия в пределах России граждан, постоянно проживающих в стране. А выездной туризм трактуется как путешествия лиц, постоянно проживающих в РФ, в другую страну.

Согласно «Закону о туристской деятельности» сертификации подлежат туристские продукты, реализуемые туроператорами и турагентами. Сертификация проводится по Правилам сертификации туристских услуг, утвержденным Госстандартом России. На основании Правил проводится сертификация туристского продукта по требованиям, направленным на обеспечение безопасности жизни и здоровья туристов, сохранности имущества туристов, охраны окружающей природной среды, соответствия туристской услуги функциональному назначению, точности и своевременности исполнения.

Сертификация услуг включает (согласно Правилам сертификации):

- Подачу заявки на сертификацию;
- Рассмотрение и принятие решения по заявке;
- Оценку соответствия услуг установленным требованиям;
- Принятие решения о выдаче (отказе в выдаче) сертификата;
- Выдачу сертификата;
- Инспекционный контроль сертифицированных услуг.

Для проведения сертификации и получения сертификата заявитель направляет заявку в орган по сертификации в соответствии с областью его аккредитации. При сертификации туристского бизнеса таким органом является Минэкономки России. Орган по сертификации рассматривает заявку и не позднее одного месяца после ее получения сообщает заявителю свое решение, содержащее основные условия сертификации. Оценка соответствия услуг установленным требованиям включает:

- Оценку оказания услуг;
- Проверку, испытание результатов услуг.

Оценка оказания услуг в туристском бизнесе проводится по 5 схеме сертификации (оценка системы качества). Проверку результатов услуг орган по сертификации проводит в соответствии с нормативными документами. На основе анализа актов, протоколов и других документов, подтверждающих соответствие услуг установленным требованиям, орган по сертификации принимает решение о выдаче сертификата, оформляет его и регистрирует. При

отрицательных итогах анализа орган по сертификации принимает решение об отказе в выдаче сертификата с указанием причин отказа и доводит его до сведения заявителя. Срок действия сертификата на право проведения туристской деятельности составляет три года. Инспекционный контроль проводит орган по сертификации, выдавший сертификат, не реже одного раза в год в форме периодических и внеплановых проверок для установления соответствия оказываемых услуг требованиям, подтвержденным при сертификации. Объем и периодичность инспекционного контроля зависят от степени потенциальной опасности услуг, стабильности их качества, объема оказываемых услуг, наличия системы качества, затрат на проведение контроля, итогов сертификации или предыдущего инспекционного контроля. Внеплановый инспекционный контроль проводят в случаях поступления претензий к качеству сертифицированных услуг от потребителей, федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих контроль за качеством и безопасностью услуг. Результаты инспекционного контроля оформляют актом, в котором делают заключение о возможности сохранения действия выданного сертификата. В случае несоответствия услуг установленным требованиям, отказа держателя сертификата от проведения инспекционного контроля, орган по сертификации может приостановить или отменить действие сертификата. Решение о приостановлении действия сертификата принимают, когда путем корректирующих мероприятий, согласованных с органом по сертификации, можно устранить обнаруженные причины указанного несоответствия. После выполнения корректирующих мероприятий и получения положительных итогов их оценки орган по сертификации принимает решение о возобновлении действия сертификата и информирует об этом заинтересованных участников сертификации. В случае невыполнения корректирующих мероприятий или их неэффективности орган по сертификации отменяет действие сертификата и информирует об этом заинтересованных участников сертификации. Туристская фирма обязана указывать в документации (в техническом паспорте, на этикетке, в описании услуги и т.д.) сведения о проведении сертификации (номере сертификата, сроке его действия, органе, его выдавшем).

Российская Федерация, несмотря на свой высокий потенциал, занимает незначительное место на мировом туристском рынке. На ее долю приходится около 3% мирового туристского потока. В настоящее время развитие туризма в России сдерживается многими факторами: 1) дефицит позитивной информации о стране, отсутствие рекламы России на зарубежных рынках; 2) неразвитость туристской инфраструктуры; 3) недостаток инвестиций в средства размещения туристов и иную туристскую инфраструктуру; 4) неблагоприятный визовый режим; 5) невысокий уровень сервиса, несоответствие цен на предлагаемые услуги их качеству (особенно в части условий размещения, питания и перевозок); 6) несовершенство законодательной базы; 7) проблемы в сфере торговли товарами и сувенирной продукцией для туристов; 8) недостаток квалифицированных кадров. Пути решения этих проблем:

- Создание благоприятного инвестиционного климата для российских и иностранных компаний, вкладывающих средства в развитие туристской инфраструктуры в России;
- Упрощение визовых формальностей для туристов из стран, не представляющих миграционной опасности.
- Разработка и реализация рекламно-информационных программ по въездному и внутреннему туризму, в том числе создания теле - и радиопрограмм в России и за рубежом, регулярной рекламно-информационной работы в периодических средствах массовой информации;
- Издание буклетов, плакатов, карт и иной рекламно - информационной печатной продукции;
- Организация и проведение международных туристских выставок;
- Восстановление института загранпредставительств по туризму за рубежом, выполняющего функции рекламно-информационных офисов;
- Создание и поддержка официального Интернет-портала федерального органа исполнительной власти в сфере туризма;
- Проведение ознакомительных поездок по туристским центрам России для иностранных журналистов;
- Формирование современной целостной нормативно-правовой базы;
- Разработка и внедрение современной классификации гостиничных средств размещения;
- Создание современной системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров.

По итогам 9 месяцев 2008 г. выезд россиян за рубеж с туристскими целями вырос на 24,3 %, что на 2,6 % превышает аналогичный показатель 2007 г. Больше всего российских туристов побывало в Турции (1 983,4 тыс.), Китае (1 530,3 тыс.), Египте (956,7 тыс.), Финляндии (530,4 тыс.), Италии (325,8 тыс.), Испании (314,8 тыс.), Греции (314,2 тыс.), Германии (247,1 тыс.).

Въездной турпоток в Россию за 9 месяцев 2008 г. увеличился на 7 % по сравнению с аналогичным периодом 2007 г. Больше всего по туристским визам прибыло граждан Германии (более 290 тыс.), США (166,4 тыс.), Великобритании (126,9 тыс.), Италии (124,4 тыс.), Финляндии (113,8 тыс.), Китая (102,7 тыс.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании».
2. Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ (ред. от 05.02.2007) «Об основах туристской деятельности в РФ».
3. ГОСТ Р 50690-2000 «Туристские услуги. Общие требования»;
4. ГОСТ 28681.3-95/ГОСТ Р 50644-94 Туристско-экскурсионное обслуживание. Требования по обеспечению безопасности туристов и экскурсантов;

5. ГОСТ 30335-95/ГОСТ Р 50646-94 Услуги населению. Термины и определения;
6. ГОСТ 28681.1-95/ГОСТ Р 50681-94 Туристско-экскурсионное обслуживание. Проектирование туристских услуг.
7. Правила сертификации работ и услуг от 5.08.1997 г. N 17
8. Н.А. Гулиев, Б.К. Смагулов. Стандартизация и сертификация социально-культурных и туристских услуг.– М.: Флинта, МПСИ,2008.-240с.
9. Л.Д. Жигалова. Стандартизация и сертификация социально-культурных и туристских услуг.– Омск: ОмГПУ,2007.- 73с.
10. Н.Г. Можаяева. Туризм.– М.: Гардарики,2007.-272с.
11. www.gost.ru Орган по сертификации продукции и услуг ООО "Центр сертификации и экспертизы "Омск-Тест"
12. www.russiatourism.ru Статистические данные «Въезд иностранных граждан за 9 месяцев 2008 года» и «Выезд российских граждан за рубеж за 9 месяцев 2008 года» /

© О.В. Коробейникова, 2009

УДК 621.642.6

О.В. Хороших

ОмГТУ, Омск

КОММЕРЧЕСКИЙ УЧЕТ МАССЫ НЕФТИ

O.V. Khoroshikh

Omsk State Technical University (OmGTU)

11 Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

THE COMMERCIAL ACCOUNT OF WEIGHT OF OIL

With privatization of petroleum branch the situation with the property has greatly. The state still owns oil deposits, but the extracted hydro carbonic raw is the property of oil users, that is the petroleum company. Now the state has realized that the authentic account of extracted oil on each chink is necessary as last year's oil manufacturing progressively grows in the country. Therefore the strong and qualitative supervisory body of extraction, processing and oil transportation is especially necessary. But, in spite of the fact that modern lines in developing of systems of gathering, information and management handlings more and more widely take root into traditionally conservative areas of measurements what the commercial account of oil and mineral oil is, the architecture of the majority of again projected knots of the account still is based on principles and the equipment put in 70th years of last century, besides, that one generation of devices and measures was in this time replaced not. Modernization of oil and gas branch of Russia on the basis of the domestic equipment slips if not to tell that moves back. Such lacks in domestic oil and gas complex lead to multi-billion financial loss. Given article the devoted a problem of the commercial account of oil. We will find out the problems existing in the given direction and the way of their solving.

В настоящее время в нефтегазовом комплексе (НГК) России существует серьезная проблема, связанная с коммерческим учетом нефти. При измерении массы нефти возникают погрешности, которые приводят к тому, что из коммерческого учета выпадает значительная часть валового продукта отрасли, что влечет за собой многомиллионные потери. Это непосредственным образом влияет на экономику нашей страны, так как основной доход Россия получает от продажи углеводородного сырья.

Известно, что коммерческий учет при движении нефти от промысла до реализации проводится неоднократно (до 20 раз) на основании показаний средств измерений различных параметров продукта (расход, объем, масса, плотность, вязкость, температура, содержание воды, минеральных солей и механических примесей и др.). На промежуточных и финишных технологических цепочках учет нефти выполняется современными приборами с

высокими точностными характеристиками – узлы учета сырой нефти и коммерческие узлы учета товарной нефти. Учет продукции нефтяной скважины (ее дебит) и группы скважин при кустовом обустройстве до сих пор ведется с помощью групповых замерных установок (ГЗУ) «Спутник», созданных в конце 60-х годов прошлого века. Естественно, дисбаланс между суммарным учетом добычи по скважинам и коммерческим учетом добычи по лицензионному участку существует всегда. Также, потери нефти на этапе транспортировки вызваны как естественной убылью (испарение, утечка, несанкционированная врезка, аварии), так и неточностью измерения. При наличии свободного газа фактические потери нефти могут превышать нормативное значение 0,5 %. Погрешности при коммерческом учете нефти обуславливаются несовершенным или даже устаревшим метрологическим аппаратом. А именно, несоответствие отечественных требованиям международных стандартов (плотность нефти по нашим стандартам измеряется при 20 °С, а по американским стандартам при 15 °С). Это приводит к двойному счету при коммерческом учете и тормозит развитие добычи нефти на основах раздела продукции. Поэтому между результатами измерений по российским и международным методиками выполнения измерений (МВИ) могут наблюдаться весьма значительные расхождения, т.к. многие МВИ системы ГОСТ Р основаны на устаревших измерительных технологиях. Поскольку отечественная приборостроительная промышленность в настоящее время не может обеспечить потребности отрасли в автоматических анализаторах мирового уровня, российские предприятия интенсивно используют импортную аналитическую технику, в том числе в качестве инструментального обеспечения требований ГОСТ Р. Отказываться от импортной измерительной техники под предлогом ее несоответствия ГОСТ Р нельзя, так как тогда контроль качества нефти и нефтепродуктов в России будет отброшен по техническому уровню далеко в прошлое. При коммерческом учете используют объемный принцип измерения расхода, то есть, метод измерения массового расхода являются косвенным, что приводит к использованию дополнительного оборудования и как следствие возникновению дополнительных погрешностей измерения. Суммарная погрешность узла учета по массе брутто будет определяться только погрешностью массового расходомера, и она составит 0,1 % ± стабильность нуля по массе брутто. В случае применения объемного расходомера (турбинного, роторного или ультразвукового) суммарная погрешность по массе брутто складывается из погрешностей расходомера, плотномера, вискозиметра, датчиков давления и температуры на измерительных линиях. И для того, чтобы уложиться в нормируемую СТ РК 2.26-2003 погрешность по массе брутто 0,25 % зачастую приходится прибегать к искусственным методам, как например, уменьшение рабочего диапазона измерения объемного счетчика.

Чтобы осознать, насколько важна точность в учете нефти, достаточно оценить масштаб потерь. По статистике погрешность измерений массы нефти и нефтепродуктов составляет 0,35–0,5 %. Так как коммерческий учет при движении нефти от промысла до реализации проводится около 20 раз, суммарная погрешность учета количества нефти на протяжении всего цикла

«добыча – реализация» может составить 2–3 %. Указанная погрешность, вне зависимости от ее знака, приводит к негативным последствиям для экономики всей страны. Действительно, если погрешность будет иметь знак «минус», произойдет фактическое повышение себестоимости цены нефти и нефтепродуктов и увеличение энергетической составляющей себестоимости продукции. Если погрешность окажется с «плюсом», в распоряжении хозяйствующих субъектов окажется неучтенный запас нефти, который может использоваться для покрытия сверхнормативных потерь и хищений, что в масштабах страны также составит значительные суммы. Поэтому знак погрешности можно не учитывать и считать, что из валового продукта отрасли из-за погрешности измерений только одного параметра нефти и нефтепродуктов, в частности, массы, выпадает 2–3 % общего объема добычи нефти. На первый взгляд, процент небольшой. На деле эта величина соизмерима с нормой прибыли предприятий в рыночной экономике. Ликвидировав данные потери, можно существенно повысить уровень рентабельности нефтяных компаний. В расчете на год она составляет 6–9 млн. т. При средней стоимости нефти 150 долларов за тонну ликвидация этих потерь дает увеличение внутреннего валового продукта страны до 1,5 млрд. долларов США. Для сравнения: эта величина более чем в два раза превышает запасы (2–4 млн. т) недавно введенного в эксплуатацию Хвалынского месторождения на Северном Каспии [5].

В настоящее время существует несколько направлений решения проблем, связанных с коммерческим учетом нефти. В данной ситуации существует необходимость гармонизировать отечественную систему измерения с международной, также, повысить уровень гармонизации национальных стандартов с международными и создать единую систему поверки. Для этого государство совместно с нефтяными компаниями разрабатывают единую систему стандартизации. По инициативе Газпрома, Роснефти, других ведущих нефтедобывающих компаний при поддержке Ростехрегулирования при Комитете Российского союза промышленников и предпринимателей (РСПП) по техническому регулированию, стандартизации и оценке соответствия был сформирован Межотраслевой Совет по стандартизации в нефтегазовом комплексе. Основной задачей Совета является формирование перспективной программы стандартизации и активное вовлечение специалистов отрасли в разработку национальных и международных стандартов. Уже в 2006 г. при широком участии российских и зарубежных специалистов были проанализированы международные стандарты в сфере нефте- и газодобычи и сделаны первые шаги по формированию перспективной программы стандартизации, в основу которой заложен принцип гармонизации. Учитывая многогранность технологий и оборудования нефтегазового комплекса в состав совета были приглашены представители смежных отраслей. Межотраслевым советом была тщательно проанализирована работа существующих технических комитетов по стандартизации в области технологии нефте- и газодобычи и был создан единый технический комитет, под руководством члена Правления ОАО «Газпром» госпожи Русаковой В.В. Уверены, что сделан значительный шаг в

направлении по гармонизации российских стандартов. Комитет РСПП готов активно сотрудничать с вновь созданным комитетом. Также, решение давно назревшей государственной проблемы нашли нефтяные компании России. Благодаря усилиям специалистов появились сначала предварительный, а затем и национальный стандарт ГОСТ Р 8.615-2005 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования». В них впервые в отечественной практике были сформулированы требования к точности измерения нефтяной массы, извлекаемой из скважины, массы содержания в ней самой нефти и объема попутного нефтяного газа. Почетная миссия по внедрению нового стандарта была возложена на Всероссийский научно-исследовательский институт (ВНИИР). Создаваемый по инициативе Федерального агентства по техническому регулированию и Министерства промышленности и торговли РТ Государственный эталонный комплекс по метрологическому обеспечению количества сырой нефти и нефтяного газа (ГЭК) будет единственным в России. В стандарт войдут все необходимые эталоны, которые расположатся на площадях ВНИИРа, включая испытательный полигон, который будет размещен на территории Ново-Суксинской установки подготовки высокосернистой нефти НГДУ «Прикамнефть». В настоящее время разработана первая редакция эскизного проекта технологической части ГЭК. Как сообщил директор Государственного научного метрологического центра Всероссийского научно-исследовательского института расходомерии Валдерий Иванов, это будет единственный в России центр, который позволит испытывать зарубежные и российские приборы и давать им дорогу в жизнь. Первичные эталоны комплекса будут ориентированы на условия эксплуатации рабочих средств измерения и полностью соответствовать международным стандартам, чтобы в полной мере проходить сличения и признаваться достоверными. Директор ВНИИРа считает, что ГЭК позволит создать дополнительную научную базу для разработки новых приборов, а у разработчиков появится возможность испытывать приборы на специальном полигоне комплекса. В то же время, вопрос обеспечения приборами учета носит лишь экономический характер и вполне решаем в довольно короткие сроки. Тем более теперь, когда до ввода эталонного комплекса осталось всего два года.

Российские компании-разработчики создают новые аппаратные средства учета сырья, которые начинают активно применяться в отечественном НК. Нефтяные компании модернизируют производство. Например: в ОАО «Транснефть» система учета организована на базе автоматизированных систем измерения количества и качества нефти. Для достижения нужных показателей работы узлы учета нефти неоднократно реконструировали, в том числе с заменой аппаратуры на электронную, с применением современной компьютерной техники. Несмотря на то, что требования ГОСТа «позволяют» не учитывать при неоднократной процедуре учета одной и той же партии нефти 1–2 % от общего ее количества, на узлах учета нефти поставили стационарные турбопоршневые установки взамен передвижных. В итоге за счет

совершенствования средств и методов измерений сейчас достигнута погрешность по объему порядка 0,1 %.

Таким образом, совершенствование метрологического обеспечения нефтяного комплекса, обеспечивающее повышение точности коммерческого учета нефти и нефтепродуктов, является одним из наиболее эффективных направлений инвестирования в стране, дает отдачу в виде увеличения объема реализации нефти и сокращения ее себестоимости. Поэтому это направление должно найти свое место в концепции и программе развития нефтяной отрасли. При анализе основных проблем метрологического обеспечения учета количества и качества нефти и нефтепродуктов необходимо, прежде всего, отметить отсутствие современных средств контроля параметров технологических процессов при производстве нефти и нефтепродуктов и при продаже их за рубеж. Средства измерений советского производства, применяемые в отрасли, не отвечают современным техническим требованиям, приближаются к критическому уровню по степени износа и техническому состоянию. Это является одной из основных причин резкого снижения объемов переработки нефти.

Несмотря на то, что погрешности измерения углеводородов приводят к многомиллиардным финансовым потерям, в правительственной концепции развития НГК не рассматривается вопрос улучшения метрологического обеспечения. Существует большая необходимость в гармонизации отечественной системы измерений с международной. Остается надеяться, что новый Национальный стандарт ГОСТ Р 8.615-2005 будет содействовать разработке недорогих отечественных средств учета и контроля продукции недр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. www.rosngs.ru/pub5.html - сайт Российского Союза Нефтегазостроителей.
2. www.serti.ru – сайт «Бесплатная, правовая, техническая документация, ГОСТы, законы».
3. Коршак, Алексей Анатольевич. Основы нефтегазового дела: Учебник / А. А. Коршак, А. М. Шаммазов.—2-е изд., доп. и испр.—Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002.—544 с.: ил.—Библиогр.
4. Шаммазов, Айрат Мингазович. Основы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов: учебное пособие / А. М. Шаммазов, А. А. Коршак, К. Р. Ахмадуллин; Уфимский государственный нефтяной технический университет.—Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000 .—158 с.: ил.—Библиогр.
5. Перчик А.И. «Проблемы развития трубопроводного транспорта в России», журнал «Известия», 2000, №54.
6. Федеральный закон от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании».

УДК 006

А.Н. Теплых

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОННЫХ ДИНАМОМЕТРОВ ЦИФРОВЫМ НИВЕЛИРОМ

A.N. Teplykh

Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF WAYS OF DEFINITION OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF REFERENCE DYNAMOMETERS BY THE DIGITAL LEVEL

Modern lines of development of a science and technics are directed on automation of processes of checking of means of measurements in laboratory conditions. Therefore development of ways of checking of means of measurements with use of digital systems of registration of results of measurements is an actual task of definition of metrological characteristics at measurement of force.

В настоящее время особая роль повышения точности измерений массы и силы потребовалась в нефтяной, газовой промышленности и других отраслях народного хозяйства, где были разработаны приборы для определения натяжения стальных канатов, особенно при бурении и капитальном ремонте скважин и других работах. Для обеспечения надежности и правильности результатов измерений приборы обычно поверяются на гидравлических разрывных машинах типа МР-500, которые в свою очередь также должны быть аттестованы и поверены. В работах [1, 2] была рассмотрена функциональная и технологическая схема работы разрывной машины МР-500. Для обеспечения достоверности результатов измерений машины типа МР-500 подвергаются поверке с помощью эталонных динамометров третьего разряда, которые в свою очередь аттестовываются на эталонных силоизмерительных машинах второго разряда. Однако очевидными недостатками данных способов поверки являются: технологическая и приборная сложность систем, а также наличие погрешности измерений, связанной с индивидуальными особенностями и психофизическим состоянием поверителя. Под технологической сложностью системы понимаются инструментальные и организационные трудности, в проведении поверки, вызванные необходимостью применения различных средств поверки типа гирь и их транспортирование при соблюдении требуемой точности и диапазонов измерений. Поэтому автором была поставлена задача по разработке современных способов определения величины растяжения или сжатия, которые включают в себя совместное использование эталонных динамометров

и цифровых систем регистрации результатов измерений с дистанционным съемом информации и записью её на карте памяти USB. Данные способы выполняются в лабораторных условиях с применением высокоточного цифрового нивелира типа Trimble DiNi 0.3, который позволяет измерять перемещения чувствительного элемента с погрешностью измерений линейных величин $\pm 0,01$ мм. Измерения проводятся в автоматическом режиме, а также и все операции связанные с обработкой их результатов и с возможностью сохранения данных на карте памяти USB. Это исключает возможность возникновения субъективной погрешности в результатах измерений.

При реализации способов определения растяжения (сжатия) эталонных динамометров нивелиром необходимо соблюдать нормальные условия измерений:

- Отсутствие в помещении оборудования, создающего вибрацию;
- Нивелир устанавливается на жестком основании, на расстоянии не менее наименьшего визирования расстояния от разрывной машины;
- Диапазон температуры окружающего воздуха – (20 ± 5) °C;
- Значение относительной влажности воздуха не более 80 %.

Если динамометр и (или) нивелир находились в условиях, где режим температуры отличался от указанной выше, то перед реализацией данного способа эти приборы необходимо выдерживать в помещении при температуре окружающего воздуха (20 ± 5) °C не менее 2 часов.

При определении величины растяжения (сжатия) эталонных динамометров необходимо получение информации о значениях растяжения (сжатия) динамометров в различных точках исследуемого диапазона силоизмерительной машины. Принципиальная схема способов определения растяжения (сжатия) эталонных динамометров нивелиром представлена на рис. 1. На эталонной машине второго разряда 1 закрепляется в захваты динамометр растяжения 2 или устанавливается на катковую опору машины динамометр сжатия 3. Затем на жестком основании устанавливается высокоточный цифровой нивелир на определенном расстоянии от исследуемого оборудования (не менее 2 м). После этого на подвижной траверсе силоизмерительной машины с помощью металлической скобы 4 закрепляется штрих-кодовая рейка 5. Перед началом пуска силоизмерительной машины нивелир 6 приводится в рабочее положение. Далее включается нивелир и проверяется его работоспособность, для чего устанавливается необходимая освещенность рейки и производятся тестовые отчеты по ней. После этого машиной создается усилие натяжения (сжатия). Проверка динамометров производится представителями органов государственной метрологической службы, допущенными в установленном порядке к поверке изделий силоизмерительной техники, знакомых с эксплуатационной документацией эталонных динамометров. С целью исключения всех люфтов в механическом соединении начальное измерение принимается при силе натяжения (сжатия) в 5 или 50 кН в зависимости от используемой силоизмерительной машины. В принципе при использовании

других силоизмерительных машин значение минимальной нагрузки может быть любым. Взятие отчета по рейке нивелиром производится через определенный интервал (5, 10 или 50 делений, в зависимости от используемой силоизмерительной машины). При использовании других машин диапазон измерений может быть любым. Эти действия продолжаются до максимальной нагрузки машины. При максимальном растяжении (сжатии) эталонных динамометров отчет нивелиром снимается дважды при прямом и обратном ходе эталонной машины. Затем в этом же диапазоне производится разгрузка машины до начального измерения со снятием отчета по рейке нивелиром в каждой точке диапазона и записью в его памяти. По окончании эксперимента результаты измерений сохраняются на карте памяти USB.

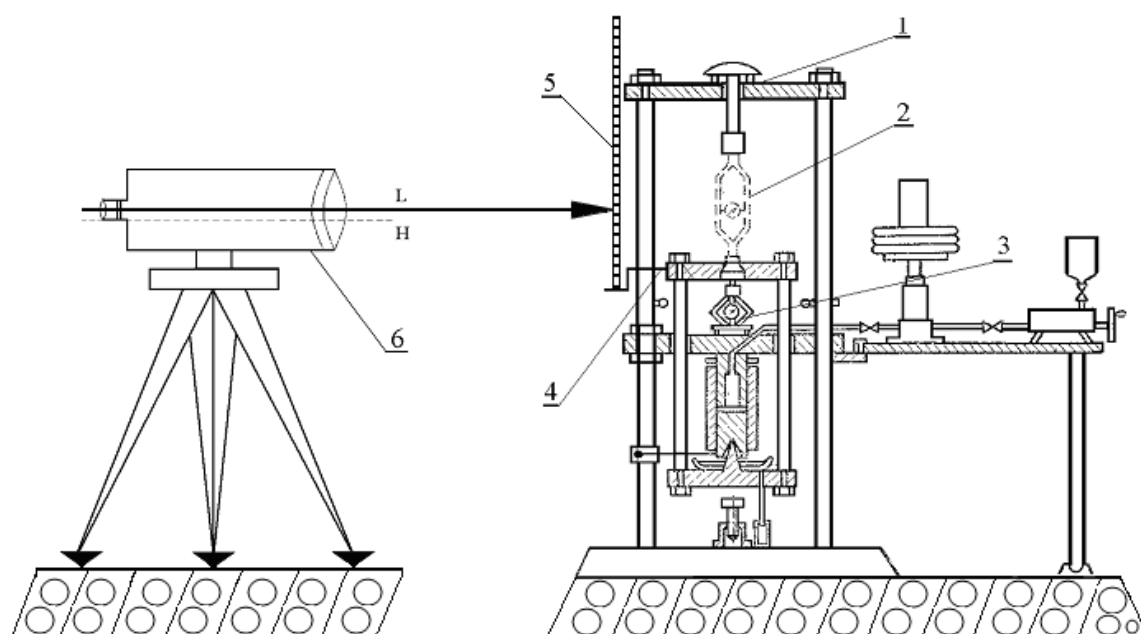


Рис. 1. Принципиальная схема способов определения растяжения (сжатия) эталонных динамометров третьего разряда цифровым нивелиром

Величина растяжения (сжатия) динамометров рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta l = N_1 - N_2, \quad (1)$$

где N_1 – показания нивелира при максимальном растяжении (сжатии) эталонного динамометра третьего разряда, мм;

N_2 – показания нивелира при минимальном растяжении (сжатии) динамометра третьего разряда, мм.

Личная погрешность оператора, обусловленная его индивидуальными особенностями, рассчитывается по формуле (2):

$$\Delta h = \pm h_{ni} - h_{pi} \quad (2)$$

где h_{ni} – показания нивелира в i -ой точки измерения задаваемой силоизмерительной машиной при нагружении, мм;

h_{pi} – показания нивелира в i -ой точки измерения задаваемой силоизмерительной машиной при разгрузке, мм.

Рассмотрим реализацию предложенного способа при испытании эталонного динамометра на растяжение. Реализация данного способа на растяжение осуществляется при помощи: эталонной машины ОМ-2-50 с погрешностью измерений 0,2 % и наибольшей предельной нагрузкой 500 кН; эталонного динамометра растяжения ДОРМ-3 с погрешностью измерений 0,5 % и наибольшей предельной нагрузкой 500 кН; нивелира Trimble DiNi 0.3 с погрешностью измерений линейных величин $\pm 0,01$ мм.

Для определения величины растяжения эталонного динамометра составляется табл. 1, в которую заносятся снятые с приборов показания.

Таблица 1. Данные приборов при испытании на растяжение Из полученных результатов исследования эталонного динамометра третьего разряда на растяжение можно сделать следующие выводы:

Показания эталонной машины второго разряда Р, кН	Показания цифрового нивелира Н, мм		Величина растяжения эталонных динамометров третьего разряда Δl , мм	
	Нагрузка	Разгрузка	Нагрузка	Разгрузка
50	481,57	481,62	2,89	2,84
100	482,04	482,02		
150	482,37	482,43		
200	482,67	482,76		
250	482,96	483,08		
300	483,27	483,38		
350	483,57	483,65		
400	483,85	483,93		
450	484,17	484,22		
500	484,46	484,46		

- При нагружении эталонной машины в пределах показаний с 50 до 500 деления значение растяжения динамометра составит 2,89 мм;
- При разгрузке машины в пределах показаний с 500 до 50 деления значение растяжения динамометра составляет 2,84 мм;
- Во всех точках исследуемого диапазона силоизмерительной машины при прямом и обратном ходах цифровым нивелиром была выявлена личная погрешность оператора, обусловленная его индивидуальными особенностями, колеблющаяся в диапазоне от $\pm 0,02$ до $\pm 0,12$ мм.

В табл. 2 показаны результаты испытаний эталонного динамометра третьего разряда на сжатие.

Таблица 2. Данные приборов при испытании на сжатие

Показания эталонной машины второго разряда Р, кН	Показания цифрового нивелира Н, мм		Величина сжатия эталонных динамометров третьего разряда Δl , мм	
	Нагрузка	Разгрузка	Нагрузка	Разгрузка
5	540,65	540,53	3,73	3,85
10	541,06	541,11		
20	541,86	542,09		
30	542,72	542,93		
40	543,50	543,60		
50	544,38	544,38		

На основании полученных результатов исследования эталонного динамометра третьего разряда на сжатие можно сделать следующие выводы:

- При нагружении машины в пределах показаний с пятого до пятидесятого деления значение сжатия динамометра составляет 3,73 мм;
- При разгрузке машины в пределах показаний с пятидесятого до пятого деления значение сжатия динамометра составит 3,85 мм;
- Во всех точках исследуемого диапазона эталонной машины при прямом и обратном ходах цифровым нивелиром была выявлена личная погрешность оператора, обусловленная его индивидуальными особенностями, колеблющаяся в диапазоне от $\pm 0,05$ до $\pm 0,23$ мм.

Таким образом, предложенные способы определения метрологических характеристик силоизмерительных приборов позволяют автоматизировать процесс поверки СИ в лабораторных условиях. Однако Государственная поверочная схема не устанавливает взаимосвязь эталонных СИ силы с дистанционными измерителями линейных перемещений, но в ней существует возможность заимствования СИ из других поверочных схем. Поэтому автором была поставлена задача по разработке предложений по совершенствованию Государственной поверочной схемы для СИ силы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплых, А.Н. Совершенствование методики поверки гидравлического индикатора веса ГИВ6-М2 [Текст] / А.Н. Теплых, И.Н. Косенко // Методы дистанционного зондирования и ГИС-Технологии для оценки состояния окружающей среды, инвентаризация земель и объектов недвижимости: сб. материалов XI междунар. научно-практ. конф. – Португалия, 2007. – С. 75–79.

2. Теплых, А.Н. Анализ погрешности индикаторов веса на разрывной машине МР-500 [Текст] / А.Н. Теплых, С.В. Хатюшин // «ГЕО-Сибирь»: сб. науч. тр. III междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 2007. – С. 164–167.

© *А.Н. Теплых, 2009*

УДК 006

А.Н. Теплых

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЦИФРОВЫМ НИВЕЛИРОМ

A.N. Teplykh

Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF WAYS OF DEFINITION OF DEFORMATION OF VARIOUS SAMPLES OF METALLIC STRUCTURES BY THE DIGITAL LEVEL

Modern lines of development of a science and technics at measurement of force are directed on automation of all processes of manufacture, including at carrying out of tests of various samples of metallic structures. Increase of requirements to accuracy of measurements conduct to the further improvement, development, and, as a rule, to complication of a design of test machines. Therefore development of ways of carrying out of tests of various samples of metallic structures with use of digital systems of registration of results of measurements is an actual task.

В настоящее время для статических испытаний стандартных образцов металлов и образцов сварных соединений применяются разрывные машины типа МР-500. В работах [1, 2] была рассмотрена функциональная и технологическая схема работы разрывной машины МР-500. Отмечается, что данные устройства используют визуальные способы регистрации показаний, поэтому не исключают субъективной погрешности измерений, связанной с индивидуальными особенностями и психофизическим состоянием оператора. Поэтому нами была поставлена задачи по внедрению в производство способов испытаний различных образцов металлоконструкций, которые позволят получать дистанционно достоверные результаты измерений, застрахованные от субъективной ошибки, а также возможного их умышленного изменения. Данные способы выполняются в лабораторных и производственных условиях с применением высокоточного цифрового нивелира типа Trimble DiNi 0.3, который позволяет измерять перемещения чувствительного элемента с погрешностью измерений линейных величин $\pm 0,01$ мм. Измерения производятся в автоматическом режиме, а также и все операции связанные с обработкой их результатов и с возможностью сохранения данных на карте памяти USB. Это исключает возможность возникновения субъективной погрешности в результатах измерений.

Под деформацией будем понимать растяжение (сжатие), прогибы и изломы различных строительных конструкций.

При реализации способов определения деформации различных образцов металлоконструкций цифровым нивелиром необходимо соблюдать нормальные условия измерений:

- Отсутствие в помещении оборудования создающего вибрацию;
- Нивелир устанавливается на жестком основании, на расстоянии не менее наименьшего визирования расстояния от разрывной машины;
- Устанавливается необходимая освещенность рейки;
- Диапазон температуры окружающего воздуха – $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- Величина относительной влажности воздуха не более 80 %.

Если нивелир находился в условиях, где режим температуры отличался от указанной выше, то перед реализацией данного способа его необходимо выдерживать в помещении при температуре окружающего воздуха $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ не менее 2 часов.

Исследование образца арматурной стали на растяжения. При определении растяжения арматурной стали необходимо получение информации о значениях её растяжения в различных точках исследуемого диапазона разрывной машины. Поставленная задача может быть решена следующим образом. Принципиальная схема способа определения растяжения образца арматурной стали цифровым нивелиром представлена на рис. 1. В зажимах разрывной машины 1 закрепляется исследуемый образец арматурной стали 2 диаметром 16,02 мм. Диаметр исследуемого образца измеряется с помощью микрометра. Затем на жестком основании устанавливается высокоточный цифровой нивелир на расстоянии от разрывной машины не менее 2 м, для получения результатов измерений заданной точности. Была разработана методика высокоточного геометрического нивелирования цифровым нивелиром. Данная методика включала: выбор точности измерений, предела измерений, быстроты измерений и продолжительности цикла измерений. Точность измерений зависит от расстояния до предмета измерений, выбранной программы измерений и влияния внешних условий. В зависимости от условий измерений цифровым нивелиром могут применяться различные программы наблюдений.

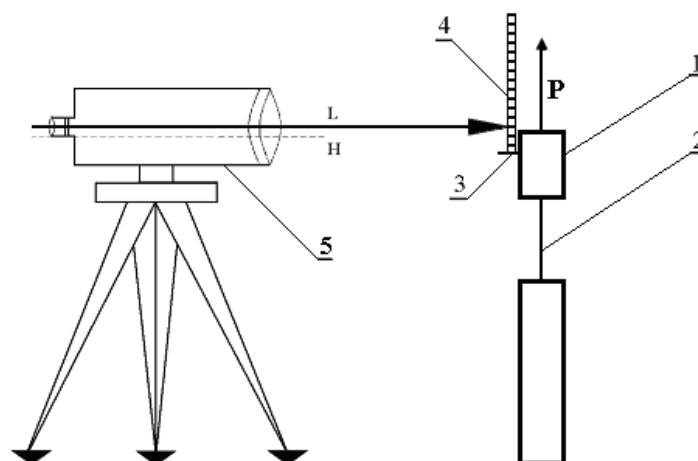


Рис. 1. Принципиальная схема способа определения растяжения образца арматурной стали цифровым нивелиром

Программа А. Сущность данной программы состоит в том, что измерение перемещений производится путем однократного взятия отсчета. Под однократным взятием отсчета понимается взятие отсчета по рейке путем однократного визирования на рейку и однократного нажатия на кнопку пуск нивелира. При этом необходимо отметить, что нивелир представляет на цифровом табло отсчет, состоящий из ста независимых отсчетов. После взятия ста отсчетов происходит их осреднение с последующей выдачей его на табло. Отсчет, по рейке взятый при неизменном положении нивелира будет называться горизонтом нивелира. Последовательность взятия отсчетов по данной программе представлена в табл. 1.

Таблица 1. Программа наблюдений А

Последовательность наблюдений на станции	
Прямой ход	Обратный ход
$З_{к1}, З_{к2} \dots З_{кn}$	$З_{кn} \dots З_{к2}, З_{к1}$

Поясним, что $З_k$ – кодовая сторона задней рейки. Сначала необходимо произвести исходный отсчет по кодовой стороне рейки $З_{к1}$. Затем через определенный временной интервал проводится повторное взятие отсчета по кодовой рейки $З_{к2}$. Таких операций проводится n раз в зависимости от условий применения (значений нагрузки силоизмерительной машины). Отметим, что при необходимости взятие отсчетов производится в обратной последовательности.

В тех случаях, когда по производственным условиям возникает необходимость измерения перемещений по двум точкам, необходимо применять программу Б. Сущность данной программы состоит в том, что с её помощью

измерение перемещений можно производить в двух точках. Взятие отсчета и осреднение производится аналогично программе А.

После этого на подвижной траверсе гидравлической машины с помощью металлической скобы 3 закрепляется штрих-кодовая рейка 4. Перед началом пуска разрывной машины цифровой нивелир 5 приводится в рабочее положение. Далее включается нивелир и проверяется его работоспособность, для чего устанавливается необходимая освещенность рейки и производятся тестовые отчеты по ней. После этого машиной создается усилие натяжения. С целью исключения всех люфтов в механическом соединении начальное измерение принимается при силе натяжения в 5 кН. В принципе при использовании других силоизмерительных машин значение минимальной нагрузки может быть любым. Затем производится взятие исходного отчета по штрих-кодовой рейке цифровым нивелиром. По аналогии через 5 делений гидравлической машины нивелиром производится взятие следующего отчета. После этого взятие отчета по рейке цифровым нивелиром производится через каждые 10 делений разрывной машины с записью результатов измерений в его памяти. При использовании других силоизмерительных машин диапазон измерений может быть любым. Эти действия продолжаются до максимальной нагрузки разрывной машины, интересующей точке исследуемого диапазона или момента разрыва исследуемого образца. По окончании эксперимента результаты измерений сохраняются на карте памяти USB.

Величина деформации различных металлоконструкций рассчитывается по формуле (1):

$$\Delta l = N_1 - N_2, \quad (1)$$

где N_1 – показания нивелира при максимальной деформации различных образцов металлоконструкций, мм;

N_2 – показания нивелира при минимальной деформации различных образцов металлоконструкций, мм.

В табл. 2 показаны результаты испытаний образца арматурной стали на растяжение.

Таблица 2. Данные приборов при испытании на растяжение

Показания разрывной машины Р, кН	Показания цифрового нивелира Н, мм	Величина растяжения образца арматурной стали Δl , мм
5	665,46	16,49
10	668,86	
20	673,21	
30	675,27	
40	677,31	
50	680,86	
60	680,87	
70	680,89	
80	680,93	
90	681,95	
100	679,85	

За максимальное растяжение образца арматурной стали, принимаются показания разрывной машины на 90 делении, так как на 96 делении машины произошел разрыв исследуемого образца.

Из полученных результатов исследования образца арматурной стали на растяжение можно сделать следующий вывод:

- При нагружении разрывной машины в пределах показаний с пятого до девяностого деления величина растяжения исследуемого образца арматурной стали составляет 16,49 мм.

Аналогичным образом проведены испытания образца сварной металлоконструкции на изгиб. Принципиальные отличия от вышерассмотренного исследования состоят в том, что в качестве исследуемого образца используется сварная металлоконструкция и разрывной машиной создается усилие сжатия. Принципиальная схема способа определения стрелы прогиба f образца сварной металлоконструкции нивелиром представлена на рис. 2.

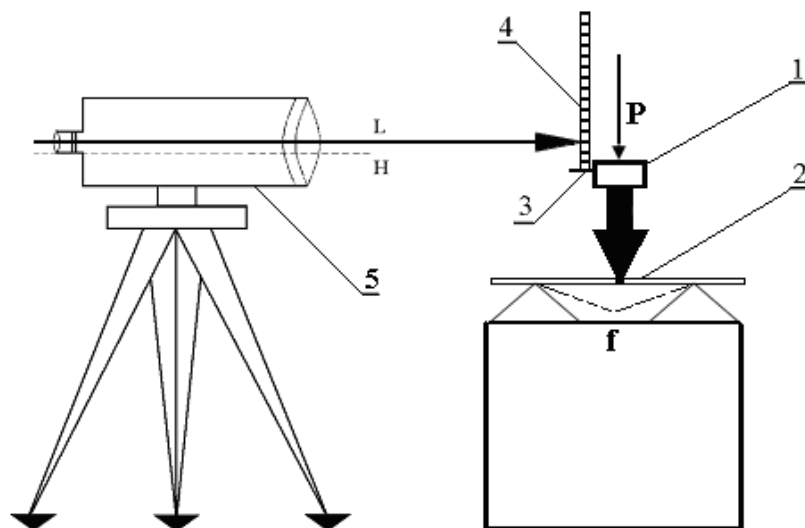


Рис. 2. Принципиальная схема способа определения стрелы прогиба f образца сварной металлоконструкции нивелиром

За максимальный прогиб образца сварной металлоконструкции принимаются показания разрывной машины на 70 делении, так как на 72 делении машины произошел излом испытуемого образца.

На основании полученных результатов исследования образца сварной металлоконструкции на изгиб можно сделать следующий вывод:

- При нагружении разрывной машины в пределах показаний с пятого до семидесятого деления величина стрелы прогиба f исследуемого образца сварной металлоконструкции составляет 21,58 мм.

Таким образом, данные способы определения метрологических характеристик стандартных образцов металлоконструкций позволяют получить достоверные результаты измерений, застрахованные от субъективной ошибки, а также возможного их умышленного изменения. Сущность предложенных способов состоит в том, что исходные метрологические данные, полученные нивелиром в автоматическом режиме без участия наблюдателя, хранятся на карте памяти USB в контролирующей организации. В случае возникновения аварийной ситуации, с целью установления причин аварии, карта памяти USB является подтверждающим документом достоверности проведения метрологических измерений. Кроме этого, на данной карте памяти USB могут храниться результаты следующих освидетельствований.

На рис. 3 приведена стандартная форма таблицы для хранения результатов исследований в ПК (персональном компьютере).

For M5 Adr	1 TO	mp500.dat						
For M5 Adr	2 KD1	2	10:40:503	R	0.50617 m	HD	4.234 m	
For M5 Adr	3 KD1	3	10:41:423	R	0.50700 m	HD	4.234 m	
For M5 Adr	4 KD1	4	10:42:113	R	0.50843 m	HD	4.234 m	
For M5 Adr	5 KD1	5	10:42:373	R	0.50908 m	HD	4.234 m	
For M5 Adr	6 KD1	6	10:42:593	R	0.51093 m	HD	4.234 m	
For M5 Adr	7 KD1	7	10:43:333	R	0.51170 m	HD	4.234 m	

Рис. 3. Стандартная форма таблицы для хранения результатов исследований в ПК

Не вмешиваясь в работу цифрового нивелира, представим полный файл проведения исследований (рис. 4).

Показания разрывной машины Р, кН	For M5 Adr	1 TO	mp500.dat					
5	For M5 Adr	2 KD1	2	10:40:503	R	0.50617 m	HD	4.234 m
10	For M5 Adr	3 KD1	3	10:41:423	R	0.50700 m	HD	4.234 m
20	For M5 Adr	4 KD1	4	10:42:113	R	0.50843 m	HD	4.234 m
30	For M5 Adr	5 KD1	5	10:42:373	R	0.50908 m	HD	4.234 m
40	For M5 Adr	6 KD1	6	10:42:593	R	0.51093 m	HD	4.234 m
50	For M5 Adr	7 KD1	7	10:43:333	R	0.51170 m	HD	4.234 m

Рис. 4. Полный файл проведения исследований

Таким образом, предложенные способы позволяют непосредственно на предприятии арестовывать стандартные образцы металлоконструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплых, А.Н. Разработка и исследование методики поверки индикаторов веса [Текст] / А.Н. Теплых // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск, 2008. – № 2. – С. 177–189.
2. Теплых, А.Н. Анализ погрешности индикаторов веса на разрывной машине МР-500 [Текст] / А.Н. Теплых, СВ. Хатюшин // «ГЕО-Сибирь»: сб. науч. тр. III междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 2007. – С. 164–167.

© А.Н. Теплых, 2009

УДК 528

А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров, М.В. Бодров

ИТ СО РАН, Новосибирск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕКУЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ВЯЗКОСТИ НЕФТЕВОДЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ

A.F. Serov, V.N. Mamonov, A.D. Nazarov, M.V. Bodrov

Institute of Thermophysics of Russian Academy of Science (IT RAS)

Lavrentyev aven., 1, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

DETERMINATION OF A CURRENT VISCOSITY OF THE WATER-OIL EMULSION

The leading oil-producing companies are actively introducing the progressive technology of controlled oil production on the basis of mathematic hydrodynamic model of a bed, well parameters and controlled supply of various mixtures into a bed. This allows 60% improvement of efficient utilization of the oil pools.

Ведущие нефтедобывающие фирмы в настоящее время интенсивно внедряют прогрессивную технологию управляемой добычи нефти на основе математической гидродинамической модели пласта, параметров скважины и управляемой подачи различных смесей в пласт, что позволяет повысить эффективность использования залежей до 60 %.

Одной из наиболее важных и сложных задач является измерение объема отдельных компонент механической смеси (эмульсии) поднимаемой из скважины. Эмульсия, поднимаемая из пласта, является термодинамически неустойчивой дисперсной средой первого или второго рода и содержит большое количество компонент как органических, так и минеральных. Наиболее сложно учитываемым параметром при измерении расхода эмульсии является кажущаяся вязкость. Нефтяные эмульсии относятся к полидисперсным системам, так как состоят из капель различного диаметра воды и нефти. Вязкость нефтяных эмульсий – не аддитивное свойство и зависит от типа смеси, вязкости нефти, температуры, влажности, степени дисперсности смеси и от градиента скорости в потоке. Это обстоятельство весьма затрудняет использование известных уравнений (А. Эйнштейн, Монсон, Wioelflin [1, 2]). Их можно использовать для расчета вязкости только в определенных областях состояния диспергированного вещества. Например, одни формулы рассчитаны для нефти с содержанием воды до 30–35 %, для применения других необходимы специальные исследования и определение большого числа расчетных данных.

Более прогрессивным методом учета истинного значения кажущейся вязкости потока может быть метод непосредственного измерения вязкости смеси в измерительном участке регистратора расхода смеси.

Для решения этой задачи был применен метод регистрации мгновенного значения сопротивления специального сужающего устройства (СУ), представляющего собой плоскую щель в канале круглого сечения. На рис. 1 приведена схема СУ.

СУ является одним из традиционных инструментов, используемых для измерения расхода жидкостей и газов. Часто используемые разновидности СУ – это стандартные диафрагмы и стандартные сопла. Теория и методики применения СУ в настоящее время хорошо проработаны. Геометрия, типоразмеры и диапазоны измерения расходов СУ, используемых в технологических и коммерческих целях, жестко регламентированы различными ГОСТ и ТУ [3].

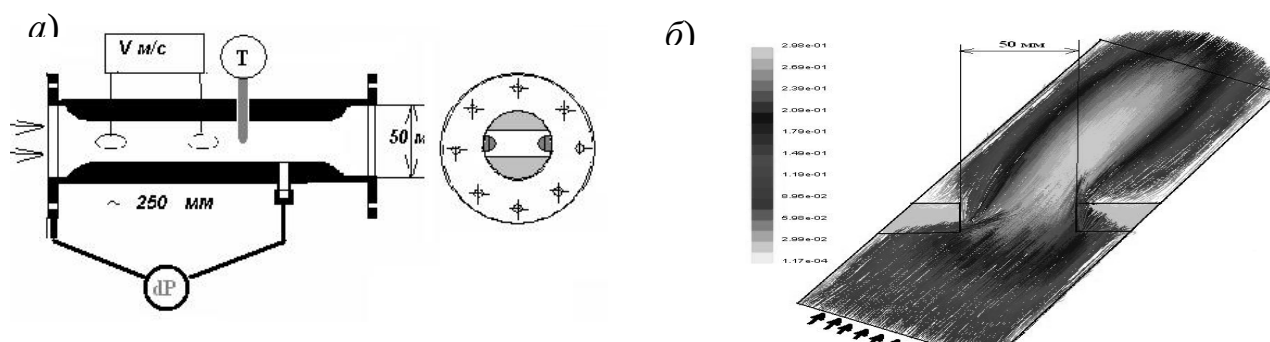


Рис. 1. Схема измерительного участка и картина поля скоростей потока: а – измерительный участок (V м/с – ультразвуковой измеритель скорости, dP – дифференциальный манометр, T – датчик температуры); б – поле скоростей в щелевом зазоре

Обычно СУ используют для измерения расхода газов и жидкостей в области достаточно больших чисел Рейнольдса (большие скорости течения и малые значения вязкости потока), когда силами трения в потоке можно пренебречь. В этом случае расход жидкости или газа через СУ пропорционален потере давления на СУ и может быть легко определен по калибровочной кривой СУ, если измерена эта потеря давления. Вид калибровочной кривой зависит только от геометрии СУ.

В настоящей работе предлагается использовать СУ нетрадиционным способом – для измерения вязкости нефтеводных смесей (НВС) или других жидкостей, имеющих такую вязкость, когда силами трения в потоке уже пренебречь нельзя.

При работе с НВС в общем случае, когда вязкость НВС может быть достаточно высока, а расходы весьма умеренны, очень удобно характеризовать конкретное СУ, имеющее определенную геометрию проточной части,

универсальной для любых несжимаемых жидкостей зависимостью, которая учитывает и вязкость потока:

$$\lambda = f(Re).$$

Здесь $\lambda = \Delta P / (\rho V^2 / 2)$ – коэффициент сопротивления СУ, представляющий собой отношение сил давления потока к силам инерции, $Re = \rho V D / \mu$ – число Рейнольдса, ΔP – перепад давления на СУ, ρ – плотность жидкости, протекающей через СУ, V – средняя скорость потока во входном сечении СУ, D – диаметр входного сечения СУ, μ – динамическая вязкость жидкости.

Безразмерная зависимость $\lambda = f(Re)$ индивидуальна для каждого СУ, так как в нее входят параметры, описывающие геометрию СУ.

Но эта индивидуальная с точки зрения геометрии СУ зависимость универсальна для любых жидкостей (в том числе и для смесей) во всем доступном для практики диапазоне расходов, так как она учитывает кинематику потока (скорость V) и свойства жидкости (плотность ρ и вязкость μ).

Таким образом, если для конкретной геометрии проточной части СУ каким-либо образом (расчетным или экспериментальным) получена универсальная зависимость $\lambda = f(Re)$ или обратная ей $Re = g(\lambda)$, то эти зависимости можно использовать для любых несжимаемых ньютоновских жидкостей (в том числе и при достаточно малых числах Рейнольдса) для решения, по крайней мере, двух задач:

1. Для определения объемного или массового расхода жидкости, протекающей через СУ, если измерен перепад давления ΔP на СУ и известны плотность жидкости ρ и динамическая вязкость жидкости μ .

2. Для определения динамической вязкости жидкости μ (например, НВС), если измерены перепад давления ΔP на СУ, объемный расход жидкости Q (средняя скорость жидкости V во входном сечении СУ) и известна (из таблиц или измерена) плотность жидкости ρ .

Описанная выше методика измерения вязкости и объемного расхода вязких жидкостей с помощью СУ была реализована и показала хорошие результаты.

Геометрические размеры измерительного участка канала определялись из оптимального соотношения потери давления при заданном диапазоне регистрируемых расходов. В качестве одного из рабочих вариантов на рис. 1 приведены параметры измерительного участка расходомера для диапазона расходов от $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Математическая модель канала позволила определить зависимость сопротивления измерительного участка от скорости и вязкости потока.

Измерительный участок канала имел диаметры входного и выходного сечений 50 мм, и общую монтажную длину 600 мм.

Для проведения измерений был разработан и изготовлен специальный гидравлический стенд, позволяющий создавать в рабочем участке СУ стационарный поток жидкости с заданным расходом и известными характеристиками (температура, вязкость, плотность). В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор глицерина. В состав стенда входил

теплообменник, который позволял поддерживать в гидравлическом контуре любую заданную температуру в диапазоне от 25 °С до 70 °С.

Были проведены пять серий экспериментов:

- На воде при температуре 30 °С;
- На водном растворе глицерина (80 % глицерина) при температуре 25 °С;
- На водном растворе глицерина (80 % глицерина) при температуре 68 °С;
- На водном растворе глицерина (70 % глицерина) при температуре 25 °С;
- На водном растворе глицерина (70 % глицерина) при температуре 65 °С.

Эти эксперименты позволили охватить диапазон чисел Рейнольдса от 200 до 32000 при изменении динамической вязкости рабочей жидкости от 1 сП до 45 сП.

На рис. 2 приведена полученная на основе этих экспериментов безразмерная зависимость для измерительного участка СУ в виде $\lg Re = f(\lg \lambda)$.

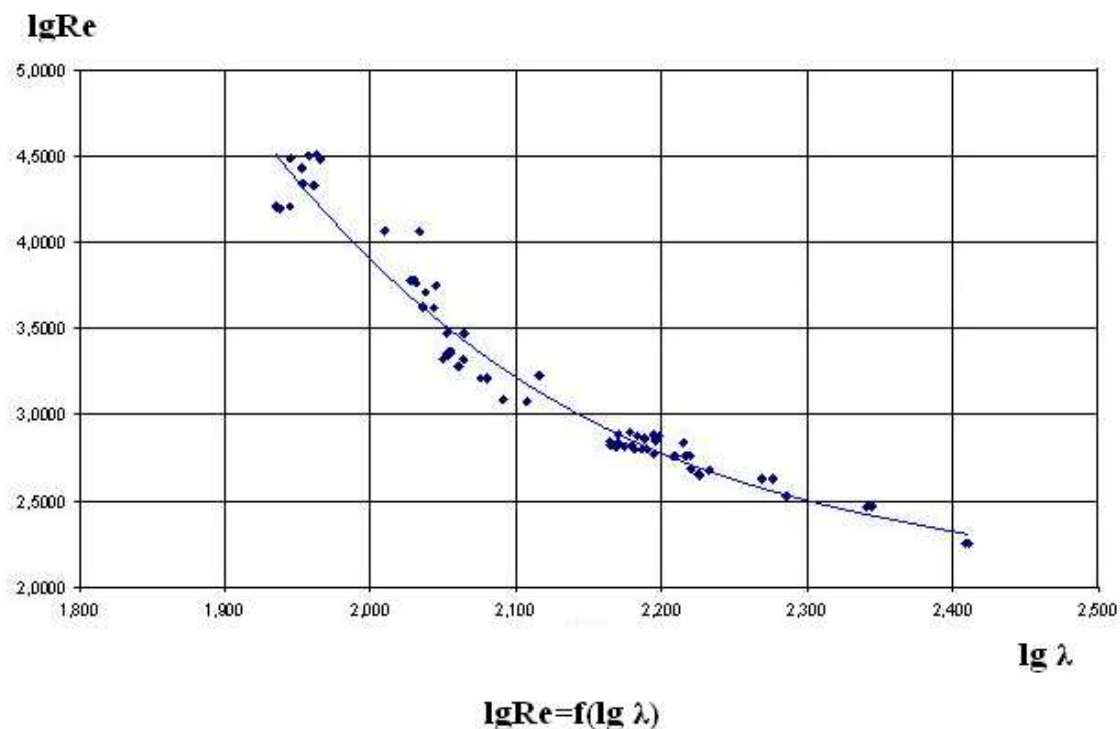


Рис. 2. Безразмерная зависимость числа Рейнольдса от коэффициента сопротивления СУ

Из рисунка следует, что полученные экспериментальные точки хорошо обобщаются полиномом третьей степени и, следовательно, эту зависимость можно использовать для определения вязкости жидкостей в указанных выше диапазонах вязкостей и чисел Рейнольдса.

На рис.3 приведено сравнение измеренного по описанной методике значения динамической вязкости рабочей жидкости с его фактическим значением, определенным с помощью капиллярного вискозиметра. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор глицерина (80% глицерина) при температуре 25°С. Экспериментальные точки отличаются расходом

жидкости через СУ: расход изменялся в диапазоне от $1\text{ м}^3/\text{ч}$ до $4\text{ м}^3/\text{ч}$. Вязкость рабочей жидкости $\mu = 46\text{ сП}$.

Из рисунка следует, что погрешность измерения вязкости рабочей жидкости предлагаемым методом составляет величину порядка $\pm 10\%$. Это достаточно хорошая точность, если измеренные значения вязкости использовать для практических целей, например, при определении расхода водонефтяных эмульсий.

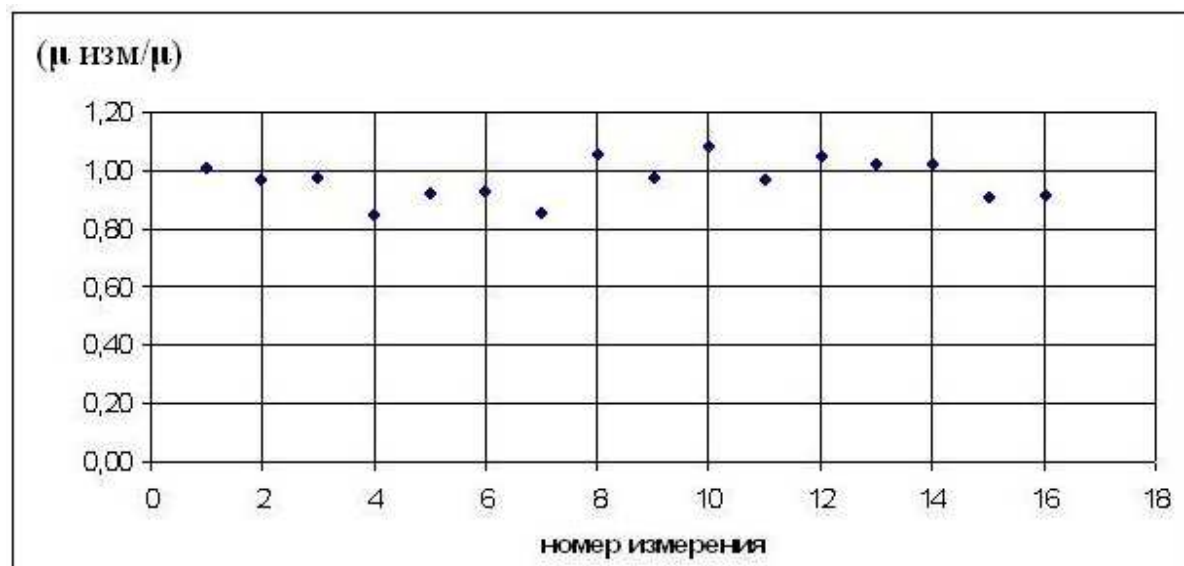


Рис. 3. Отклонение измеренного значения динамической вязкости рабочей жидкости от фактического значения ($\mu_{\text{изм}}/\mu$)

Таким образом, предлагаемая методика с помощью СУ позволяет мало затратным способом решить проблему измерения вязкости жидкостей в потоках при малых числах Рейнольдса. В сочетании с ультразвуковыми расходомерами такие СУ, вполне возможно, позволят решить проблему учета товарной нефти на нефтяных скважинах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.М. Люстрицкий. Влияние дисперсности на вязкость нефтеводных эмульсий. М.; ВНИИОНГ, Нефтепромысловое дело, 1997. – № 10-11. С. 35–37.
2. П.А. Ребиндер. Поверхностные явления в дисперсных системах. Избр. Тр., Наука, 1979. – 384 с.
3. П.П. Кремлевский. Расходомеры и счетчики количества вещества. Справочник. – С.-П.: Политехника, 2002. – 409 с.

© А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров, М.В. Бодров, 2009

УДК 528.8

Г.В. Симонова, Е.П. Хлебникова, Д.П. Симонов

СГГА, г. Новосибирск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

G.V. Simonova, E.P. Hlebnikova, D.P. Simonov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk , 630108, Russian Federation

USE OF STRUCTURAL ATTRIBUTES AT DIGITAL PROCESSING OF THE IMAGE

The techniques, existing on at present moment, automated дешифрования of multizone space pictures quite objectively use the data of spectral reflective properties of objects, which full enough can be expressed through spectral factors of brightness and spectral factors of reflection. However carried out experiments show, that the greatest degree of reliability decode can be reached, using structural attributes of objects including not only brightness, but also geometrical, and as typical attributes of interesting educations.

Анализ существующих методов обработки и дешифрования цифровых изображений различных объектов показывает необходимость использования не только многоспектральных яркостных характеристик, но и характер их распределения в данном массиве.

Развитие технических средств получения и обработки цифровой информации позволяет значительно расширить диапазон используемых оценочных параметров. Проведенные ранее эксперименты [1] выявили ряд проблем, возникающих при обработке мультиспектральных снимков:

- Конечное число спектральных каналов;
- Интегрирование информации по пикселю, связанное с разрешающей способностью съемочной системы;
- Совпадение спектральных характеристик разных объектов;
- Изменение собственных характеристик объектов в зависимости от их состояния;
- Наличие диапазона разброса собственных признаков одного и того же объекта;
- Несовершенство методик и алгоритмов использования программного обеспечения.

Таким образом, выявлена необходимость формирования системы признаков, имеющих разную природу, которая позволит создать однозначную

модель объекта, т. е. получить интегральную совокупность признаков, характеризующую объект в цифровом пространстве. Такой подход позволяет воспользоваться методологией системного анализа, при котором учитывается изменение количества данных и структуры информационных пакетов, а также качество и количество связей между ними. Поэтому целесообразно сравнивать и отслеживать изменения не только всего объекта в целом, но и его отдельных подсистем, компонентов, составляющих, элементов.

В результате можно получить дополнительную информацию, не вводя в систему новых элементов, но организуя новые связи. В этом случае, за генерацию свойств объекта будет отвечать система признаков, а не их автономный набор.

В связи с изложенным выше, следует рассмотреть возникновение свойства системы, которого нет у частей, т.е. эмерджентность. Эмерджентность – это появление нового свойства (информации), возникшего в результате объединения элементов в систему [2]. Следовательно, появление совершенно новых свойств системы обусловлено взаимосвязанной совокупностью элементов, каждый из которых до объединения подобным свойством не обладал (Рисунок 1).

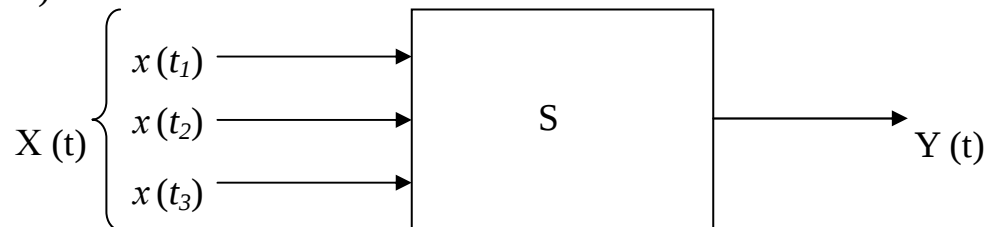


Рис. 1. Схема формирования результата

В данном случае:

t_i – признак объекта;

$x(t_i)$ – свойство признака;

$X(t)$ – совокупность свойств;

S – система;

$Y(t)$ – свойство системы.

Таким образом

$$Y(t) = S(X(t)), \quad (1)$$

где

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t)\}. \quad (2)$$

Наиболее частые и распространенные способы автоматизированной обработки цифровых изображений, основанные на анализе спектральных характеристик, во многих случаях не позволяют качественно и надежно решать различные задачи дешифрирования [3]. Это обусловлено как изменчивостью самих объектов исследования, так и указанными выше факторами. Таким образом, для решения поставленных задач необходимо учесть не только яркость изображений, но и их специфические структурные признаки.

Структура, или рисунок, объектов на снимке – это сложный признак, объединяющий все другие прямые признаки (форма, размер, тон и т. д.)

компактной группы однородных и разнородных деталей изображения на снимке. При этом структура характеризуется и новыми свойствами, обусловленными повторяемостью, размещением и количеством этих непосредственно распознаваемых деталей. Признак структуры наиболее устойчивый из прямых признаков, менее зависящий от условий съемки, чем другие. При дешифрировании комплексных объектов, особенно на снимках сравнительно мелких масштабов, этот признак может стать определяющим.

Например, снимки различных территорий обладают отличными наборами характерных форм природных и антропогенных объектов, свойственных именно этому типу ландшафта : для тундровых, лесных или таежных зон они будут значительно отличаться друг от друга.

Проведенные ранее эксперименты [4] по распознаванию типовых участков местности показали эффективность использования структурных признаков. В качестве таковых рассматривались спектральные характеристики объектов, их размер и форма, корреляционные связи между яркостями объектов в разных каналах, использование картографических материалов и т. д.

Однако при их выборе выявились определенные особенности. Одни и те же признаки объектов могут по-разному упорядочиваться в зависимости от того, какие их свойства рассматривать. Критерий, измеряющий это свойство, позволяет найти наилучшую (по этой совокупности) альтернативу. Понятно, что вариант, наилучший по одному критерию, не обязательно будет наилучшим по другому критерию.

Поэтому в настоящее время проводятся исследования по выбору оптимальной иерархии использования имеющихся структурных признаков при идентификации объектов в процессе реализации алгоритма «дерево решений», предусмотренного в программном продукте ENVI.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хлебникова, Е.П. Повышение эффективности регионального мониторинга по многозональным космическим снимкам / Хлебникова Е.П. // ГЕО-Сибирь-2007. Т.3. Дист. методы зонд. Земли и фотограмметрия, мониторинг окр. среды, геоэкология: сб. материалов III междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25 – 27 апреля 2007 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С.171 – 174.
2. Акофф, Рассел Л. Идеализированное проектирование/ Рассел Л. Акофф, Дж. Магидсон. – Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2007. – 320 с.
3. Симонова, Г.В. Сравнительный анализ методик формирования эталонов при обработке цифровых изображений /Симонова Г.В., Хлебникова Е.П. // ГЕО-Сибирь-2007. Т. 5. Специализ. приборостроение, метрология: Сб. материалов III междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25-27 апреля 2007г., Новосибирск – Новосибирск: СГГА, 2007. - С.185 – 189.
4. Хлебникова, Е.П. Автоматизированное определение типовых участков местности на примере курганов Алтая / Хлебникова Е.П. // ГЕО-Сибирь-2008. Т.3. Ч.1. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия,

мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов IV междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2008», 22-24 апреля 2008г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2008. - С.109 – 113.

© Г.В. Симонова, Е.П. Хлебникова, Д.П. Симонов, 2009

УДК 536.5

А.Ф. Бродников, В.Я. Черепанов

ИЯФ СО РАН, Новосибирск

СГГА, Новосибирск

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ НА ОСНОВЕ МИНИАТЮРНЫХ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК

A.F. Brodnikov, V.Ya. Cherepanov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

INCREASE OF ACCURACY OF REPRODUCTION AND TRANSFER OF A TEMPERATURE SCALE ON THE BASIS OF TINY CONSTANT OF POINTS

The advantages and opportunities tiny constant of points of a temperature scale are considered.

В последние два десятилетия после принятия Международной температурной шкалы МТШ-90 [1] наметилась тенденция к существенному совершенствованию аппаратуры для реализации реперных точек, основанных на фазовых переходах первого рода в чистых веществах. Эта аппаратура традиционно состоит из теплового блока с ампулой, содержащей, как правило, более 1 кг высокочистого вещества, и устройства задания температурного режима, например, специальной трубчатой печи. Аппаратура содержит также электронные блоки, осуществляющие измерения, автоматическое поддержание и многоканальное регулирование температуры теплового блока [2].

К первому этапу модернизации аппаратуры для реализации реперных точек можно отнести переход от электронных блоков, размещённых в громоздких напольных стойках значительных размеров, к малогабаритным блокам, которые можно установить на обычном лабораторном столе. Это стало возможным благодаря использованию микропроцессорных устройств, выполняющих функции измерений, цифрового регулирования и обработки измерительной информации.

Второй этап заключается в тенденции создания малогабаритных ампул с чистым веществом массой около 300 г [3], и даже миниатюрных ампул, содержащих менее 10 г чистого вещества [4, 5].

Эта тенденция объясняется следующими факторами:

- Намного более низкой стоимостью ампул за счёт малого количества дорогого, высокой чистоты вещества;
- Удобством транспортировки миниатюрных ампул при сличениях эталонов и при передаче шкалы;

- Практически мгновенный (для тепловых процессов) выход на стационарный режим, соответствующий температуре фазового перехода;
- Компактность всего теплового блока с миниатюрной ампулой.

Кроме этого имеется ещё одно важное преимущество миниатюрных ампул, которое авторы этой работы обнаружили при создании новой реперной точки фазового перехода плавления – затвердевания натрия [6]. Это возможность практически безопасного использования для реперных точек химически активных и других опасных веществ. Примером этого является также тройная точка ртути, реализованная в цилиндрической ампуле диаметром около 5 мм и высотой 60 мм, содержащей 7 г ртути [5]. Погрешность воспроизведения единицы температуры в такой ампуле, как показали международные сличения, не превышает 0,1 мК.

В настоящей работе рассмотрены некоторые дополнительные особенности реализации реперных точек на основе миниатюрных ампул. Ранее [5] было показано, что если навеска вещества в ампуле имеет молярную теплоту плавления Δh и молярную теплоёмкость c_μ , то период $\Delta\tau$ стабилизации температуры (площадки) плавления (затвердевания) навески равен

$$\Delta\tau = \Delta h / c_\mu v, \quad (1)$$

где v – скорость нагревания (охлаждения) вещества до площадки фазового перехода.

Это соотношение показывает важную особенность рассматриваемого процесса – независимость продолжительности площадки на кривой плавления или затвердевания от массы навески чистого вещества. Продолжительность площадки при этом обратно пропорциональна скорости нагревания или охлаждения навески. Поэтому при медленном подходе к температуре перехода площадка может быть достаточно продолжительной и составлять несколько часов. Этот вывод является важным аргументом в пользу перспективности разработки миниатюрных ампул, так как длительность фазового перехода относится к важнейшей характеристике реперных точек.

Скорость v изменения температуры навески зависит от теплового потока, подводимого к ампуле или отводимого от неё устройством задания температурного режима. Поэтому в традиционных тепловых блоках, содержащих ампулы реперных точек, задают температурный ход нагревания или охлаждения ампулы таким, чтобы перегрев или недогрев её был незначительным по отношению к температуре фазового перехода. Этим обеспечивается медленный (с малой скоростью v) подход к площадке плавления (затвердевания). Однако при наступлении фазового перехода температура ампулы стабилизируется, а температура, например, печи продолжает изменяться. При этом возникающая разность значений температуры печи и ампулы возрастает, а, следовательно, увеличивается и тепловой поток Q между ними.

Площадка на кривой плавления или затвердевания будет длиться до тех пор, пока количество теплоты, подводимое этим тепловым потоком, не

превысит теплоту H плавления вещества в ампуле, то есть пока выполняется условие

$$Q\Delta\tau \leq H. \quad (2)$$

Отсюда следует, что если при наступлении фазового перехода исключить тепловой поток Q , то стабилизация температуры в реперной точке плавления или затвердевания может продолжаться неограниченное время. С другой стороны это обстоятельство показывает, что имеется принципиальная возможность использования в качестве реперных точек ампулы со сколь угодно малой массой навески.

Благодаря этому, появляется возможность создания миниатюрных ампул с химически активными веществами. В частности, в настоящее время авторами ведётся разработка и исследование реперной точки плавления (затвердевания) натрия, имеющего массу навески около 1 г и температуру фазового перехода около 98 °С. Уже достигнута воспроизводимость площадок плавления и затвердевания в пределах ± 3 мК и их длительность около 3 часов. Эти показатели уже близки уровню эталонов температуры 1-ого разряда.

Планируются аналогичные исследования реперных точек на основе других активных щелочных металлов: лития (180 °С), калия (63 °С) и рубидия (39 °С). Эти реперные точки вместе с уже существующими точками МТШ-90 галлия (30 °С) и индия (156 °С) перекрывают наиболее востребованный на практике диапазон температур от 0 до 180 °С. К этому диапазону относится, в частности, температура теплоносителя в водяных системах теплоснабжения, от точности измерений которой зависит достоверность учёта тепла теплоизмерительными приборами и системами [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990. – Metrologia. – 1990. – № 27. – С. 70–75.
2. Куинн, Т. Температура. – М.: Мир, 1985. – 448 с.
3. Шевелёв, Ю.В., Черепанов, В.Я. Реализация реперных точек температурной шкалы в малогабаритных ампулах. – Измерительная техника. – 2004. – № 2. – С. 39–42.
4. Бродников, А.Ф., Черепанов, В.Я. Анализ возможностей создания новых реперных и постоянных точек температурной шкалы. – Приборы. – 2007. – № 8. – С. 15–19.
5. Szmyrka-Grzebiak, A., Lipinski, L. Криогенные эталоны в Польше. – Приборы. – 2007. – № 7. – С. 16–19.
6. Бродников, А.Ф., Черепанов, В.Я. Результаты исследования натрия в качестве новой реперной точки температурной шкалы // Сб. материалов международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь – 2008». Т.4. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 118–121.
7. Черепанов, В.Я. Вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах учёта количества теплоты. – Приборы. – 2002. – № 6. – С. 63–66.

УДК 006:528

Б.С. Могильницкий

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО КАК АНАЛИЗАТОР ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

B.S. Mogilnitsky

Siberian Scientific-Research Institute of Metrology (SSRIM)

4 Dimitrova str., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

FABRY-PEROT INTERFEROMETER AS THE ANALYSER PULSE ILLUMINATION

In the paper, FPI characteristics (frequency and time) in a mode of pulse illumination is analyzed. Transmission processes of light impulses of different duration through FPI as an optical filter are analysed in detail, the correlation between FPI base and pulse length is revealed. The time structure of the form the last pulse shape depending on its duration is analyzed. It is the defining factor for the use of FPI as a spectral instrument and optical time filter.

Впечатляющие достижения в области формирования пико- и фемтосекундных импульсов света возбудили интерес научного и практического использования импульсного излучения в целом ряде проблемных задач, включая атмосферную оптику, спектроскопию высокого разрешения, оптическую связь, лазерную технологию материалов и т. д. В связи с этим обстоятельством появились новые возможности использования ИФП как оптического инструмента для анализа сред при импульсном освещении. Получение информации с помощью ИФП возможно не только в спектральном но и, главное, во временном представлении. Это весьма существенное обстоятельство, поскольку широкий круг приложений использования импульсного излучения таких как линейная и нелинейная спектроскопия, исследование процессов релаксаций энергии в физике, химии, биологии, взаимодействие излучения с веществом, лазерной технологии материалов, оптической связи, метрологии и т. д. нуждается в эффективном инструменте анализа каким, по нашему мнению, может быть ИФП.

Взаимодействие ИФП с непрерывной радиацией исследовано достаточно подробно с разных точек его приложения. Взаимодействие ИФП с импульсным излучением рассмотрено в нескольких работах, число которых, в последнее время растет [1–6]. Это связано с появлением лазерных импульсов сверхкороткой длительности. Оперативно проведены первые исследования особенностей их распространения в атмосфере [7]. Побудительным мотивом работы явился уже достигнутый к настоящему времени высокий уровень

техники временного разрешения сверхкоротких временных процессов и этот уровень имеет перспективу роста [8].

Взаимодействие ИФП с импульсным излучением характеризуется некоторым временем задержки импульса t_3 внутри интерферометра. Время задержки – время кругового обхода резонатора ИФП $t_3 = 2d\cos\theta/c = t_0\cos\theta$, где $t_0 = 2d/c$ – время задержки для нормальных лучей, d – расстояние между зеркалами, θ – угол падения луча, c – скорость света.

Время спектрального разрешения ИФП $t_{r\theta}$, необходимое для производства интерференционной картины когерентными лучами между зеркалами интерферометра, определим как $t_{r\theta} = Mt_0\cos\theta = t_r\cos\theta$ [1], где M – число интерферирующих лучей, когда уже незаметен вклад M -го луча в полную интенсивность интерференции.

Формирование аппаратной функции ИФП (функции Эйри) при импульсном освещении определяется экспоненциально убывающим вкладом последующих отраженных лучей по сравнению с первыми. M -й отраженный луч вносит ничтожный вклад в формирование интерференции.

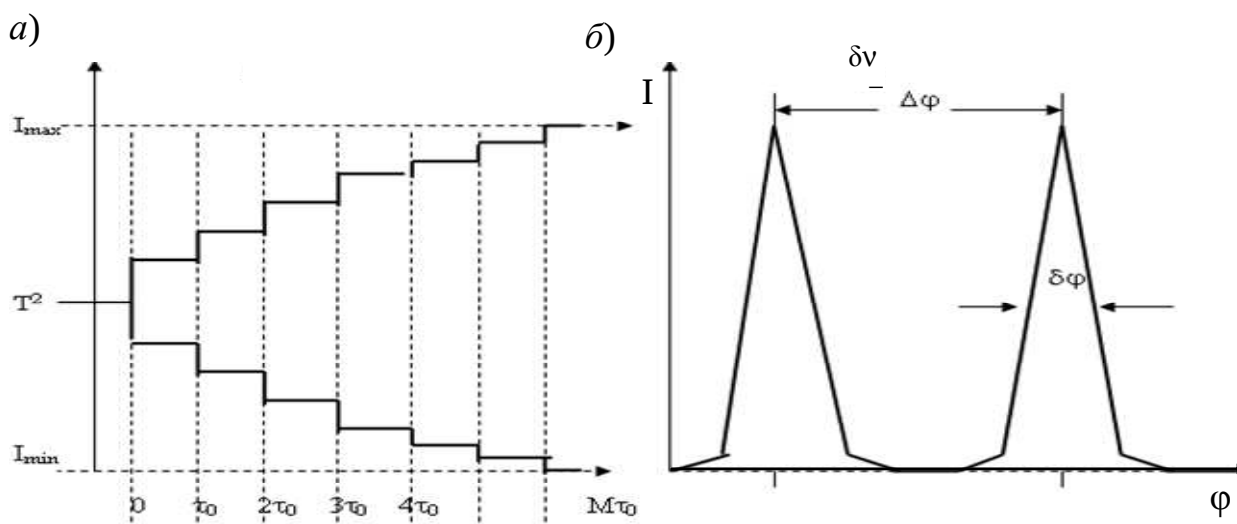


Рис. 1. а) Временной характер формирования аппаратной функции ИФП при импульсном освещении. Шаг ступенек отражает вклад M -го луча: верхняя ступенька – падающий луч, нижняя – отраженный; б) для сравнения: аппаратная функция ИФП при непрерывном освещении

По порядку величины значение M сопоставимо ($M \cong 2N$), а при высокой отражательной способности зеркал ИФП сравнимо ($M \cong N$) с остротой интерферометра $N = \Delta\phi/\delta\phi$, где $\Delta\phi$ – область дисперсии (расстояние между максимумами интерференционной картины), $\delta\phi$ – полуширина аппаратной функции. Острота интерферометра N (фактор резкости) определяется через эффективное число интерферирующих лучей – число одинаковых по амплитуде

лучей, обеспечивающих такое же разрешение, как и бесконечное число лучей с убывающей амплитудой – как

$$N = \pi \sqrt{R} / (1 - R), \quad (1)$$

а спектральное разрешение ИФП соответственно

$$\mathfrak{R} = qN = vt_r \cos \theta, \quad (2)$$

где $q = 2d \cos \theta / \lambda$ – порядок интерференции, v – частота света, R – коэффициент отражения зеркал.

Полуширина аппаратной функции определяется коэффициентами отражения зеркал интерферометра $\delta\varphi = 2(1 - R)/\sqrt{R}$, а область дисперсии в представлении набег фаз между интерферирующими лучами как $\Delta\varphi = 2\pi$ [1]. С другой стороны, полуширина аппаратной функции ИФП может быть выражена в длинах волн как $\delta\lambda = (\lambda/Nq)$, а область дисперсии (постоянная интерферометра, масштабный коэффициент) как $\Delta\lambda = \lambda^2/2d \cos \theta = \lambda/q$. Она равна расстоянию между первым и последним интерферирующими волновыми фронтами. В терминах частоты область дисперсии ИФП определяется как $\Delta\nu = c/2d$, а полуширина аппаратной функции как $\delta\nu = \nu/(Nq)$. В долях порядка спектра область дисперсии есть $\Delta k = 1$, а полуширина аппаратной функции $\delta k = 1/N$. Таким образом, основные параметры ИФП: острота и разрешение интерферометра могут быть определены в разных представлениях: в фазовом, в частотном, в представлении порядка спектра и длин волн падающего света.

Спектральное разрешение ИФП связано с порядком интерференции q и падает с уменьшением базы интерферометра. Так, для метрового ИФП с остротой $N = 100$, освещаемого светом с длиной волны $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м, порядок интерференции составляет величину $q \cong 3 \cdot 10^6$ и разрешение, соответственно, $\mathfrak{R} = 3 \cdot 10^8$, а для интерферометра с базой $d = 10^{-6}$ м, разрешение $\mathfrak{R} = 300$.

С другой стороны $\mathfrak{R}$ пропорционально частоте падающего света и времени спектрального разрешения t_{θ} – времени осуществления процесса интерференции. Для получения высокого спектрального разрешения необходим определенный промежуток времени, определяемый базой интерферометра и числом интерферирующих лучей. Чем выше спектральное разрешение, тем больший промежуток времени необходим для формирования интерференции в ИФП.

Пропускание ИФП равно квадрату модуля аппаратной функции $A = \sum_{n=0}^{\infty} T R^n e^{in\Phi} = T/(1 - R e^{i\delta})$ многолучевого интерферометра [1]

$$I = A^2 = J/[1 + F \sin^2(\delta/2)], \quad (3)$$

где $J = [T/(1 - R)]^2$ и $F = 4R/(1 - R)^2$, а δ – разность фаз между последовательными лучами.

Таким образом, основные характеристики ИФП при импульсном освещении не изменяются по сравнению с характеристиками ИФП, освещаемого непрерывным светом, за исключением процесса формирования аппаратной функции и некоторого интервала времени для создания интерференции в ИФП.

Для анализа работы ИФП в импульсном режиме вводится понятие длительности импульса $\tau_{\text{и}}$ падающего света, времени задержки светового импульса t_z и времени спектрального разрешения t_r . Соотношение этих времен описывает все возможные варианты работы ИФП как в режиме спектрометра, так и в режиме оптического фильтра.

1. При освещении ИФП монохроматическим когерентным непрерывным ($\tau = \infty$) светом параллельных M лучей, вследствие процесса многолучевой интерференции в ИФП, на выходе его наблюдается интерференционная картина в виде светлых и темных колец (полосы равного наклона). Условие появления светлого кольца (максимума интерференции) $q\lambda = 2d$, а темного (минимума интерференции) – $(q + 1/2)\lambda = 2d$. Наблюдение интерференционной картины в этом случае возможно при изменении длины (сканировании) базы ИФП.

2. При освещении ИФП импульсом «большой» длительности $\tau_{\text{и}} > t = Mt_0$ происходит возрастание интенсивности I_M прошедшего света, сформированной M первыми последовательными лучами, в соответствии с [1]

$$I_M = \left| \sum_{n=0}^{m-1} T R^n \lambda^{\text{in } \Phi} \right|^2 = J_M \cdot \{ [1 + F_M \sin^2(M\delta/2)] / [1 + F_M \sin^2(\delta/2)] \}, \quad (4)$$

где $J_M = [T(1 - R^M) / (1 - R)]^2 < J$, $F_M = 4R^M / (1 - R^M)^2 < F$.

Параметры аппаратной функции (высота максимума и его ширина) будут изменяться в сторону ухудшения с уменьшением длительности «большого» импульса (уменьшение M) вплоть до исчезновения интерференции ($M = 1$).

3. При освещении ИФП «коротким» импульсом, длительность которого меньше времени двойного обхода резонатора ИФП $\tau_{\text{и}} < t_0$, прошедший через ИФП свет состоит из серии импульсов уменьшающейся амплитуды, разделенных временем t_0 . Поскольку они не перекрываются, то интерференция отсутствует и ИФП теряет статус оптического фильтра.

В режиме фильтра (луч коллимирован и нормален поверхности зеркал: $\cos\theta = 1$, ($\theta = 0$) где θ – угол между направлением луча и нормалью к поверхности зеркал) время задержки определяется как $t_0 = 2d/c$ а время установления спектрального разрешения как $t_r \cong Nt_0$.

Удобно характеризовать работу ИФП как временного фильтра параметром $T = Nt_0$ – временем установления стационарной интерференционной картины, определяющей инерционность процесса измерений [5]. Этот параметр можно интерпретировать в качестве критерия временного разрешения ИФП. С другой стороны, этот параметр равен и времени установления спектрального разрешения $T = t_r$.

Таким образом, временное разрешение ИФП, связано с остротой и базой интерферометра, но в противоположном смысле спектральному – чем меньше база и острота ИФП, тем более короткий импульс он пропустит без искажения его формы, а ИФП будет иметь более высокое временное разрешение. Наличие интерференции является необходимым условием работы фильтра, что требует

выполнения условия $\tau_{\text{и}} \geq t_0$ (импульс должен «накрыть» время формирования интерференции в ИФП).

Если ввести понятие эффективной длины $L_{\text{эфф}}$ [5], то можно оценить предельное значение длительности импульса света, которую можно разрешить с помощью ИФП. Для реализации условий интерференции необходимы определенные требования на длину резонатора ИФП. Поскольку $L_{\text{эфф}} = (Nt_0) \cdot c = 2Nd$, то при $L_{\text{эфф}}$, равной длине волны генерации $\lambda = 1$ мкм база ИФП должна быть не более четверти длины волны света т. е. $d = 0.25 \cdot 10^{-6}$ м. Через такой ИФП как оптический фильтр пройдет импульс длительностью $\delta\tau \approx 10$ фс.

Более строгая оценка предела временного разрешения длительности прошедшего импульса представлена в [9]. Полуширина длительности прошедшего импульса без искажения его формы является функцией длины резонатора (базы ИФП) и остроты интерферометра N

$$\tau_{\text{min}} = 4 \ln 2 (nL_{\text{эфф}} / c), \quad (5)$$

где n – показатель преломления среды.

В соответствии с (5) неискаженный световой импульс длительностью в 10 фс может пройти через ИФП (при $N = 100$) с базой не более $5 \cdot 10^{-9}$ м (5 нанометров). При остроте $N = 10$ база увеличится на порядок $d = 5 \cdot 10^{-8}$ м, а при $N = 1$ возрастет до размеров половины длины волны падающего света. Такая острота, как известно, соответствует двухлучевому интерферометру. Поэтому двухлучевая интерферометрия более эффективна для временного разрешения, поскольку время формирования интерференции в этом случае минимально $t_r = t_0$ т.е. равно времени двойного обхода резонатора импульсом света. Другими словами, двухлучевой интерферометр «работает быстрее» но с худшим качеством спектрального разрешения.

В реальном ИФП в силу технических причин (толщина отражающих слоев каждого из зеркал ИФП $\sim 0.25 \cdot 10^{-6}$ м) минимальная база интерферометра не может быть меньше 10^{-6} м. Поэтому для реального интерферометра Фабри-Перо наименьшая длительность импульса, прошедшего через ИФП в режиме фильтра с остротой $N = 100$, соответствует пикосекундному диапазону длительностей. На одиночные импульсы фемтосекундной длительности ИФП, как оптический фильтр, не отреагирует поскольку в этом случае интерференция не реализуется из-за условия $\tau_{\text{и}} \leq t_0$. Такие импульсы пройдут без временных изменений в режиме ослабления оптической средой – зеркалами ИФП.

Здесь отметим, что оптимальные условия работы ИФП достигаются при равенстве длительности входного импульса $\tau_{\text{и}}$ времени разрешения интерферометра T ($\tau_{\text{и}} = T$), отражающее компромисс между спектральным и временным разрешением: еще нет существенных временных искажений динамики импульса, и спектр импульса еще полностью разрешается.

Таким образом, в соответствии с фундаментальным соотношением неопределенности Гейзенберга $\delta\nu\delta\tau \geq 2\pi$, мы имеем свободу выбора: либо высокое спектральное разрешение для «больших» импульсов, либо высокое

временное разрешение сверхкоротких импульсов при «низком» спектральном разрешении.

Отсюда следует, что для установления «качественного» спектрального разрешения ИФП необходим определенный промежуток времени, а для «качественного» временного разрешения необходима определенная база ИФП. В этом проявляется фундаментальная взаимосвязь времени и пространства.

Таким образом, ИФП может быть с успехом использован в качестве инструмента анализа как спектральных, так и временных характеристик динамических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chandrasekhar Rouchoudhuri. Response of Fabry-Perot interferometers to light pulses of veri short duration// J.Opt. Soc. Am. – 1975. – V. 65, – № 12, – P. 1418.
2. John O. Stoner, Jr. Calculation of Interferometer Characteristics by a Method of Optical Transients// J.Opt. Soc. Am. – 1966. – V56, – №3, – P. 370–376.
3. Cesini G et al. Response of Fabry-Pero interferometers to amplitude-modulated light beams// Optica Acta. – 1977. – V.24, – № 12, – P. 1217–1236.
4. Померанский А.А. Метрологическое обеспечение измерений оптико-физических параметров излучения ОКГ//Тр. ВНИИФТРИ. – 1976. – С. 76.
5. Беспалов В.Г. и др. Спектрально-временной анализ импульсных оптических сигналов интерферометром Фабри-Перо // Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т.90, – № 4. – С. 690.
6. Бакланов Е.В., Дмитриев А.К. Абсолютное измерение длины с помощью фемтосекунд-ного лазера. // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, – № 10.
7. Киселев Ф.М., Пономарев Ю.Н., Степанов А.Н., Тихомиров А.Б., Тихомиров Б.Ф. Поглощение фемтосекундного излучения Ti:Sa-лазера атмосферным воздухом и водяным паром. //Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, – № 8, – С.678–683.
8. Щелев М.Я. Пико-,фемтосекундная электронно-оптическая фотография в квантовой электронике// Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, – № 6, – С. 477–482.
9. Charles A. Eldering et al.. Etalon time response limitation as calculated from frequency analysis// Opt.Eng. – 1993. – V. 22, – №3, – P. 464.

© Б.С. Могильницкий, 2009

УДК 006:528

Б.С. Могильницкий

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

B.S. Mogilnitsky

Siberian Scientific-Research Institute of Metrology (SSRIM)

4 Dimitrova str., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

MODERN LASER METHODS FOR METROLOGICAL APPLICATIONS

The author the discuss the possibility to use mode locking in pulsed laser for precision measurement of lengths.

Фемтосекундные, пикосекундные и наносекундные лазеры являются источниками сверхкоротких световых импульсов. На их основе, в настоящее время, бурно развиваются новые прецизионные технологии измерений во многих областях науки и техники. Уникальные свойства лазерного излучения, возникающего в режиме синхронизации мод, используются для высокоточных оптических измерений частот, длин волн, перемещений, деформаций, физических величин сред и др. с метрологической точностью. Поэтому особенно привлекательным является использование новых технологий в метрологии в области создания новых средств измерений.

Длина является одной из важнейшей в практическом отношении физической величиной. В 1983 г. утверждено новое определение метра: метр-длина, равная расстоянию, проходимому электромагнитным излучением за время, равное $1/c$ (c – скорость света в вакууме). В качестве эталонных источников регламентированы пять стабилизированных газоразрядных лазеров с установленными частотами и длинами волн излучения [1]. Погрешность воспроизведения длины метра оценена величиной $\sim 10^{-9}$. Длина перестала быть самостоятельной физической величиной: она выражается теперь через частоту ν и скорость света c как $L = c/\nu$. Дальнейшее улучшение метрологических характеристик таких устройств связано с огромными трудностями т.к. этот уровень является, по существу, предельным. Таким образом, к концу 90-х годов прошлого века был исчерпан ресурс повышения уровня точности определения длин.

Революционным моментом можно считать использование для этих целей лазеров, работающих на других принципах – формирующих излучение в виде последовательности сверхкоротких импульсов. Это лазеры с синхронизацией мод (ЛСМ). С помощью ЛСМ удастся более просто решить как проблему определения абсолютных значений длин волн электромагнитного излучения в

видимой области спектра, так и с большей точностью измерить и воспроизвести абсолютную длину исключив радиооптический мост.

Одним из первых шагов в этом направлении является создание прецизионного измерителя длин (ПИД). В качестве средства, прецизионной точности для измерения эталонных длин предлагается устройство, состоящее из интерферометра Фабри-Перо (ИФП) и импульсного лазера.

Эффект синхронизации мод (ЭСМ) в лазерах осуществляется либо самопроизвольно, либо путем принудительного воздействия на фазы оптических мод с целью поддержания определенных соотношений между ними. Лазерное излучение во времени имеет вид периодической последовательности импульсов с периодом, равным времени обхода резонатора $T = 2l/c$, где l – длина резонатора лазера, c – скорость света. В оптическом импульсе лазерного излучения содержится спектр эквидистантных оптических частот, соответствующих спектру резонатора лазера с характерным масштабом $c/2l$. Частоты биений оптических мод, формируемые на фотодетекторе, дают, в свою очередь, спектр радиочастот $cK/2l$, где $K = 1, \dots, N$. Используя разностную частоту биений равную радиочастоте эталона (водородный генератор), можно произвести привязку длины резонатора лазера к эталону и тем самым создать высокостабильный излучатель эквидистантной регулярной последовательности оптических импульсов [2].

Пропуская импульсное излучение лазера через интерферометр Фабри-Перо, осуществляем привязку длины L его резонатора к стабильному лазерному излучению [3]. Поскольку ИФП является оптическим фильтром, то прохождение мгновенного света через него осуществляется при выполнении условий интерференции, которые можно записать в виде $(2L/c)(\omega_0 - \omega_i) = K\pi$ [4], где ω_0 – центральная частота спектральной компоненты (моды) лазерного излучения, ω_i – резонансная частота ИФП. Интенсивность света, прошедшего через интерферометр будет максимальна при резонансной настройке ($\omega_0 = \omega_i$) и уменьшится при изменении длины резонатора ИФП. В этом случае сигнал управления возвращает длину резонатора интерферометра в первоначальное состояние т. е. происходит процесс стабилизации длины резонатора ИФП. Таким образом, комбинация лазер + интерферометр представляет собой прецизионное устройство для измерения длин в широком диапазоне от дольных значений до сотен метров.

В настоящее время точное измерение длин производится с помощью лазерных интерферометров перемещения (ИПЛ). Относительная погрешность измерения длин составляет $\sim 10^{-6}$. Измерение абсолютной длины с помощью ИПЛ осуществляется посредством сравнения длины образца с длиной волны излучения стабилизированного лазера. В предполагаемом методе измерение абсолютной длины осуществляется посредством сравнения со стабильной длиной интерферометра, что при всех равных условиях уменьшает абсолютную погрешность измерения длины в M раз, где $M = L/\lambda$, λ – длина волны лазера, L – длина интерферометра. В свою очередь погрешность измерений длины интерферометра определяется погрешностью измерения частоты межмодового

интервала соседних мод лазера. Можно понизить эту погрешность измеряя частоту биений «далеких» мод $\Delta\omega = N\Delta\omega$, где $N = 10^3\text{--}10^5$. При одинаковой абсолютной погрешности частотных измерений, погрешность измерений абсолютной длины интерферометра уменьшится в N раз. Таким образом, погрешность измерения абсолютных длин, способом, изложенным в предлагаемом методе, может быть понижена до уровня, позволяющего придать предлагаемому устройству статус эталона длины.

Прохождение световых импульсов разной длительности через ИФП исследовано с разных точек зрения в ряде работ [5–8]. Последняя по времени [5] и привлекла внимание метрологов к проблеме использования ЛСМ для создания эталона длины на новых принципах. Процессы привязки ИФП и нестабильность его базы детально исследованы для случая прохождения через ИФП одночастотного непрерывного лазерного излучения (очень узкого частотного спектра). При прохождении же импульсного излучения (широкий частотный спектр) могут появиться сложности с системой автоматического контроля, поскольку привязка осуществляется по максимуму функции пропускания ИФП. Аппаратная функция при импульсном освещении впервые изящно представлена в [8]. Значительно позже ($\sim$ через 20 лет) более детальное рассмотрение дано в работах [9, 10], где в явном виде определена временная форма прошедшего через ИФП импульса. Основной вывод следующий: для того, чтобы интерферометр ФП представлял собой оптический фильтр, что необходимо для процесса его привязки к стабильному лазерному излучению, его база должна соответствовать определенным требованиям, а именно – быть такой, чтобы время θ двойного прохождения базы ИФП импульсом света было меньше длительности падающего импульса τ т. е. $\theta < \tau$, где $\theta = 2L/c$. Это условие налагает жесткие требования на базу эталона: так, при фемтосекундной длительности входящих импульсов, интервал между зеркалами ФП $\sim (0.15\text{--}15)$ мкм, пикосекундной $\sim 1.5(10^2\text{--}10^4)$ мкм или $(0.015\text{--}1.5)$ см, наносекундной $\sim 1.5(10^5\text{--}10^7)$ мкм или $(15\text{--}1500)$ см соответственно.

Здесь необходимо отметить, что в случае стабильной последовательности импульсов ситуация с условиями на базу ИФП более благоприятная, что отмечено в [5]. Дело в том, что частотный спектр поступающего в ИФП лазерного излучения дискретный (частотная решетка) т. е. «искусственный», созданный лазером. Каждая, из составляющих его, спектральная компонента много уже полосы пропускания (аппаратной функции) ИФП, что означает выполнения условия $\theta < \tau$, т. е. временная длительность каждой компоненты больше времени задержки θ , которое испытывает импульс света при прохождении ИФП. Эту ситуацию можно представить в виде набора локальных ИФП, освещаемых «длинными» импульсами ($\tau \gg \theta$). Поэтому ИФП становится прозрачным для сверхкоротких лазерных импульсов. При резонансной настройке ИФП на частоту лазера максимальная интерференция будет при совпадении частотных решеток $\eta = n/N = 1$, что означает равенство длин резонаторов, где n – число мод лазера, а N – число мод ИФП. При $\eta \neq 1$ «сила» интерференции будет уменьшаться и длительность прошедшего через ИФП импульса по сравнению с входным будет расти.

При оценке погрешности эталона длины мы предполагаем, что при каждом последующем шаге технической реализации проекта, уровень точности понижается на порядок. В итоге погрешность базы эталона метра составит величину 10^{-10} . Это означает неопределенность расстояния между зеркалами ИФП в ~ 0.1 нм. Для реализации такой точности длины необходимо использовать современные технологии изготовления зеркал ИФП. Здесь отметим, что лазерное излучение позволяет значительно снизить требования к отражающим свойствам зеркал ИФП. Так в [11], предельная неопределенность положения плоскости отражения света для стандартных размеров луча He-Ne лазера (диаметр ~ 1 мм) оценивается величиной $10^{-13} - 10^{-15}$ м, что на несколько порядков повышает резерв улучшения определения длин с помощью лазерной интерферометрии. Возможная схема реализации эталона длины, включающая все ранее апробированные технические решения может быть следующая:

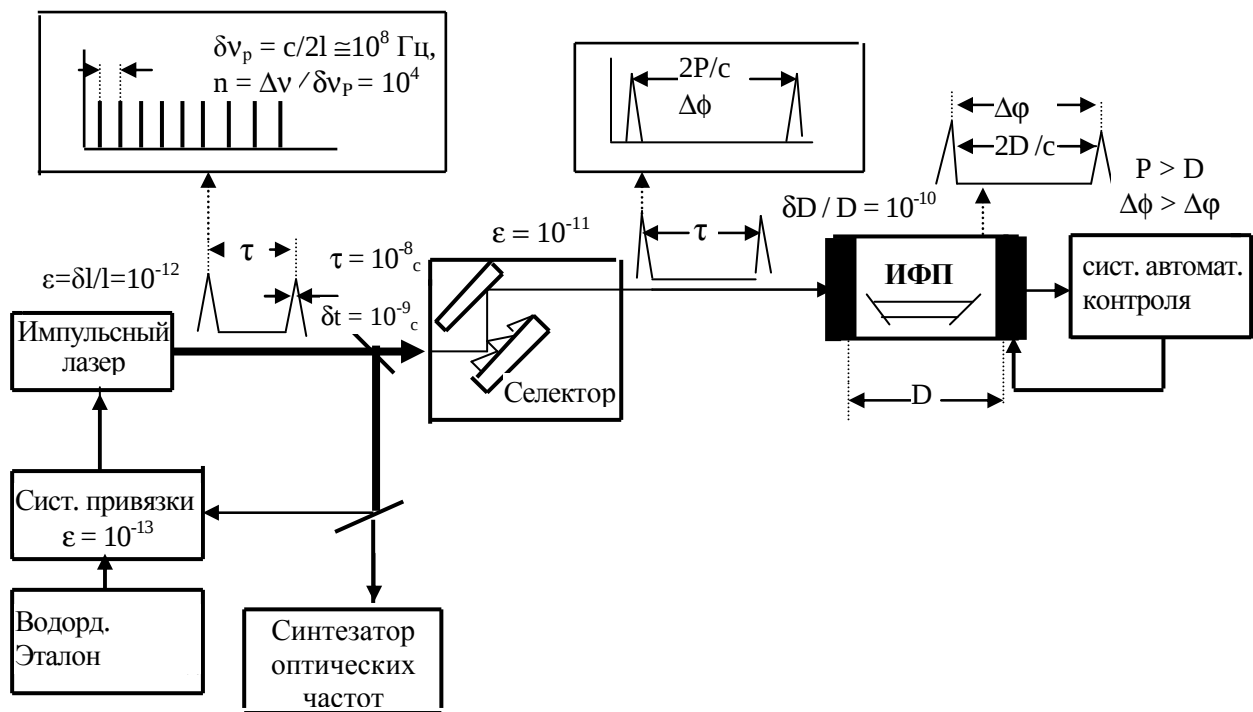


Рис. 1. Прецизионное средство измерения длин (ПИД): $\Delta\nu_p$ – межмодовый интервал резонатора лазера, n – число мод, $\Delta\nu$ – ширина линии генерации, $2L/C = \tau$ – период следования импульсов, $2P/C = \Delta\phi$ – область дисперсии решетки, $2D/C = \Delta\phi$ – область дисперсии ИФП, $\delta\tau$ – длительность импульса, ϵ – уровень нестабильности

В этой схеме осуществляется переход (после момента привязки резонатора лазера к водородному стандарту) от режима импульсного излучения к непрерывному посредством решетки. Лазерное излучение претерпевает драматические изменения от широкополосного к монохроматическому и стабилизация длины ИФП происходит в штатном

режиме. Возможна схема без дифракционной решетки, что подтверждено экспериментальными исследованиями.

Таким образом, мы переносим с определенной степенью погрешности радиочастоту эталона в оптический диапазон, минуя, необходимый для этого, радиочастотный мост. Это дает возможность измерения абсолютного значения длины.

Для определения эталонного размера длины (1метр) используем вспомогательный перестраиваемый в видимой области полупроводниковый или газовый лазер. Перестраивая частоту его излучения на масштабный частотный интервал ИФП ($c/2L$), определим частотный интервал перестройки вспомогательного лазера по последовательным максимумам пропускания через стабильный эталон ФП. Измеренный с высокой точностью этот интервал $\delta\nu$, как разность частот биений разностной частоты между частотой излучения оптического стандарта и частотами последовательных максимумов пропускания излучения вспомогательного лазера, даст с помощью соотношения $L = c/\delta\nu$ эталонную длину базы ИФП.

Поскольку основным достоинством нового определения метра является отсутствие зависимости от конкретного источника, то современная лазерная технология на основе импульсного излучения сверхкороткой длительности становится последующим шагом в направлении улучшения метрологических характеристик эталона длины. Кроме этого, погрешность воспроизведения и измерения абсолютных длин волн излучения достигнет эталонного (радиотехнического) уровня не для отдельных значений, а практически во всем видимом диапазоне спектра. Теперь можно ставить задачу передачи значения единицы частоты в более короткий УФ и рентгеновские диапазоны, что открывает новые перспективы по повышению точности измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Привалов В.Е. Квантовая электроника и новое определение метра.- Л: «Знание» – 1987.
2. Багаев С.Н., Пивцов В.С., Клементьев В.М. и др. Стабилизация частоты следования фемтосекундных импульсов // Квантовая электроника. – 1997. – т. 24, – № 4. – С. 327.
3. Бикмухаметов К.А., Бобрик В.И. Стабилизация длины ИФП по излучению газового ОКГ // Измерительная техника. – 1976. – № 10, – С. 3.
4. Mogilnitsky B.S., Tolstikov A.S., Cherepanov V.Y. Precision Length Measurement Using Picosecond Pulsed Laser. Siberian Russian Workshops and Tutorials, EDM 2003, Proceedings 4th Annual, Erlagol – 2003. – P. 263.
5. Бакланов Е.В., Дмитриев А.К. Абсолютное измерение длины с помощью фемтосекундного лазера // Квантовая электроника – 2002. – Т. 32. – № 10. – С. 925.
6. Roychoudhuri C. Response of Fabry-Perot Interferometers to Light Pulses of Very Short Duration. // J.Opt.Soc.Am. – 1975. – V. 65, – № 12, – P. 1.

7. Беспалов В.Г., Ефимов Ю.Н., Стаселько Д.И. Спектрально-временной анализ переходных процессов в ИФП// Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т. 90, – № 4, – С. 690.
8. Померанский А.А. Аппаратная функция интерферометра Фабри-Перо при импульсном освещении // Сб.научных трудов ВНИИФТРИ, М. – 1976. – С. 67.
9. Wu Z.,Chen J.,Xia G.Computer Model of Time Response of FP Etalon Filters to Short Optical Pulses.// J.Opt.Comm. – 1997 – V. 18, – № 1, – P. 19.
10. Guangqiong Xia, Baichuan Li, Lin Liu, Zhengmao Wu, Jianguo Chen. Time Delay of Fabry-Perot Filters to Short Optical Pulses.// J. Opt.Comm. – 2001. – V. 2, – № 3, – P. 8.
11. Захаров В.П. Тычинский В.П. и др. О предельной чувствительности и точностных характеристиках лазерного микроинтерферометра.// Измерительная техника. – 1976. – № 10. – С. 33.

© Б.С. Могильницкий, 2009

УДК 535.41

М.Ф. Носков, М.М. Кузнецов

СГГА, Новосибирск

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ЭКСТРЕМУМОВ ПОЛОС ПУТЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ФОТОРЕГИСТРАЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ

M.F. Noskov, M.M. Kuznetsov

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

METHOD OF SELECTION OF EXTREMUMS OF BARS BY NONLINEAR FOTOREGISTRACII OF INTERFERENCE PICTURE

The article is devoted description of method of selection of extremums of bars by nonlinear fotoregistracil of interference picture.

Рассмотрим экспериментальное обоснование критериев для одного из методов повышения чувствительности измерений – метода выделения экстремумов полос путем нелинейной фоторегистрации интерференционной картины.

Измерения производились на неравноплечем лазерном интерферометре, оптическая схема которого представлена на рис. 1.

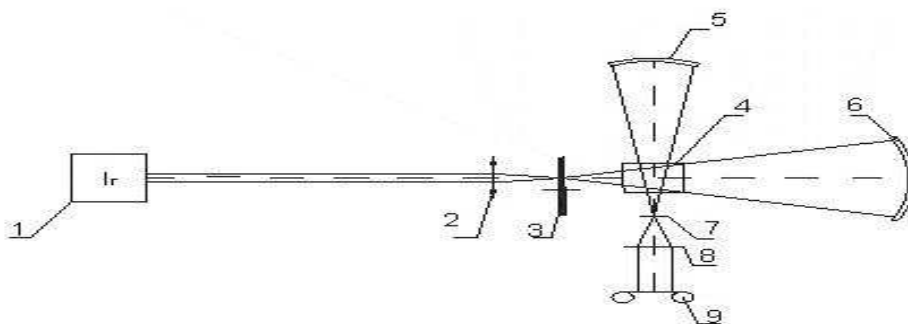


Рис. 1. Оптическая схема неравноплечевого лазерного интерферометра для контроля формы астрономических вогнутых зеркал: 1 – лазер, 2 – микро-объектив, 3 – диафрагма, 4 – светоделительная куб-призма, 5 – эталонное зеркало, 6 – контролируемое зеркало, 7 – диафрагма, 8 – объектив, 9 – фоторегистратор

Интерферограмма вогнутого медного зеркала, зарегистрированная в линейных условиях, представлена на рис. 2, а, а микроденситограмма интерферограммы вдоль одного из сечений перпендикулярно полосам представлена на рис. 2, б.

По микроденситограмме была определена чувствительность измерений S_a по критерию $S_a = dT/d\delta$. Эта величина оказалась равной 1,0, что соответствует

критерию чувствительности двухлучевой интерферометрии при линейной фоторегистрации.

При этом, если даже самое простое устройство для анализа интерферограмм позволяет измерять изменение коэффициента пропускания T с погрешностью не более 10 %, то погрешность определения координат интерференционных полос не превысит $\lambda/20$. Напомним, что человеческий глаз способен различать вариации освещенности около 5 %.

Интерферограмма и микроденситограмма того же самого медного зеркала, зарегистрированная на том же самом интерферометре в нелинейных условиях (фотопленка МИКРАТ-300, время экспозиции 1/30 секунды и величина экспозиции 10 люкс·сек. представлена на рис. 3, *а*, *б*.

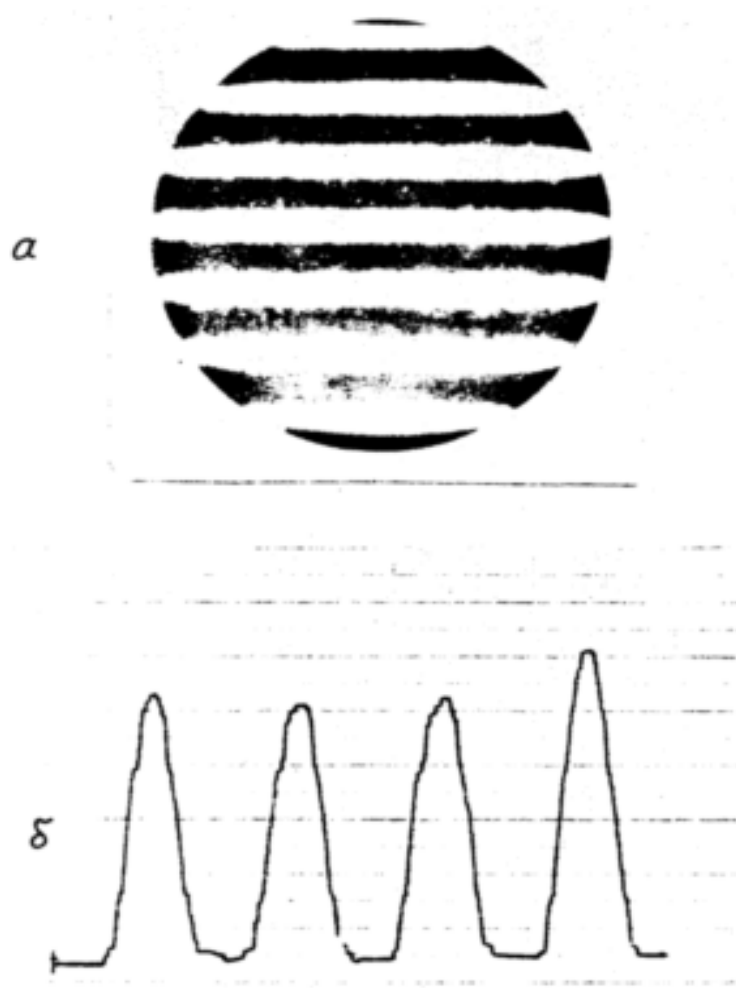


Рис. 2. Интерферограмма (*а*) и ее микроденситограмма (*б*) медного зеркала, зарегистрированная в линейных условиях при помощи неравноплечего интерферометра

Таким образом, при нелинейной регистрации интерферограмм погрешность измерения величины максимального уклонения поверхности от ближайшей сферы сравнения составила 5 %, погрешность измерения среднеквадратичного уклонения обрабатываемой поверхности от ближайшей сферы сравнения составила 3 %.

Сравнивая погрешности, полученные при нелинейной фоторегистрации интерференционных картин с аналогичными погрешностями при стандартной линейной регистрации, можно сделать вывод о том, что нелинейная фоторегистрация позволяет уменьшить погрешность измерения максимального отклонения формы поверхности от выбранной сферы сравнения с 30 % до 5 %, то есть – в 6 раз, а погрешность измерения среднеквадратичного отклонения формы поверхности от выбранной сферы сравнения с 8 % до 3 %, то есть – почти в 3 раза.

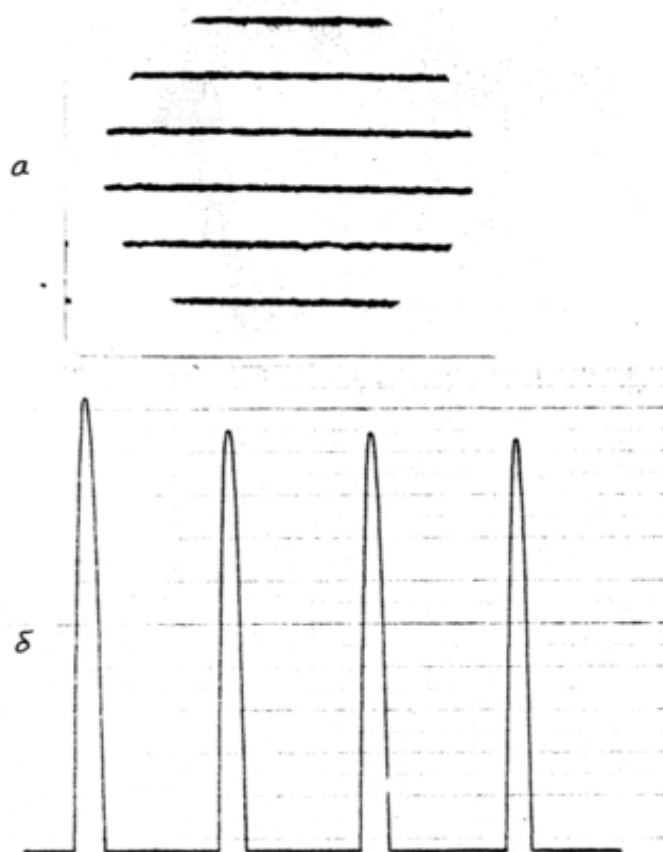


Рис. 3. Интерферограмма (а) и ее микроденситограмма (б) медного зеркала, зарегистрированные в нелинейных условиях при помощи неравноплечего интерферометра

Данный эксперимент позволяет утверждать о том, что при повышении чувствительности измерений погрешность измерений также уменьшается, но не пропорционально повышению чувствительности.

УДК 621.396.2

И.Е. Макаров

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ ЧАСОВ ПО НАВИГАЦИОННЫМ СИГНАЛАМ

I.E. Makarov

Siberian Scientific-Research Institute of Metrologie (SSRIM)

4 Dimitrova St., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

NEW RESULTS OF THE STUDY ALGORITHM TO SYNCHRONIZING SPACE-REMOVED CLOCKS ON NAVIGATIONAL SIGNAL

In persisting work further to earlier conducted studies is given development to theories to synchronizing space-removed keepers and is shown possibility of the estimation parameter to instability synchronized clocks.

Существует ряд задач научно-технического плана, требующих высокоточной согласованности моментов шкал пространственно-разнесённых хранителей времени (часов). Сюда могут быть отнесены задачи космической и наземной навигации, позиционирования, баллистики, геодезии и геофизики, связи, эфемеридной астрономии и геодинамики. Наиболее высокие точности синхронизации в настоящее время востребованы в спутниковых навигационных технологиях при определении расхождений шкал времени бортовых часов и для целей эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) спутниковых навигационных систем (СНС), при организации траекторных измерений по навигационным спутникам с сети беззапросных измерительных станций.

В связи с переходом наземного комплекса управления (НКУ) ГЛОНАСС на беззапросные технологии формирования ЭВО, создается сеть беззапросных измерительных станций (БИС), оснащенных прецизионными измерителями псевдодальностей и высокостабильными часами. Требования к синхронности хода часов пространственно разнесенных БИС особенно высокие.

В дальнейшем изложении речь будет идти именно о синхронизации БИС, обеспечивающих траекторные измерения по орбитальным группировкам космических аппаратов (КА) GPS и КА ГЛОНАСС для целей формирования ЭВО СНС ГЛОНАСС. Информация о расхождении частотно-временных параметров часов получается непосредственно из навигационных сигналов СНС.

Традиционно при синхронизации пространственно-разнесенных часов оцениваются только расхождения шкал времени этих часов. В настоящей работе предложены методы синхронизации, позволяющие одновременно оценивать расхождения моментов шкал времени опорных и синхронизируемых часов, а также

характеристики долговременной и кратковременной нестабильностей частоты генератора синхронизируемых часов. На основе уравнений для погрешностей синхронизации также исследуются возможности достижения наивысшей точности синхронизации пространственно-разнесенных часов.

Рассматриваемые методы и алгоритмы синхронизации опираются на использование уравнений траекторных измерений вида (1), связывающих измеренные псевдодальности $D(t)$ и уходы часов БИС $\Delta T_{\Pi}(t) = T_{\Pi}(t) - T_{\text{ЦС}}(t)$ от шкалы времени центрального синхронизатора (ЦС) системы $T_{\text{ЦС}}(t)$

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{\Pi}) + c \cdot \Delta T_{\Pi}(t) + \sum_{i=1}^{12} p_i(t) \quad (1)$$

Здесь $\rho(\mathbf{u}_C, \mathbf{u}_{\Pi})$ – геометрическая дальность от навигационного спутника с координатами $\mathbf{u}_C$ до БИС с координатами $\mathbf{u}_{\Pi}$;

$p_i(t), i=1, \dots, 12$ – факторы, влияющие на точность траекторных измерений, которые принимаются во внимание при оценивании погрешностей синхронизации.

Для описания ухода часов $\Delta T_{\Pi}(t)$ от номинального момента шкалы времени принята математическая модель нестабильности часов в виде дифференциального уравнения

$$\dot{\Delta T}_{\Pi}(t) = s(t) + w(t), \Delta T_{\Pi}(t_0) = \Delta T_{\Pi 0}, t \in [t_0, t_k], \quad (2)$$

связывающего уход часов БИС $\Delta T_{\Pi}(t)$ с характеристиками долговременной $s(t)$ и кратковременной $w(t)$ нестабильностей частоты генератора часов [1].

Сравнительный анализ различных математических моделей нестабильностей во временной и в частотной областях приведен в работе [2]

Проведенные обсуждения влияния факторов $\delta p_k(t)$ на точность синхронизации часов БИС позволяют определить условия, при которых погрешность одномоментной синхронизации часов в пунктах A и B с помощью алгоритма ДАСЗ будет наименьшей. Эта ситуация возможна в момент прохождения НС через траверсную плоскость между пунктами A и B . Наиболее желаемая в этом плане ситуация, когда указанная траверсная плоскость лежит в плоскости орбиты НС. А этом случае имеется возможность удлинять сеансы синхронизации и применять усреднение результатов приема навигационных сигналов по времени с целью снижения уровней случайных погрешностей в составе общей погрешности синхронизации.

Это положение иллюстрируется результатами модельных исследований алгоритма синхронизации ДАСЗ с помощью программного имитатора ModBis24.

На рис. 1 показана проекция траектории НС № 7, проходящая между пунктами синхронизации A в г. Новосибирск и B в г. Иркутск. Для синхронизации часов в пунктах A и B выбран отрезок траектории НС, когда спутник находится в положении близком к зенитному относительно этих пунктов.

На рис. 2 показан характер изменения отклонения момента шкалы времени часов в пункте *B* относительно шкалы эталона в пункте *A*.

В оценках параметра $\hat{a}_0(t)$, вычисляемых на интервале прохождения НС № 7 через траверсную плоскость на уровне 300-го отсчета на рис. 2 наблюдается оптимум. При этом погрешность оценивания среднего значения $a_0(t)$ составляет 2.5 см, что в единицах соответствует погрешности 0.1 нс.

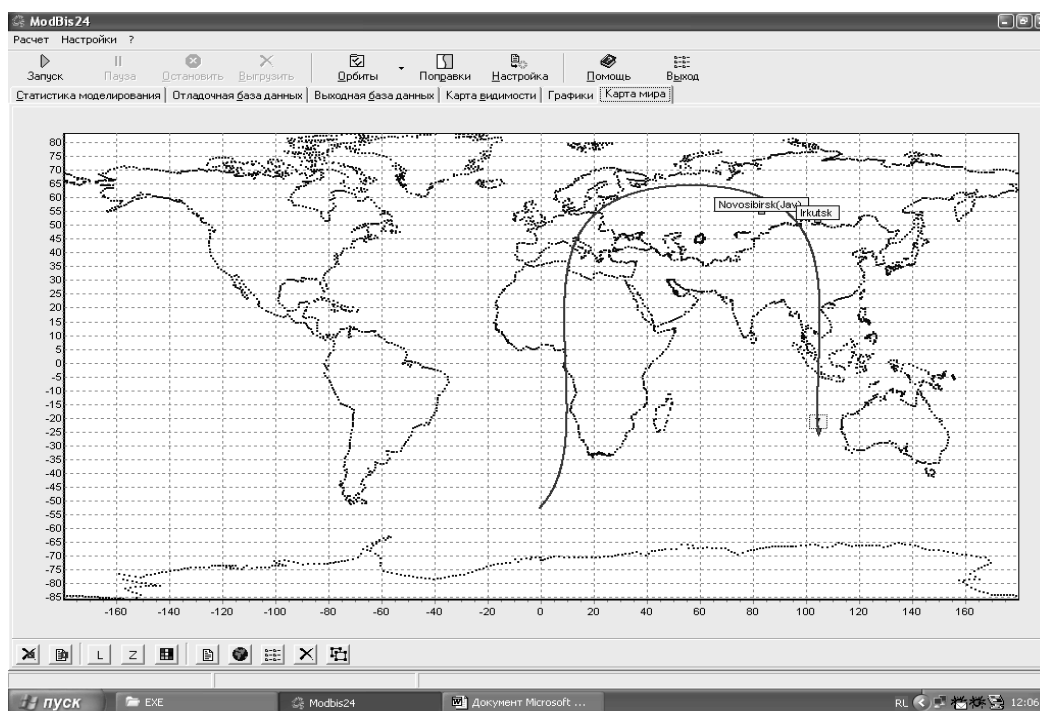


Рис. 1. Проекция траектории НС № 7 при синхронизации часов в пункте *A* (г. Новосибирск) и в пункте *B* (г. Иркутск)

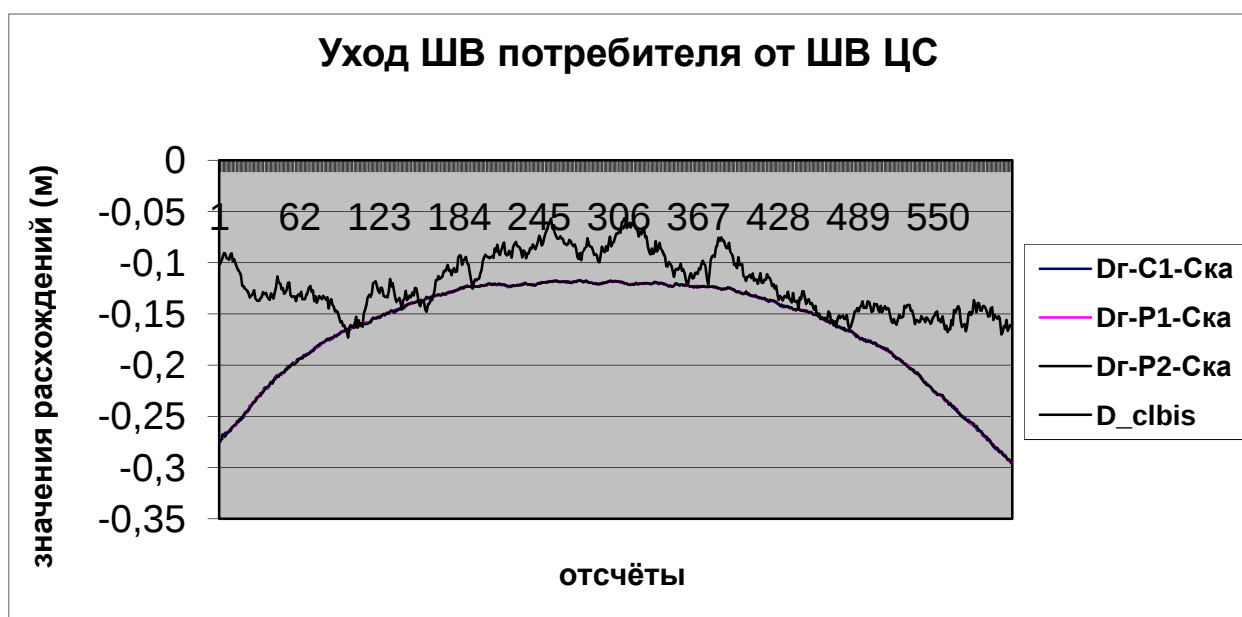


Рис. 2. Оценивание расхождения моментов шкал времени часов в пунктах *A* и *B* с помощью алгоритма ДАСЗ по данным кодовых измерений имитатора ModBis24

Схема оценивания вектора параметров неустойчивости $\mathbf{a}$ [1] для алгоритма ДАС6 описывается уравнением (3), а вектор погрешностей оценивания $\mathbf{e} = \hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a}$ удовлетворяет уравнению (4). Принципиальной особенностью построения алгоритма ДАС6 является необходимость накопления результатов псевдодальномерных измерений $\Delta z(t)$ на интервале времени $[t_0, t_k]$.

$$\hat{\mathbf{a}} = \left[\int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{\Psi}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}^T(t) \cdot dt \right]^{-1} \int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{\Psi}(t) \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i(t) \right] dt; \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{\Psi}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}^T(t) \cdot dt \cdot \mathbf{e} = \int_{t_0}^{t_k} \boldsymbol{\Psi}(t) \cdot \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^8 p_{ik}(t) \right] \cdot dt. \quad (4)$$

С одной стороны длительность интервала измерений $[t_0, t_k]$ должна быть достаточно большой, чтобы на этом интервале времени проявились дрейфы частоты a_2 генератора синхронизируемых часов и был достигнут эффект усреднения шумов измерений. С другой стороны, на концах интервала наблюдений при низких углах места НС ($\alpha \leq 15^\circ$) проявляется в максимальной степени действие некомпенсированных влияющих факторов $\delta p_k(t)$.

На основании этих соображений наиболее желательная ситуация с выбором траектории НС и конфигурации расположения пунктов синхронизации БИС заключается в следующем. Для сеанса синхронизации с оцениванием полного вектора состояний часов БИС $\mathbf{a}^T = (a_i; i = 0, \dots, 2)$ желательно выбирать НС с прохождением его в траверсной плоскости между пунктами синхронизации A и B . Для целей синхронизации целесообразно применять псевдодальномерные измерения, полученные при углах места $15^\circ \leq \alpha \leq 165^\circ$. Желательно такое расположение пунктов синхронизации, чтобы траверсная плоскость совпадала на интервале времени $[t_0, t_k]$ с плоскостью орбиты. При этом для оценивания расхождений моментов шкал времени $a_0(t_0)$ следует использовать алгоритм ДАС3 и результаты кодовых измерений, в которых отсутствуют фазовые неоднозначности измерений; а для восстановления составляющих a_1 , a_2 применять алгоритм ДАС6 и результаты фазовых измерений.

С помощью алгоритма ДАС6 исследовалась задача оценивания разности частот генераторов часов в пунктах A (г. Новосибирск) и B (г. Иркутск). Моделирование проводилось в условиях действия всех влияющих факторов $p_k(t)$. Расхождение шкал времени часов в пунктах A и B задавались в единицах длины в виде функции

$$a_0(t) = 2 + a_1 \cdot (t - t_0) + w(t), t \in [t_0, t_k]. \quad (5)$$

В результате оценивания частоты a_1 с помощью алгоритма ДАС6 по данным фазовых измерений была получена высокая идентичность полученных оценок $\hat{a}_1$ исходным данным и практическая независимость этих оценок от уровней кратковременной неустойчивости часов и шумов измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров И.Е., Толстиков А.С. Методы синхронизации пространственно разнесенных часов, основанные на применении спутниковых навигационных технологий. // Сборник материалов международного научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2006». 24-28 апреля 2006г. Том 4. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 212–216.
2. Макаров И.Е., Толстиков А.С. Сравнительный анализ методов синхронизации пространственно-разнесённых часов по навигационным сигналам. // Сборник материалов международного научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2007». 25-27 апреля 2007г. Том 4. Ч. 2. – Новосибирск: СГГА, 2007. – С. 98–102.

© И.Е. Макаров, 2009

УДК 621.317

Д.А. Гривастов, В.С. Крылов

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

СГГА, Новосибирск

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УЧЕТА ПОТЕРЬ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

D.A. Grivastov, V.S. Krulov

Siberian State Institute of Metrology

4 Dimitrov Ul., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

Siberian State Academy of Geodesy

10 Plokhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

AUTOMATION DESIGNING ALGORITHM FOR CALCULATION ELECTRIC ENERGY LOSSES IN ELECTRIC NETWORK ELEMENTS

Software for electric energy losses in electric network elements computer-aided design developed in FGUP «SNIIM» is described. This software is applied in measurement procedure design and electric energy cross-flow agreement development.

Потери электрической энергии в последнее время приобрели статус важных экономических показателей. Субъекты рынка серьезно относятся к расчетам потерь электроэнергии, сложились определённые требования к точности и оценке достоверности таких расчетов. С распространением АИИС КУЭ, объединяющих иногда тысячи точек измерений и учёта, с накоплением огромных массивов информации о потреблении, учет потерь электроэнергии становится все более сложной задачей, как практической, так и теоретической.

Алгоритм расчета потерь электроэнергии в элементах электрической сети является неотъемлемой частью методики выполнения измерений количества электрической энергии, где используется для приведения результатов измерений в точках измерений к границам балансовой принадлежности (точкам учёта), служит основой акта согласования акта сальдо перетоков электроэнергии между субъектами рынка. Эти алгоритмы приводятся в виде формул, выражающих зависимости потерь активной электрической энергии от приращений активной и реактивной электрической энергии за некоторый период, измеренных при помощи счётчиков электрической энергии и измерительных трансформаторов, входящих в состав АИИС КУЭ.

Построение таких алгоритмов представляет трудную задачу для инженеров, поскольку предполагает множество расчетов, зависящих от топологии электрической сети.

В 2008÷2009 годах в ФГУП «СНИИМ» разработан программный комплекс, автоматизирующий составление алгоритмов расчета потерь электроэнергии. Комплекс состоит из графического интерпретатора однолинейных схем электрических сетей, формирующего представление этих схем в виде графов, и вычислительного модуля, выполняющего анализ графов и построение формул для расчёта потерь электрической энергии.

Программный комплекс построен по клиент-серверной архитектуре, что позволяет организовать многопользовательскую работу над проектом. В качестве клиента выступает обычный Интернет-браузер, серверная часть обеспечивается специализированным CGI-сценариями, выполняемыми веб-сервером Apache. При разработке использованы только свободно-распространяемые средства разработки и программные компоненты, что обеспечивает низкую стоимость внедрения и лицензионную чистоту программных продуктов.

Представление однолинейной схемы в виде графа представляется естественным выбором. Для решения поставленной задачи описание графа выполнено таким образом, что узлами служат места соединения элементов электрической сети, а пути представляют собой собственно эти элементы.

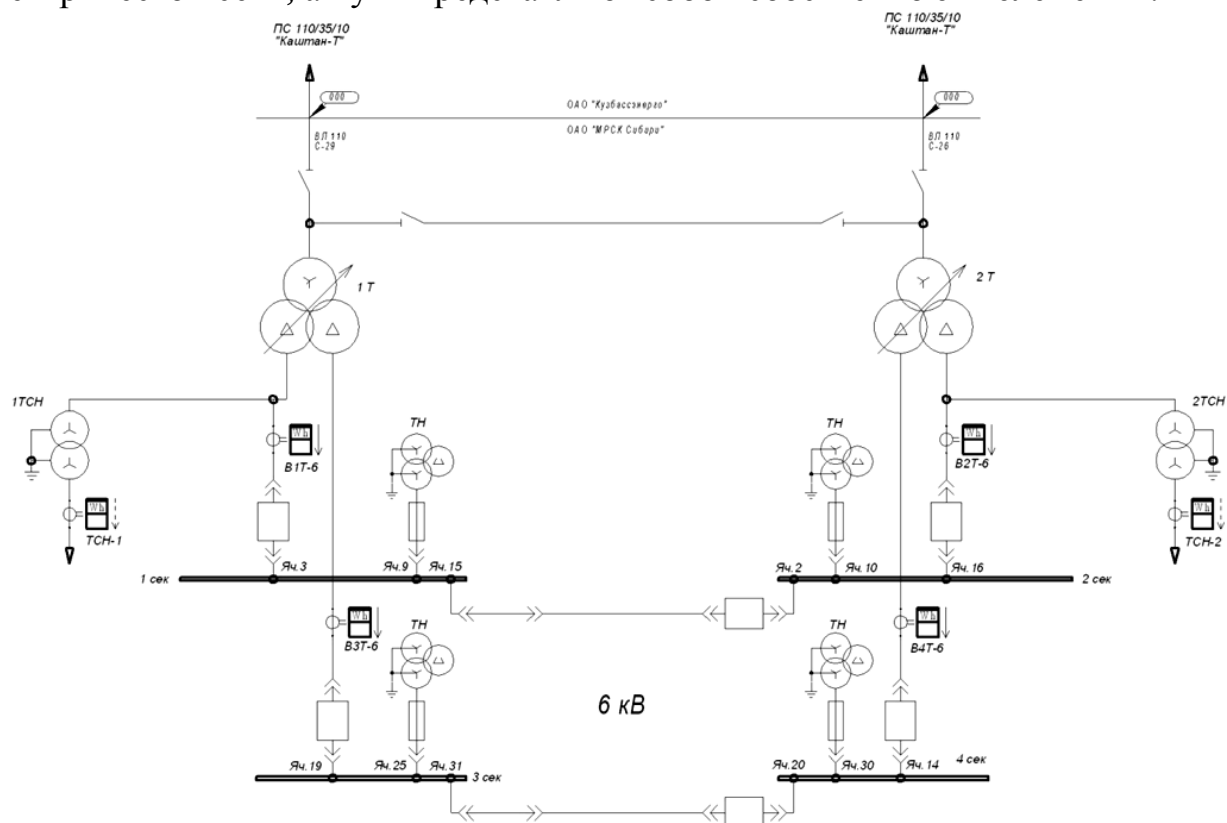


Рис. 1. Однолинейная схема подстанции

Вершиной графа является узел, расположенный на границе балансовой принадлежности, т. е. непосредственно в месте расположения точки учёта.

Для представления топологии рассматриваемой электрической сети используется графический интерпретатор однолинейных схем. Программа обеспечивает простой и интуитивный графический пользовательский

интерфейс, благодаря которому оператор просто отрисовывает на экране однолинейную электрическую схему, а затем её топология переносится в текстовый файл с представлением графа на специальном макроязыке.

Для каждого элемента электрической сети в этом макроязыке присваивается многоуровневый адрес, однозначно определяющий положение элемента в графе. Кроме адреса в описании элемента присутствуют поля для типа элемента и его параметров, необходимых для расчёта потерь электрической энергии в нём. Пример представления графа в текстовом виде приведен на рис. 3.

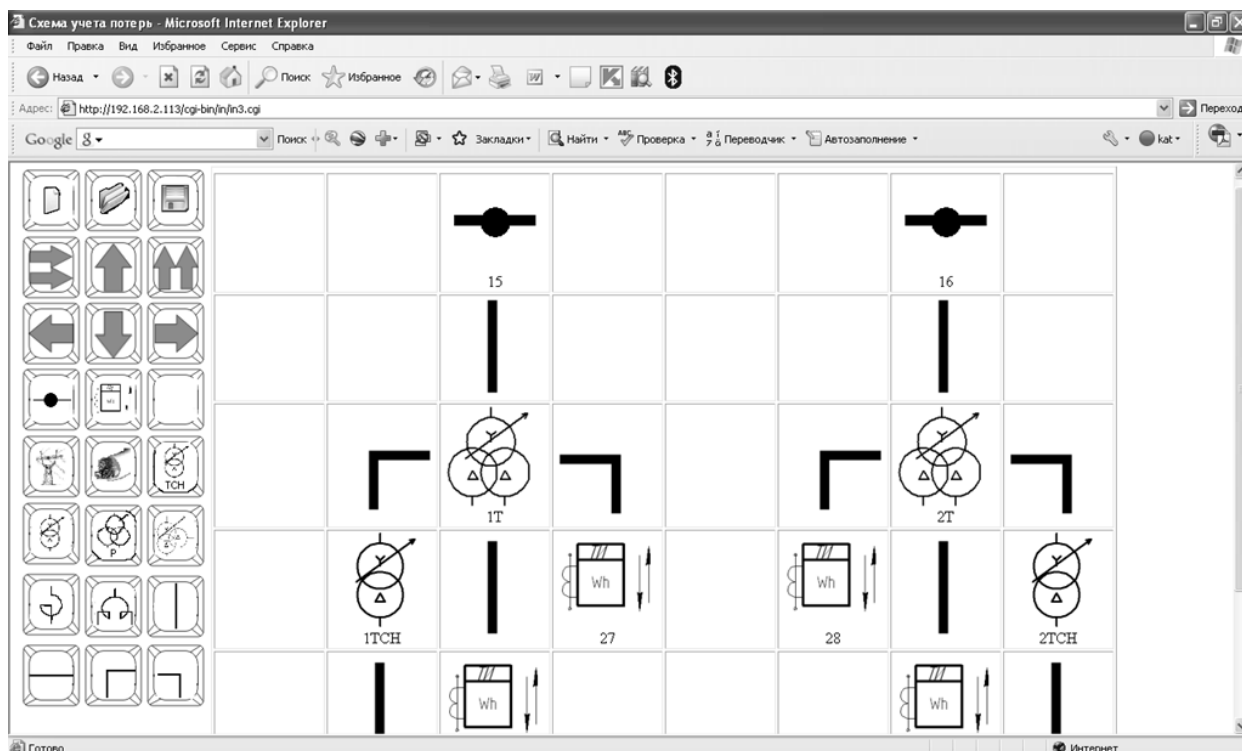
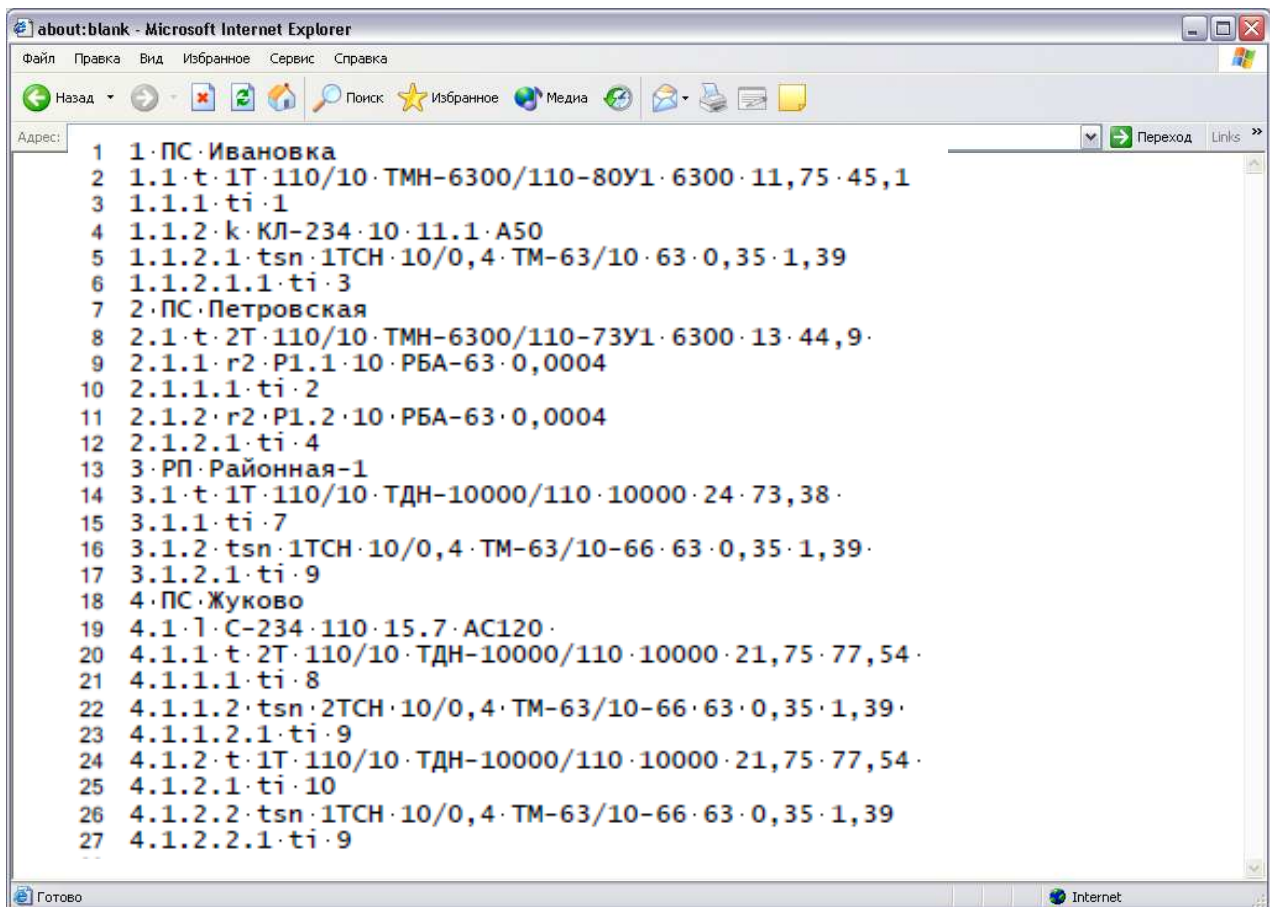


Рис. 2. Внешний вид главного окна графического интерпретатора

Алгоритм обхода графа начинается с самых нижних точек, которыми всегда являются точки измерений. Этим точкам в символическом виде приписываются значения тока, который определяется в данном случае по результатам измерений счётчиком электрической энергии приращений активной и реактивной электрической энергии, а также значениям напряжения и длительности периода интегрирования.

Далее для всех путей, которые ведут от этих точек до вершины графа, также в символическом виде по принципу суперпозиции определяются значения токов через соответствующие путям элементы электрической сети. Если возникает коллизия, заключающаяся в том, что от одной точки существует более одного пути к вершине графа, делается вывод о том, что на некоторых участках электрической сети имеются коммутируемые элементы. Коллизия разрешается путём поиска узла, в котором начинается коллизия, после чего формируются отдельные альтернативные пути, в которых принцип суперпозиции учитывает возможное наличие или отсутствие слагаемых токов.

В итоге для каждого графа получается набор формул, количество которых равно количеству альтернативных путей к его вершине, а каждая формула описывает в символическом виде суммарное значение тока в точке учёта.



```

1 1. ПС. Ивановка
2 1.1.t.1T.110/10.ТМН-6300/110-80У1.6300.11,75.45,1
3 1.1.1.ti.1
4 1.1.2.k.КЛ-234.10.11.1.A50
5 1.1.2.1.tsn.1ТСН.10/0,4.ТМ-63/10.63.0,35.1,39
6 1.1.2.1.1.ti.3
7 2. ПС. Петровская
8 2.1.t.2T.110/10.ТМН-6300/110-73У1.6300.13.44,9.
9 2.1.1.r2.P1.1.10.РБА-63.0,0004
10 2.1.1.1.ti.2
11 2.1.2.r2.P1.2.10.РБА-63.0,0004
12 2.1.2.1.ti.4
13 3. РП. Районная-1
14 3.1.t.1T.110/10.ТДН-10000/110.10000.24.73,38.
15 3.1.1.ti.7
16 3.1.2.tsn.1ТСН.10/0,4.ТМ-63/10-66.63.0,35.1,39.
17 3.1.2.1.ti.9
18 4. ПС. Жуково
19 4.1.l.C-234.110.15.7.AC120.
20 4.1.1.t.2T.110/10.ТДН-10000/110.10000.21,75.77,54.
21 4.1.1.1.ti.8
22 4.1.1.2.tsn.2ТСН.10/0,4.ТМ-63/10-66.63.0,35.1,39.
23 4.1.1.2.1.ti.9
24 4.1.2.t.1T.110/10.ТДН-10000/110.10000.21,75.77,54.
25 4.1.2.1.ti.10
26 4.1.2.2.tsn.1ТСН.10/0,4.ТМ-63/10-66.63.0,35.1,39
27 4.1.2.2.1.ti.9
  
```

Рис. 3. Листинг описания графа

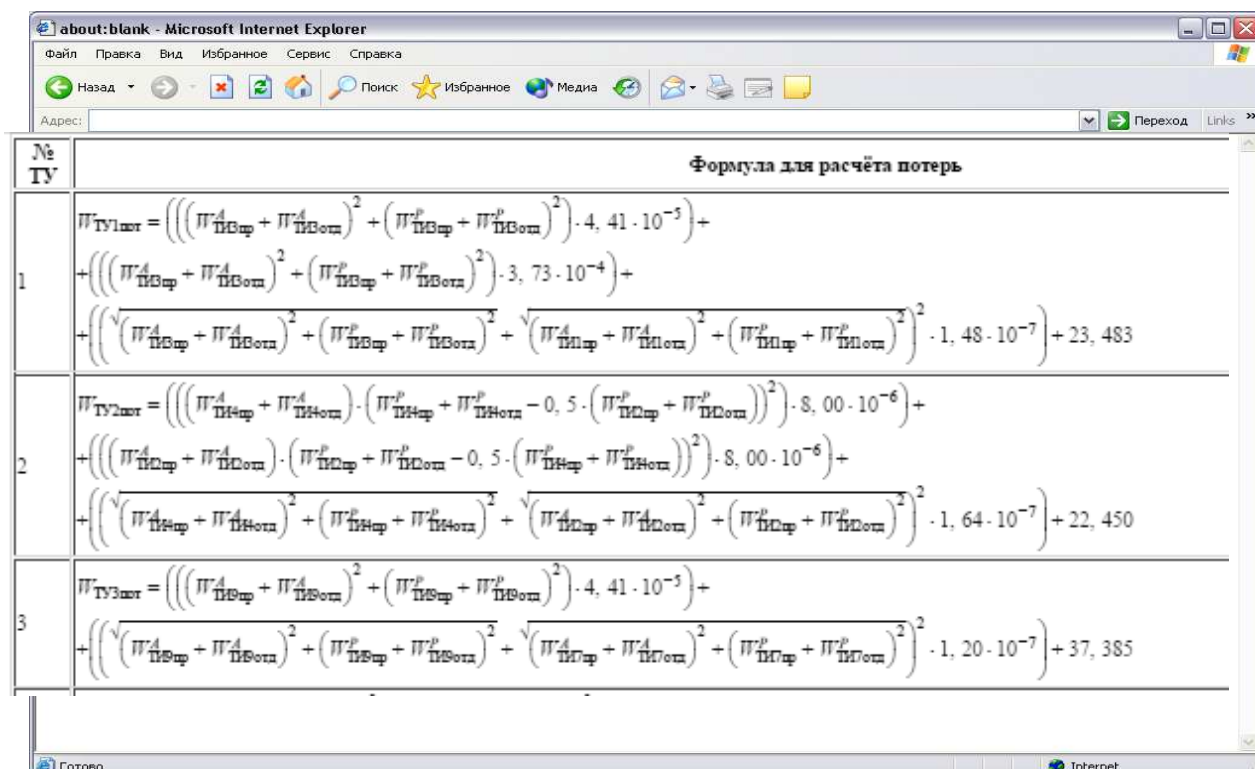
Последующий ход алгоритма обеспечивает формирование в символическом виде значений потерь электрической энергии в элементах электрической сети. Путём последовательного обхода всех путей, ведущих к вершине, составляются аналитические выражения для потерь электрической энергии во встречающихся в процессе обхода элементах, при этом полученные ранее значения токов, протекающих через элементы, используются для построения выражений, определяющих нагрузочные потери. Попутно разрешаются ситуации, в которых необходимо учитывать взаимное влияние элементов сети (например, при определении потерь в сдвоенных реакторах) и отслеживаются некорректные повторные вхождения условно-постоянных потерь (для трансформаторов с расщеплёнными обмотками и т. п.). В результате получают формулы для расчёта потерь, содержащие символические значения коэффициентов.

Далее символические значения коэффициентов заменяются численными значениями и выполняются необходимые перестановки и преобразования с целью объединения численных коэффициентов при одинаковых переменных и свободных членов.

В итоге для каждой точки учёта окончательно получают одну или несколько формул для расчёта потерь, содержащую в качестве неизвестных переменных только измеряемые счётчиком значения приращений электрической энергии.

Вид получаемых формул проиллюстрирован на рис. 4.

В качестве метода для построения выражений, по которым вычисляют нагрузочные потери в элементах электрической сети, принят метод оперативных расчётов. Следует отметить, что использование этого метода для сложных электрических сетей в настоящее время ограничено, поскольку метод трудно реализовать без применения вычислительной техники, однако он обеспечивает более высокую точность, чем прочие методы.



№ ТУ	Формула для расчёта потерь
1	$P_{\text{ТУ1пот}} = \left(\left(P_{\text{ПБпр}}^A + P_{\text{ПБотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПБпр}}^P + P_{\text{ПБотп}}^P \right)^2 \right) \cdot 4,41 \cdot 10^{-5} +$ $+ \left(\left(P_{\text{ПБпр}}^A + P_{\text{ПБотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПБпр}}^P + P_{\text{ПБотп}}^P \right)^2 \right) \cdot 3,73 \cdot 10^{-4} +$ $+ \left(\sqrt{\left(P_{\text{ПБпр}}^A + P_{\text{ПБотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПБпр}}^P + P_{\text{ПБотп}}^P \right)^2} + \sqrt{\left(P_{\text{ПГпр}}^A + P_{\text{ПГотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПГпр}}^P + P_{\text{ПГотп}}^P \right)^2} \right)^2 \cdot 1,48 \cdot 10^{-7} + 23,483$
2	$P_{\text{ТУ2пот}} = \left(\left(P_{\text{ПНпр}}^A + P_{\text{ПНотп}}^A \right) \cdot \left(P_{\text{ПНпр}}^P + P_{\text{ПНотп}}^P - 0,5 \cdot \left(P_{\text{ПДпр}}^P + P_{\text{ПДотп}}^P \right) \right)^2 \right) \cdot 8,00 \cdot 10^{-6} +$ $+ \left(\left(P_{\text{ПДпр}}^A + P_{\text{ПДотп}}^A \right) \cdot \left(P_{\text{ПДпр}}^P + P_{\text{ПДотп}}^P - 0,5 \cdot \left(P_{\text{ПНпр}}^P + P_{\text{ПНотп}}^P \right) \right)^2 \right) \cdot 8,00 \cdot 10^{-6} +$ $+ \left(\sqrt{\left(P_{\text{ПНпр}}^A + P_{\text{ПНотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПНпр}}^P + P_{\text{ПНотп}}^P \right)^2} + \sqrt{\left(P_{\text{ПДпр}}^A + P_{\text{ПДотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПДпр}}^P + P_{\text{ПДотп}}^P \right)^2} \right)^2 \cdot 1,64 \cdot 10^{-7} + 22,450$
3	$P_{\text{ТУ3пот}} = \left(\left(P_{\text{ПБпр}}^A + P_{\text{ПБотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПБпр}}^P + P_{\text{ПБотп}}^P \right)^2 \right) \cdot 4,41 \cdot 10^{-5} +$ $+ \left(\sqrt{\left(P_{\text{ПБпр}}^A + P_{\text{ПБотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПБпр}}^P + P_{\text{ПБотп}}^P \right)^2} + \sqrt{\left(P_{\text{ПГпр}}^A + P_{\text{ПГотп}}^A \right)^2 + \left(P_{\text{ПГпр}}^P + P_{\text{ПГотп}}^P \right)^2} \right)^2 \cdot 1,20 \cdot 10^{-7} + 37,385$

Рис. 4. Формулы для расчета потерь

Условно-постоянные и климатические потери в элементах электрической сети вычисляются по нормативным или паспортным характеристикам этих элементов без учёта дополнительных данных о погоде и действительном напряжении сети, что не противоречит рекомендованным методикам расчётов.

Разработанный программный комплекс применяется в ФГУП «СНИИМ» для составления методик выполнения измерений количества электрической энергии с использованием АИИС КУЭ. Благодаря внедрению комплекса удалось значительно сократить время разработки методик выполнения измерений и актов согласования сальдо перетоков для крупных объектов, в том числе и за счет снижения количества ошибок в расчетах, которые неизбежны при выполнении вычислений вручную.

© Д.А. Гривастов, В.С. Крылов, 2009

УДК 621.317

В.С. Крылов

ФГУП «СНИИМ», СГТА, Новосибирск

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ В АИИС КУЭ

V.S. Krulov

Siberian State Institute of Metrology

4 Dimitrov Ul., Novosibirsk, 630004, Russian Federation

AIIS KUE TIME-KEEPING ACCURACY

Mathematical model of AIIS KUE time-keeping accuracy is considered. Calculations of time-keeping error for two widely applied types of AIIS KUE used model under consideration are given.

В связи с широким распространением автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электрической энергии (АИИС КУЭ) метрологическое обеспечение таких систем стало важной задачей для метрологических институтов. Метрологическое обеспечение АИИС КУЭ включает расчет и нормирование погрешности АИИС КУЭ, в том числе и погрешность измерений времени. Результаты измерений АИИС КУЭ зависят от измерений времени: средняя мощность, вычисляемая за интервал времени 30 минут, приращение электрической энергии, привязанное к национальной шкале координированного времени UTC(SU). Существуют определенные требования на оптовом рынке электрической энергии к погрешности измерений времени: поправка часов АИИС КУЭ относительно шкалы UTC(SU) не должна превышать ± 5 с. Под поправкой часов подразумевают значение интервала времени, которое необходимо прибавить к показаниям часов, чтобы получить действительное время в данной шкале времени. Данное требование довольно жесткое и проектировщикам необходима математическая модель погрешности измерений времени. Цель данной статьи построить модель погрешности измерений времени АИИС КУЭ.

Погрешность измерений времени АИИС КУЭ, как и погрешность средней мощности, состоит из нескольких составляющих от каждого компонента, входящего в измерительный канал. Механизм передачи эталонного сигнала времени к счетчикам электрической энергии представлен на рис. 1, а.

Национальный эталон единицы времени и частоты хранит национальную шкалу координированного времени UTC(SU), которая воспроизводится так, что значение ее смещения относительно Международной шкалы координированного времени UTC не превышает установленного значения. Для Российской Федерации, на 1 декабря 1998г. смещение UTC относительно UTC(SU) составляло +0,17 мкс. Передача эталонного сигнала времени

осуществляется по различным каналам связи (телевизионным, радио и другим, а так же через глобальную спутниковую систему). Эталонный сигнал времени формируют и контролируют с заданной точностью государственная, межрегиональные и межотраслевые службы времени и частоты.

Сервер АИИС КУЭ синхронизирует свою шкалу времени по эталонному сигналу времени, как правило, получаемому от спутников. Синхронизация шкал времени означает приведение шкал времени в такое состояние, чтобы числовые выражения любого события в них совпадали. По шкале времени сервера определяется поправка часов устройства сбора и передачи данных (УСПД). Поправка часов равна значению интервала времени, которое необходимо прибавить к показаниям часов, чтобы получить действительное время в данной шкале времени. Шкала времени УСПД синхронизируется со шкалой времени сервера только в том случае, если поправка часов УСПД превышает установленное значение. Далее счетчик определяет поправку своих часов относительно шкалы времени УСПД, и если она превышает установленное значение, то происходит синхронизация по шкале времени УСПД. Определение поправки часов счетчика происходит реже, чем определение поправки часов УСПД. За это время поправка часов счетчика постоянно увеличивается. Изменение поправки часов за интервал времени, отнесенное к этому интервалу называется ходом часов. Как правило, ход часов выражается в с/сутки.

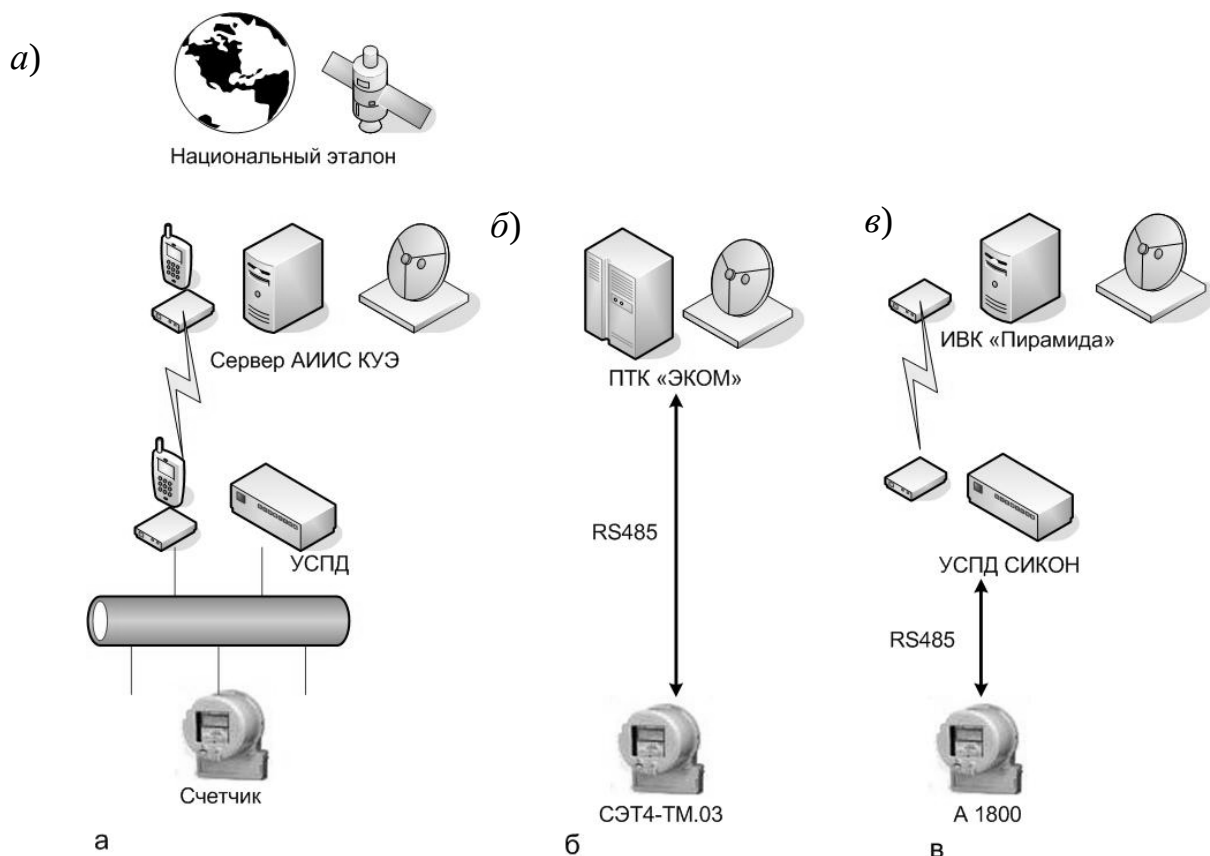


Рис. 1. Схемы передачи шкалы времени в АИИС КУЭ: а) – типичная схема передачи шкалы времени в АИИС КУЭ, б) – схема передачи шкалы времени в АИИС КУЭ на основе ПТК «ЭКОМ», в) – схема передачи шкалы времени в АИИС КУЭ на основе ИВК «Пирамида»

Для математической модели погрешности измерений времени АИИС КУЭ рассмотрим стандартные характеристики компонентов в схеме передачи шкалы времени:

- Предельное значение поправки часов сервера относительно национальной шкалы координированного времени, $\Delta t_{\text{СЕР}}$. Это значение нормировано в описании типа на оборудования являющееся сервером. Эта поправка носит случайный характер и зависит от устройства приемника шкалы времени. В качестве приемника шкалы времени может выступать служба NTP, работающая в сети Internet, или приемник сигналов GPS-ГЛОНАСС. Значение этой поправки не превышает 1 с. Ход часов сервера обычно не вносит погрешность в измерения времени, так как синхронизация часов сервера происходит достаточно часто;

- Предельное значение поправки часов УСПД относительно часов сервера или национальной шкалы координированного времени, $\Delta t_{\text{УСПД}}$. В качестве источника эталонного сигнала времени может выступать или сервер АИИС КУЭ или национальный эталон, если в УСПД предусмотрено подключение приемника сигналов эталонного времени. Например, в описании типа ЭКОМ 3000 указан предел допускаемой абсолютной погрешности отсчета времени на интервале 1 сутки с модулем GPS равный ± 1 с. Это означает, что при наблюдении на интервале 1 сутки поправка шкалы времени часов УСПД не превысит 1с. Так как синхронизация от модуля GPS происходит достаточно часто, то какой бы интервал наблюдений не был бы выбран, поправка шкалы времени не превысит 1с, значит эта величина не что иное, как предельное значение поправки часов УСПД;

- Предельное значение поправки часов счетчика относительно шкалы времени часов УСПД, $\Delta t_{\text{сч}}$. Рассмотрим наиболее распространенный механизм синхронизации часов счетчика, основанный на сравнении шкал времени, хранимой часами счетчика и эталонной. В момент сравнения шкалы времени часов счетчика со шкалой времени часов УСПД анализируется поправка часов счетчика относительно шкалы времени часов УСПД. Если поправка превышает предельное значение, то происходит коррекция часов счетчика на величину поправки, т. е. синхронизируются шкалы. Если поправка не превышает предельного значения, то часы счетчика не корректируются и шкалы не синхронизируются. Значение этой поправки программируется в УСПД. Например, для счетчиков СЭТ4-ТМ.03 это предельное значение поправки может быть установлено от 1 секунды и более с дискретностью в 1 секунду;

- Ход часов счетчика в нормальных условиях, $\sigma_{\text{сч}}$. Значение хода часов счетчика приводится в описании типа счетчика;

- Интервал времени, на котором часы счетчика автономно хранят шкалу времени, $\tau_{\text{сч}}$. Интервал времени между сравнениями шкал времени счетчика и УСПД. Обычно проверка шкалы времени происходит во время сеанса связи счетчика с УСПД. Например, раз в 30 минут = 0,021 суток, либо 1 раз в сутки. Значение программируется в УСПД и счетчике, либо ограничено

характеристиками счетчика. Например, для СЭТ4-ТМ.03 и А 1800 этот интервал времени равен 1 суткам;

- Задержка сигнала синхронизации в линии от сервера до УСПД, $\Delta\tau_{\text{УСПД-СЕР}}$ и задержка сигнала синхронизации в линии связи от УСПД до счетчика, $\Delta\tau_{\text{Дсч-УСПД}}$. Эти задержки в основном зависят от параметров линии связи, например, для интерфейса RS485 на скорости 9600 бод она равна 0,02 с;
- Изменение хода часов счетчика от окружающей температуры в рабочих условиях, $\frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT}$. Значение указывается в описании типа счетчика.

Графики составляющих погрешности представлены на рис. 2.

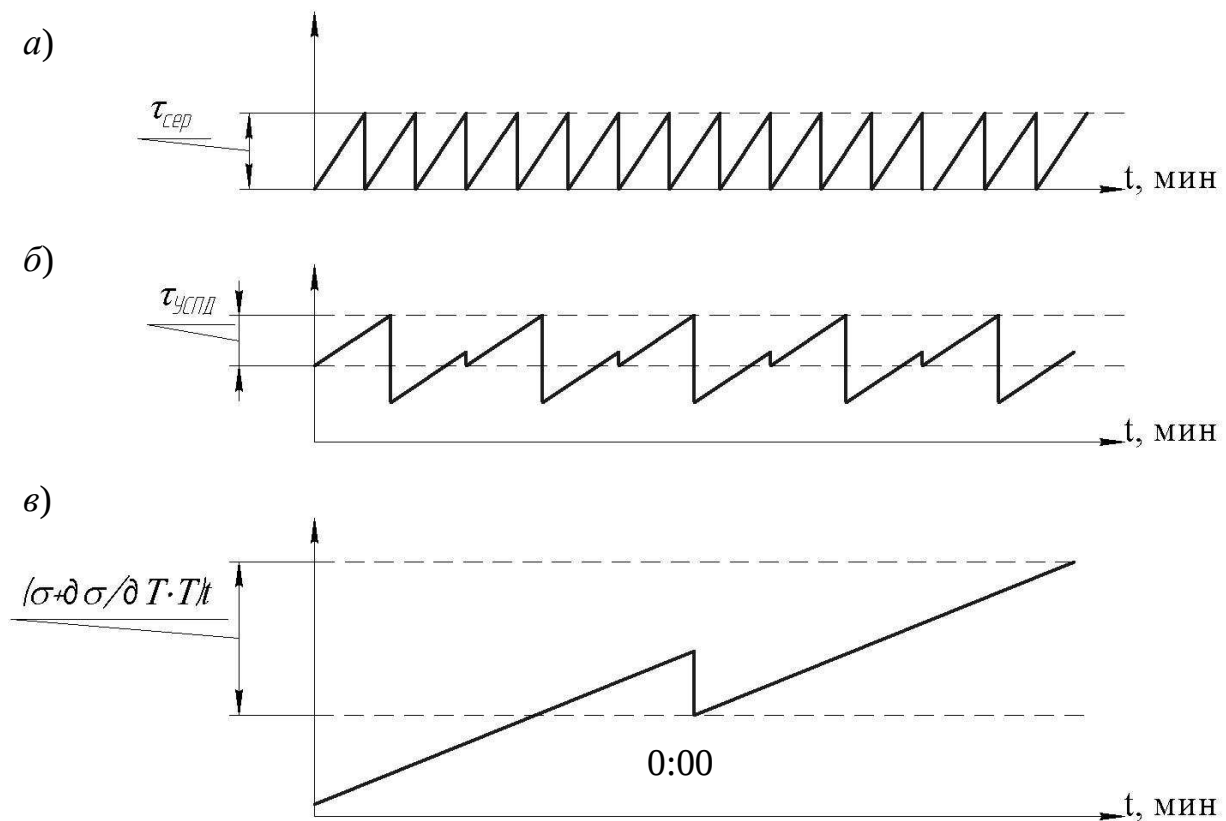


Рис. 2. Временные зависимости погрешности измерений времени АИИС КУЭ:
а) – погрешность измерения времени сервера; б) – погрешность измерения времени УСПД; в) – погрешность измерения времени счетчика

Оценить максимально возможную погрешность измерений времени можно, допустив наихудший реализуемый вариант. Синхронизация шкалы времени УСПД со шкалой времени сервера произошло в тот момент, когда поправка часов сервера относительно шкалы времени UTC(SU) была равна максимально допустимой поправке часов сервера. Сравнение шкалы времени часов счетчика со шкалой времени УСПД было проведено в тот момент, когда поправка часов УСПД относительно шкалы времени сервера была равна

предельно допускаемой поправке часов УСПД. Т. е. погрешность часов УСПД была максимальной.

В момент сравнения шкалы времени часов счетчика, поправка часов счетчика относительно шкалы времени часов УСПД была близка предельно допускаемой поправке часов счетчика, но меньше ее, и синхронизация шкалы времени часов счетчика со шкалой времени часов УСПД не произошла. На рисунке это момент времени 0:00. В предельном случае можно допустить, что поправка часов счетчика была равна максимально допустимой поправке часов счетчика. До следующей синхронизации шкалы времени счетчиков остается сутки. Допустим, что ход часов счетчика и температурный коэффициент хода часов счетчика имеют положительное значение. За одни сутки из-за хода часов счетчика шкала времени часов счетчика сдвинется на величину равную:

$$\left(\sigma_{\text{сч}} + \frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT} \cdot |\Delta T_{\text{сч}}| \right) \cdot \tau_{\text{сч}}.$$

К концу суток погрешность измерения времени АИИС будет максимальна, так как будет включать в себя погрешности максимальных поправок часов УСПД и счетчика и погрешность, вызванную ходом часов счетчика.

На практике такой предельный вариант маловероятен. К расчету погрешности измерения времени нужно подходить с точки зрения вероятностного распределения событий, приводящих к появлению погрешности. Рассмотрим эти события.

1. В момент сравнения шкалы времени часов счетчика разница между шкалой времени часов УСПД и координированной шкалой UTC(SU) равна максимальной поправке часов УСПД $\Delta \tau_{\text{УСПД}}$.

2. В момент сравнения шкалы времени часов счетчика разница между шкалой времени часов счетчика и шкалой времени УСПД была равна максимальной поправке часов счетчиков $\Delta \tau_{\text{сч}}$, но коррекция часов счетчика не произошла.

3. Счетчик имеет максимально допустимый ход и температурный коэффициент хода часов счетчика среди множества счетчиков данного типа $\sigma = 0,5 \text{ с/сут}$ и $\frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT} = 0,1 \text{ с/сут/}^\circ\text{C}$. при расчете выбирается вариант, дающий максимальную погрешность. К тому же если рассмотреть физическую природу, откуда появляется ход часов счетчика – частота кварцевого резонатора изменяется от температурного расширения, значит, температурный коэффициент хода часов всего лишь увеличивает ход часов. Другими словами температурный коэффициент счетчика коррелирован с ходом часов, а значит, образуют одно событие.

4. Температура окружающего воздуха в месте установки счетчика равна максимально достижимой. Например, $T = 40^\circ\text{C}$.

Закон сложения случайных величин, с неопределенным распределением, выглядит как геометрическая сумма, умноженная на поправочный коэффициент,

зависящий от требуемой вероятности результата. Для данного случая этот коэффициент принимается равным 1,1. При этом полученный результат имеет доверительную вероятность 0,95 и определяется формулой:

$$\pm \Delta \tau = 1,1 \cdot \sqrt{\Delta \tau_{\text{СЕР}}^2 + \Delta \tau_{\text{УСПД}}^2 + \Delta \tau_{\text{сч}}^2 + \left(\left(\sigma_{\text{сч}} + \frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT} \cdot |\Delta T_{\text{сч}}| \right) \cdot \tau_{\text{сч}} \right)^2 + \Delta \tau_{\text{ДУСПД-СЕР}} + \Delta \tau_{\text{ДСч-УСПД}}}$$

Задержка передачи сигналов в линии связи существует всегда и определяется временными характеристиками используемого интерфейса. Если рассмотреть, например, протокол обмена счетчика СЭТ4-ТМ.03 по интерфейсу RS-485. Одна фрейм с командой синхронизации составляет 231 бит. При скорости обмена 9600 бод/с это займет 0,02 с. Если счетчик настроен на минимально возможную скорость обмена 600 бод/с, то задержка в линии связи равна 0,385 с.

К времени задержки передачи сигналов по линии связи добавляется время обработки микропроцессором счетчика полученной команды. Например, у счетчика СЭТ это время может достигать 0,1 с.

$$\Delta \tau_{\text{ДСч-УСПД}} = \frac{231}{600} + 0,1 = 0,485 \text{ с}$$

Рассмотрим пример распространенной схемы измерения времени, которая представлена на рисунке 1 б. ПТК ЭКОМ 3000 на основе УСПД ЭКОМ 3000 вместе в модулем GPS и счетчик электрической энергии СЭТ4-ТМ.03. составляющие погрешности измерений времени приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составляющие погрешности измерений времени для схемы б)

$\Delta \tau_{\text{УСПД}}, \text{ с}$	± 1
$\Delta \tau_{\text{сч}}, \text{ с}$	± 1
$\tau_{\text{сч}}, \text{ сут}$	± 1
$\sigma_{\text{сч}}, \text{ с/сут}$	$\pm 0,5$
$\frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT}, \text{ с/сут/}^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1$
$ \Delta T_{\text{сч}} , ^{\circ}\text{C}$	20

Для рассматриваемой схемы предел погрешности измерений времени составляет:

$$\pm \Delta \tau = 1,1 \cdot \sqrt{1^2 + 1^2 + ((0,5 + 0,1 \cdot 20) \cdot 1)^2} + 0,485 = 3,64 \text{ н.}$$

Рассмотрим пример распространенной схемы измерения времени, которая представлена на рисунке 1 в. ПТК ЭКОМ 3000 на основе УСПД ЭКОМ 3000 вместе в модулем GPS и счетчик электрической энергии СЭТ4-ТМ.03. составляющие погрешности измерений времени приведены в табл. 1.

Таблица 2. Составляющие погрешности измерений времени для схемы в)

$\Delta \tau_{\text{СЕР}}, \text{с}$	± 1
$\Delta \tau_{\text{УСПД}}, \text{с}$	± 1
$\Delta \tau_{\text{сч}}, \text{с}$	± 1
$\tau_{\text{сч}}, \text{сут}$	± 1
$\sigma_{\text{сч}}, \text{с/сут}$	$\pm 0,5$
$\frac{d\sigma_{\text{сч}}}{dT}, \text{с/сут/}^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,1$
$ \Delta T_{\text{сч}} , ^{\circ}\text{C}$	20

Для рассматриваемой схемы предел погрешности измерений времени составляет:

$$\pm \Delta \tau = 1,1 \cdot \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + ((0,5 + 0,1 \cdot 20) \cdot 1)^2 + 0,485 + 0,485} = 4,32 \text{ с}.$$

Предложенная модель позволяет рассчитать погрешность измерения времени для двух распространенных схем измерений времени АИИС КУЭ, по данной модели можно рассчитать погрешность времени и для любого другого случая схемы, состоящей из компонентов имеющих стандартизованные характеристики погрешности измерений времени, такие как предельное значение поправки часов, ход часов и температурный коэффициент хода часов.

При испытаниях АИИС КУЭ поправка счетчика не превышала 5 с, что подтверждает расчетное значение погрешности измерений времени по предложенной модели.

© В.С. Крылов, 2009

УДК 621.396.2

А.С. Толстиков, О.В. Бояркеева

ФГУП «СНИИМ», СГТА, Новосибирск

ПРОГРАММНЫЙ ИМИТАТОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОСТУПАЮЩЕЙ С КА ГЛОНАСС И КА GPS

A.S. Tolstikov, O.V. Boyarkeeva

Siberian Scientific-Research Institute of Metrology (SSRIM)

4 Dimitrova UI., Novosibirsk, 630004, Russian Federation, SSGA, 10 Plahotnogo UI

, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

THE PROGRAM SIMULATOR OF THE MEASURING INFORMATION, ACTING FROM SV GLONASS AND SV GPS

In work it is a question of problems of formation of efemeridno-temporary maintenance of satellite navigating system GLONASS on a basis unrequestless of measuring technologies.

Research of the characteristics of accuracy of the specified efemeridno-temporary maintenance and of some other problem problems of the metrological plan is offered to be solved on the basis of the program simulator of measuring information ModBis 24 developed in «SSRIM» (Novosibirsk).

В настоящее время наземный комплекс управления (НКУ) ГЛОНАСС переходит на беззапросную технологию формирования эфемеридно-временной информации [1]. Эта технология применяется в космической навигационной системе GPS и будет положена в основу эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) космической навигационной системы GALILEO.

Для реализации беззапросной технологии разворачивается сеть беззапросных измерительных станций (БИС). В силу того, что беззапросные технологии формирования ЭВО ГЛОНАСС находятся в стадии внедрения, многие проблемные вопросы нуждаются в отработке. В частности: необходима разработка алгоритмов, методик выполнения измерений, а также оценка точности для решения ряда задач ЭВО. Это, прежде всего:

- Восстановление орбит навигационных КА по данным беззапросных траекторных измерений;
- Идентификация действующих на КА возмущений;
- Компенсация факторов, влияющих на точность траекторных измерений;
- Оценивание параметров вращения Земли по данным беззапросных траекторных измерений;
- Уточнение параметров распределения гравитационного потенциала Земли по данным траекторных измерений;

- Синхронизация часов пространственно разнесенных БИС по навигационным сигналам КА ГЛОНАСС;
- Выбор конфигурации расположения БИС;
- Разработка метрологического обеспечения беззапросных измерительных технологий, включающего в себя создание эталонной базы этих технологий, нормирование основных метрологических характеристик применяемых аппаратно-программных комплексов, оптимизацию режимов измерений и разработку процедур планирования сеансов измерений.

Ввиду сложности исследований точностных характеристик ЭВО, основанных на беззапросных измерительных технологиях, и невозможности в общем случае связать аналитическими зависимостями точностные характеристики с факторами, влияющими на точность, предлагается такие исследования проводить методом имитационного моделирования. Поскольку в имитационном эксперименте известны орбитальные параметры, частотно-временные поправки, структура и параметры согласующих моделей, параметры вращения Земли, имеется возможность непосредственного сравнения этих параметров с их оценками, полученными в процессе исследований тех или иных схем формирования ЭВО.

Значительная часть перечисленных выше задач может быть решена с помощью программного имитатора измерительной информации сети БИС, полученной по КА ГЛОНАСС и КА GPS. Такой имитатор в виде пакета программ с пользовательским интерфейсом под общим названием Modbis 24 разработан в ФГУП «СНИИМ» для ОАО «ИСС им. М.Ф. Решетнева» [2].

Функционально программный имитатор ModBis 24 обеспечивает решение следующих задач:

- Расчет движения орбитальной группировки КА ГЛОНАСС с учетом действующих на КА возмущений. В практике ЭВО спутниковых навигационных систем для описания движения КА применяется система оскулирующих элементов [3], представляющих собой комбинации Кеплеровых элементов орбиты. При таком описании удобно приводить действующие на КА возмущения к центру масс КА. В общем случае возмущенное движение КА в оскулирующих элементах описывается нелинейным дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\tilde{o}} = f(x, s, w, t); \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

где $\tilde{o}$ – 6-ти мерный вектор оскулирующих элементов орбиты,

$f(x, s, w, t)$ – 6-ти мерная известная гладкая вектор-функция допускающая дифференцирование по x, s, w, t , причем $f(0, 0, 0, t) = 0$,

s – 3-х мерный вектор действующих на КА моделируемых возмущений, представляющий собой комбинации следующих возмущений s_i ;

s_1 – возмущений от неравномерности гравитационного потенциала Земли,

s_2 – возмущений от гравитационного воздействия на КА Луны и Солнца,

s_3 – возмущений от радиационного воздействия на КА солнечного излучения,

w – 3-х мерный вектор возмущений случайной природы.

– Задание сети БИС в геоцентрической системе координат. Сеть БИС в модельных исследованиях на основе имитатора ModBis 24 задается в виде совокупности геоцентрических координат $u_I^T = (x_I, y_I, z_I)$. Эти координаты определяют положение фазового центра приемного антенного модуля I – ой БИС в геодезических системах ПЗ-90 или WGS -84, связанных с вращающейся Землей.

В модельных исследованиях на основе имитатора ModBis 24 в качестве u_I применялись координаты известных измерительных станций, или, при поиске оптимальной конфигурации сети БИС и при решении задачи оптимального планирования сеансов измерений, эти координаты рассчитывались в соответствии с условиями решаемых задач.

– Расчет геометрических дальностей от КА до БИС. Расчет геометрических дальностей $\rho(u_{\tilde{N}J}, u_I)$ между КА и БИС выполняется в соответствии с равенством

$$\rho(u_{\tilde{N}J}, u_I) = \sqrt{[x_{\tilde{N}J}(t) - x_I]^2 + [y_{\tilde{N}J}(t) - y_I]^2 + [z_{\tilde{N}J}(t) - z_I]^2}, \quad (2)$$

в котором $I = 1, \dots, N$ – номер БИС, $u_{CJ}^T(t) = (x_{CJ}(t), y_{CJ}(t), z_{CJ}(t))$ – текущие координаты КА в принятой геоцентрической системе координат на момент времени, соответствующий приходу навигационного сигнала от КА на антенну I -го БИС, $J = 1, \dots, M$ – номер КА.

Необходимой операцией для расчета геометрических дальностей $\rho(u_{\tilde{N}J}, u_I)$ является приведение с помощью известных формализмов [3] оскулирующих элементов орбиты J -го КА в инерциальную систему координат ИСК 2000 и, далее, в выбранную геоцентрическую систему координат связанную с вращающейся Землей.

– Имитация факторов, влияющих на точность измерений. В реальных условиях приема в БИС навигационных сигналов от КА измерение геометрических дальностей $\rho(u_{\tilde{N}J}, u_I)$ радиотехническими методами сводится к определению длительности интервала времени, необходимого для прохождения навигационного сигнала от КА до БИС. Этот измеренный интервал времени $D_{IJ}(t)$, выраженный в единицах длины и именуемый в дальнейшем «псевдодальностью», связан с геометрической дальностью $\rho(u_{\tilde{N}J}, u_I)$ уравнением измерений

$$D_{IJ}(t) = \rho(u_{\tilde{N}J}, u_I) + \sum_{k=1}^{12} p_{IJk}(t), \quad (3)$$

где $p_k(t), k = 1, \dots, 12$ – факторы, влияющие на точность измерений $\rho(u_C, u)$ по каждой радиотрассе выраженные в единицах длины [4].

Данные факторы $p_k(t)$, как и в описании действующих на КА возмущений s и w , делятся на моделируемые факторы, представляемые согласующими

математическими моделями, и немоделируемые факторы, которые трактуются как реализации тех или иных случайных процессов.

Приемники навигационных сигналов, применяемые в составе БИС, обеспечивают одновременно до шести псевдодальномерных измерений по каждой радиотрассе в следующих режимах:

- Кодовые измерения стандартной точности $C1$ в диапазоне $L1$,
- Кодовые измерения стандартной точности $C2$ в диапазоне $L2$ для КА ГЛОНАСС-М,
- Кодовые измерения повышенной точности $P1$ в диапазоне $L1$,
- Кодовые измерения стандартной точности $P2$ в диапазоне $L2$,
- Фазовые измерения $\Phi1$ в диапазоне $L1$,
- Фазовые измерения $\Phi2$ в диапазоне $L2$.

Каждому режиму измерений в имитаторе ModBis 24 обеспечено индивидуальное задание параметров влияющих факторов $p_k(t)$.

Для имитации уходов бортовых часов и уходов часов БИС (факторы $p_1(t)$ и $p_2(t)$) в ModBis 24 применены разработанные авторами процедуры формирования случайного процесса, адекватного этим уходам. Исходными данными для имитации уходов часов в этом случае является ряд дисперсий Аллана, определенных на интервалах времени 1 с, 10 с, 100 с, 10^{-3} с, 10^{-4} с, 10^{-5} с. Эти дисперсии Аллана полностью характеризуют долговременную и кратковременную нестабильности часов, построенных на основе квантовых стандартов частоты. Именно такие часы применяются на бортах КА ГЛОНАСС и в составе БИС.

Задержки навигационного сигнала в ионосферном слое $p_3(t)$ представляются в виде линейной комбинации «функции отображения» (зависящей от угла места, под которых виден КА, и частоты несущей навигационного сигнала) и параметра, значения которого определяются полной электронной концентрацией на трассе.

Для представления тропосферной задержки навигационного сигнала $p_4(t)$ в имитаторе ModBis 24 применяется математическая модель Х. Хопфилд [3]. Для этой модели в качестве исходных данных используются значения метеопараметров стандартной атмосферы в месте проведения измерений.

Факторы $p_5(t)$, $p_6(t)$, $p_9(t)$, $p_{10}(t)$ в имитационных экспериментах задаются в виде функций времени, значения которых рассчитываются с учетом конструктивных параметров КА, параметров приемных антенных модулей, значений погрешностей задания эфемерид КА ГЛОНАСС, параметров траекторий КА в зонах радиовидимости БИС.

В группу факторов $p_{12}(t)$ входят межлитерные и межчастотные задержки навигационного сигнала в бортовых источниках навигационного сигнала (БИС) и в измерительных каналах БИС. Эти задержки связаны с специфичным для технологии ГЛОНАСС частотным разделением каналов. Разработка методик калибровки применяемой аппаратуры по этим задержкам

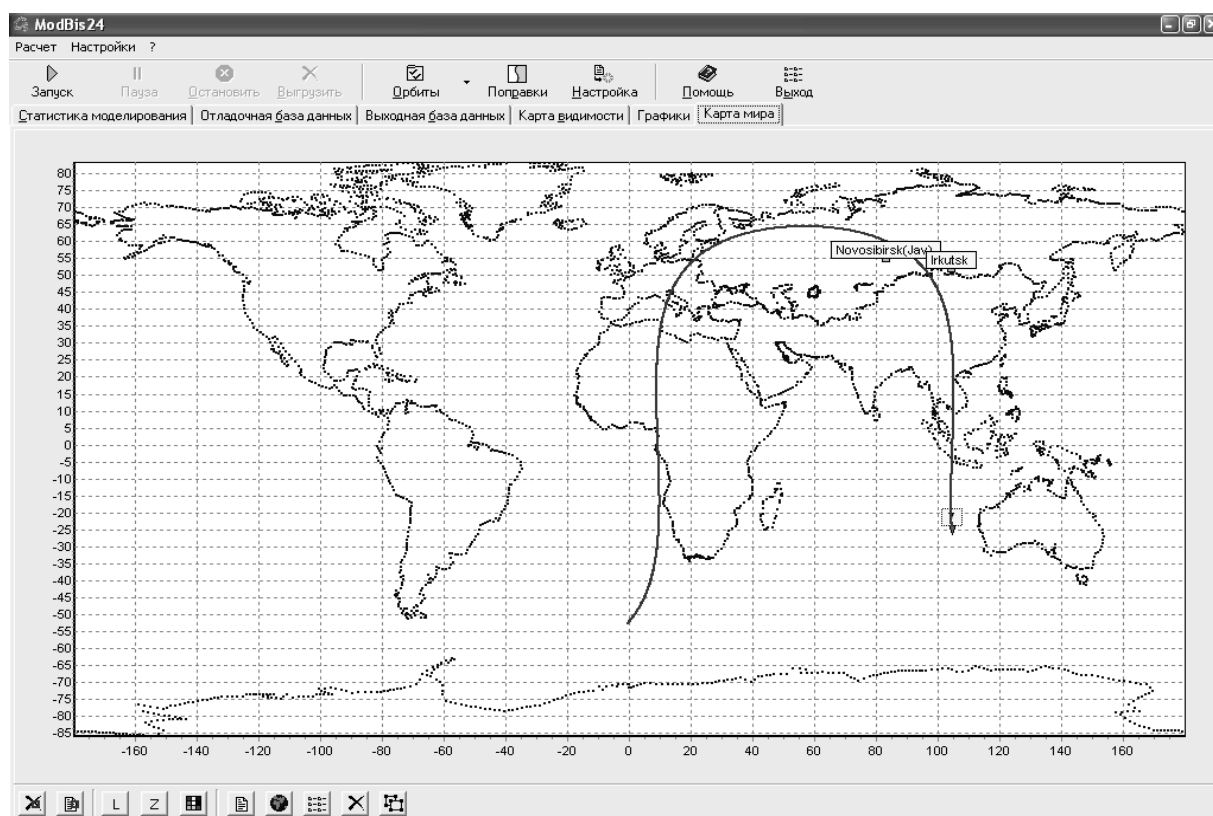
и исследования влияний указанных задержек, на точность прецизионных координатно-временных определений являются для настоящего времени одной из актуальных задач метрологии.

Модельные исследования процесса синхронизации пространственно разнесенных часов. С помощью программного имитатора ModBis 24 исследовались алгоритмы решения задач, обеспечивающих функционирование сети БИС. Это, в частности, задачи синхронизации пространственно разнесенных часов (часов БИС) по навигационным сигналам КА [5].

Исследовались разработанные в ФГУП «СНИИМ» дифференциальные алгоритмы синхронизации по сигналам одного КА. Для этих задач был выбран КА № 7. На рисунке показана проекция траектории КА № 7, проходящая между пунктами синхронизации в г. Новосибирск и г. Иркутск.

Для одномоментной синхронизации по кодовым измерениям $P1$ определены условия проведения сеанса синхронизации, при которых погрешность оценивания расхождения моментов шкал времени синхронизируемых часов не превышает 1 нс в условиях действия всех влияющих факторов $p_k(t)$.

На основе фазовых псевдодальномерных измерений решалась задача оценивания разности частот генераторов синхронизируемых часов. С помощью дифференциальных алгоритмов синхронизации за один проход КА № 7 в зоне радиовидимости пунктов синхронизации получены оценки разности частот генераторов с относительной погрешностью не превышающей $0.9 \cdot 10^{-15}$. В эксперименте уровни кратковременной нестабильности синхронизируемых часов в $СКДО(\tau), \tau \leq 10\text{с}$. выбирались 0.2 метра, $СКО$ шумов измерений в единицах длины – 1 метр.



Программный имитатор измерительной информации сети беззапросных измерительных станций ModBis 24 представляет собой важный фрагмент метрологического обеспечения беззапросных траекторных измерений по КА ГЛОНАСС И КА GPS и эффективный инструмент для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС. С помощью программного имитатора ModBis 24 появляется возможность проводить сравнительный анализ алгоритмов оценивания орбит навигационных КА, алгоритмов синхронизации пространственно разнесенных часов, определять рациональный состав измерений и осуществлять обоснованный выбор согласующих математических моделей для расчета компенсирующих поправок к факторам, влияющим на точность беззапросных измерений.

Также программный имитатор ModBis 24 может быть использован в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов по специальностям «Космическая геодезия» и «Небесная механика».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Создание сети беззапросных измерительных систем для эфемеридно-временного обеспечения системы «ГЛОНАСС»/В.А. Бартенев, А.К. Гречкосеев, В.И. Кокорин, А.Н. Гребенников // Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 40- летию запуска на орбиту навигационного КА «Космос-192» и 25-летию запуска первого КА «ГЛОНАСС». Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека, 10-14 окт. 2007, г. Железногорск/Сиб.ГОС. аэрокосмический университет. – Красноярск, 2007. – С. 156–159.

2. Владимир, В.М. Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС/В.М. Владимир, А.К. Гречкосеев, А.С. Толстиков// Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 12–14.

3. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т1./К.М. Антонович.-М.: Картогеоцентр, 2005. – 334 с.

4. Нетесаная, О.В. Исследование метрологических характеристик программного имитатора «MODBIS24»/О.В.Нетесаная//Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии. Вып. 5/ под общ. ред. Т.А. Широковой. – Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 34–37.

5. Tolstikov, A.S. Comparative Analysis of Synchronization Techniques of Spatial Diversity Clocks Navigation Signals/A.S. Tolstikov, A.K. Grechkoseev, V.I. Kokorin, V.M. Vladimirov// X Telsiks 2007. Proceedings of Papers. Volume 2 of 2 volumes. / 8th International Conference of Telecommunications in Modern Satellite, and Broadcasting Services. Serbia, Nis.26-28 September, – 2007. – P. 356–368.

© А.С. Толстиков, О.В. Бояркеева, 2009

УДК 528

*И.Г. Чугреев, А.М. Жилкин, В.Г. Авхадеев, К.Н. Былинушкин,
И.М. Герасимов, П.И. Савостин, Е.П. Власенко, К.С. Федоров*

Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПОПЕРЕЧНЫХ СМЕЩЕНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*I.G. Thugreev, A.M. Gilkin, V.G. Avchadeev, K.S. Bulinuchcin, I.M. Gerasimov, P.I.
Savostin, E.P. Vlasenco, K.S. Fedorov*

Moscow state university of geodesy and cartography (MIIGAİK), Moscow

RESEARCH, DEVELOPMENT AND PREPARATION FOR REALIZATION OF A NEW HIGH-PRECISION LASER MEASUREMENT SYSTEM

The report deals with the problems concerning development, creation and utilisation of a new scanning laser system, designed for ranging measurements of lateral shift of large size engineering objects in two coordinates.

Строительство уникальных инженерных сооружений, высокоскоростных автомобильных и железнодорожных трасс и необходимость их геодезического контроля при эксплуатации, а также создание земельных и городских кадастровых планов требуют широкого внедрения новых эффективных измерительных методов и средств, повышающих производительность и точность инженерно-геодезических работ, а также проведение мониторинговых измерений.

В настоящее время в России парк современных геодезических средств измерений пополняется, в основном, приборами импортируемыми из передовых зарубежных государств: США, Японии, Германии, Франции, Швейцарии, КНР и др.

К таким приборам, в первую очередь, относятся высокоточные цифровые тахеометры и лазерные сканеры фирм: Leica, Topcon, Trimbl, Optech, Jena Instrument и др.

Наиболее крупные Российские предприятия, выпускающие геодезические приборы – «УОМЗ», «ЛОМО» и др. пытаются создать конкуренцию перечисленным иностранным фирмам. В тоже время, исходя из экономических соображений, некоторые предприятия в последнее время прекратили выпуск приборов и занимаются, фактически, отверточной сборкой иностранного оборудования, например «ЭОМЗ» в основном, производит сборку приборов фирмы Leica.

Следует отметить, что стоимость иностранных приборов и их комплектующих очень высока в сравнении с отечественными. Например, цена

высокоточных цифровых тахеометров перечисленных иностранных фирм достигает 250 – 500 тысяч рублей и выше, а лазерных фотометрических сканеров – значительно выше.

МИИГАиК имеет большой опыт использования в инженерно-геодезической практике иностранных и отечественных геодезических приборов и обладает научным потенциалом по созданию современных методов и средств для проведения высокоточных инженерно-геодезических измерений. К сожалению, университет в настоящее время не располагает необходимой производственной базой для реализации имеющихся идей.

В МИИГАиК в течение нескольких лет (2004–2008) группа сотрудников кафедр: «Прикладной оптики», «Высшей геодезии», «Геодезии», «Фотограмметрии», «Информационных измерительных систем», «Высшей математики» и специалистов внешних организаций под руководством профессора Жилкина А.М, в инициативном порядке проводила научно-исследовательскую работу по созданию новых прецизионных методов и оптико-электронных средств для контроля и измерений деформаций крупных инженерных сооружений на основе современных принципов построения измерительных систем. В 2008 г. по приказу ректора университета сформирована лаборатория «Лазерных измерительных систем МИИГАиК», которая должна продолжить эту научно-исследовательскую работу.

В настоящее время создается несколько макетных образцов базового комплексного оборудования, лазерной измерительной системы (ЛИС), обеспечивающей погрешность измерения поперечных смещений не более 0.2мм на трассах длиной до 70м. Результаты работ докладывались на конференциях и опубликованы в печати.

Деятельность лаборатории по разработке ЛИС проводится по следующим направлениям:

1. Выбор оптимального варианта применяемого в ЛИС источника излучения;
2. Расчет оптимальной телескопической системы (ТС), формирующей референтный лазерный пучок (РП), исходя из длины измеряемой трасы;
3. Расчет необходимых оптических элементов (С) (разворачивающая призма);
4. Выбор двигателя для вращения сканатора (С);
5. Выбор фотоприемника (ФП) при определенной конструкции фотоэлектрической марки ФМ;
6. Выбор полупрозрачной отражающей поверхности (ППП), энергетический расчет;
7. Расчет конструкции фотоэлектрической марки ФМ;
8. Разработка электронных схем управления ФМ и С;
9. Разработка программы управления работой сканатора и ФМ и алгоритмов автоматической регистрации результатов измерений;
10. Разработка методики установки и юстировки выбранного варианта ЛИС.

Выбор источника излучения для ЛИС осуществлялся по следующим критериям: мощность, габариты, отношение размеров выходного диаметра пучка по осям X, Y, стоимость.

Расчет телескопической системы производился исходя из возможных минимальных параметров диаметров линз, с целью формирования оптимального диаметра референтного лазерного пучка.

Выбор двигателя осуществлялся по критериям: габариты, мощность, потребляемая энергия.

Фотоприемник (ФП) для регистрации сигналов поступающих с крест-анализатора определялся исходя из общей идеологической схемы и выбранной конструкции ЛИС.

В качестве полуотражающей поверхности (ППП) исследуется прозрачная пленка на лавсановой основе толщиной $0.1 \div 0.2$ мм. и показателем преломления $n = 1.64$, которая используется в картографическом производстве.

Для осуществления регистрации сигналов сформированных на крест-анализаторах каждой ИМ, а также для управления работой двигателя и сканатора в автоматическом режиме, разработаны электронные схемы, позволяющие осуществлять связь с ПЭВМ.

Разработано программное обеспечение для управления работой С и ФМ и алгоритмов автоматической регистрации результатов для створных измерений с помощью ЛИС на трассе измерений до 70м.

Разработана методика установки и юстировки выбранного варианта ЛИС на трассе.

Для наблюдения поперечных и вертикальных смещений, в системе предусмотрены активные марки – крест анализаторы (рис. 1).

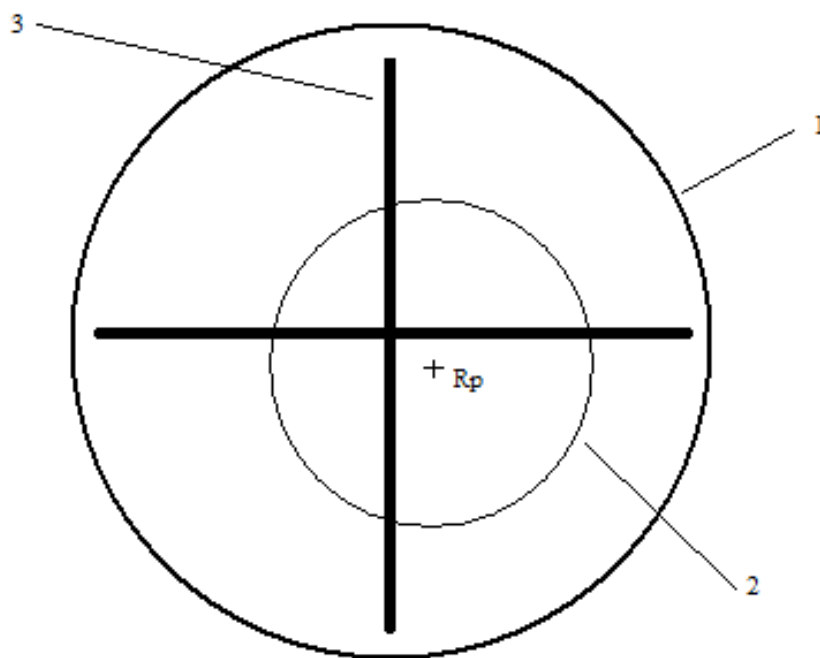


Рис. 1. 1 – марка; 2 – след лазерной круговой развертки; 3 – крест анализатор (щели)

Марка закрепляется на исследуемом объекте. Лазерная измерительная система (ЛИС) выставляется в створе марки. Так как совместить центр круговой развертки ЛИС с центром креста задача довольно сложная, то при первом приеме сканирования вычисляются координаты X_0, Y_0 точки R_p , помеченной на рис. 1 крестом, *в дальнейшем принимаемую за реперную точку начального положения объекта.*

В программном обеспечении ЛИС принята прямоугольная геодезическая система координат.

При каждом последующем запуске ЛИС, вычисляются координаты X_i, Y_i точки C_i , являющейся центром окружности следа лазерной круговой развертки в текущий момент времени (времени запуска ЛИС). По разности координат вычисляются смещения объекта.

$$\Delta X_i = X_i - X_{Rp}$$

$$\Delta Y_i = Y_i - Y_{Rp}$$

ЛИС снабжена датчиком угол-код, жестко связанным с валом электродвигателя оптического блока круговой развертки.

Данными для вычисления текущих координат центра круговой развертки являются:

- а) Код датчика;
- б) Длина радиус-вектора круговой развертки;
- в) Ответный импульс креста анализатора в момент прохождения пятна лазера через щель крест анализатора.

Обратимся к рис. 2.

Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены щели креста анализатора.

Через точку C_i проходит система координат XU круговой развертки. Через точку O проходит система координат креста анализатора.

du_1, du_2 - приращения координат центра круговой развертки относительно центра креста анализатора, вычисленные по меткам 1 и 3.

dx_2, dx_4 - приращения координат центра круговой развертки относительно центра креста анализатора, вычисленные по меткам 2 и 4.

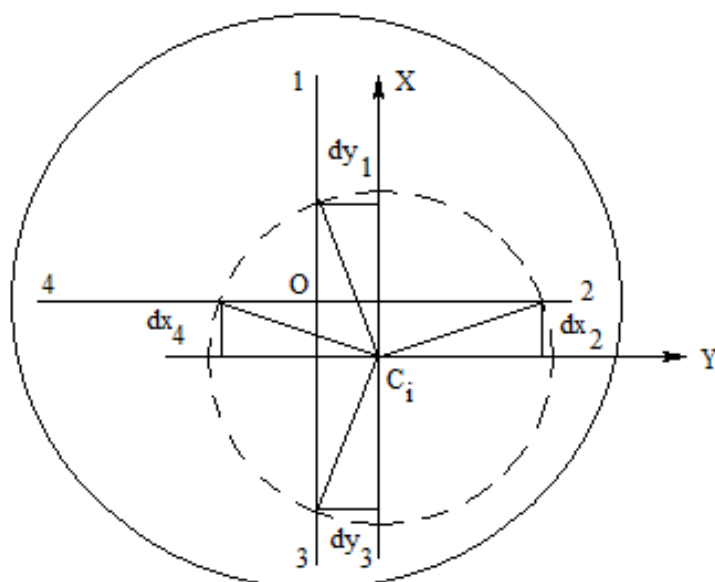


Рис. 2

Приращения вычисляются по формулам:

$$dx_i = R \cos(\varphi_i);$$

$$dy_i = R \sin(\varphi_i),$$

где R – радиус круговой развертки;

φ_i – значение угла развертки при пересечении щели креста анализатора.

Как видно из чертежа, приращения координат вычисляются дважды, по противоположным меткам. Регистрируются средние значения приращений.

Управление ЛИС осуществляется с удаленного компьютера через коммуникационный порт RS-232.

Порядок работы с программой.

1. При активации программы необходимо создать, или указать папку проекта исследуемого объекта.

2. Активировать ЛИС. В момент активации устанавливается связь с ЛИС, т.е. активируется коммуникационный порт RS-232. Подается команда на запуск двигателя, команда активации марки, команда включения лазера.

3. В течении трех секунд система работает в холостую. В данный промежуток времени выполняется контроль выполнения команд, а двигатель набирает стабильность оборотов.

4. Выполняется опрос датчика угол-код – прохождение нулевой точки. При получении отклика, выполняется последовательный опрос марки на положение лазерного пучка относительно креста-анализатора.

5. При пересечении щели креста-анализатора выполняется опрос датчика угол-код, значение датчика регистрируется.

6. Четвертый и пятый пункты выполняются в цикле, который задается в начале работы над проектом. Один цикл соответствует опросу четырех щелей креста-анализатора, т. е. выполнению полного оборота круговой развертки.

7. По окончании опроса марки, Вычисляются координаты центра круговой развертки. Выполняется контроль на сходимость координат. Если

контроль сошелся, вычисляется математическое ожидание координат центра развертки и выполняется оценка точности полученных координат по внутренней сходимости. Исследуемая марка выключается и активируется следующая марка. Выполняются действия описанные в пунктах 4,5,6. И т.д., пока не будет исследована последняя заданная марка.

8. Если контроль на внутреннюю сходимость не выполняется, измерения текущей марки повторяются заново.

9. По окончании работы, система автоматически выключается и переходит в режим ожидания следующего запуска. Запуск программы может осуществляться вручную, или автоматически, по установленному таймеру. Данные по маркам сохраняются в файле проекта. При этом, измерения сопровождаются датой и временем запуска ЛИС.

В апреле – мае 2008 года произвели пробное натурное испытание ЛИС на строящемся объекте фирмы «Группа компаний ВАДИС». Объект представлял собой ангар (70 м), крышу которого подпирали стальные колонны (12 м). Исследовалось поведение колонн. Результаты исследований подтверждают технические характеристики приведенные в рекламном обзоре ЛИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Апенко М.И., Дубовик А.С., Дурейко Г.В., Жилкин А.М. Прикладная оптика. – М.: «Машиностроение», 1992. – 480 с., гл. 23, 24.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М. «Машиностроение», 1989. – С. 155–158.
3. Климков Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. – М.: «Советское радио», 1978. – 264 с.
4. Авхадеев В.Г., Жилкин А.М., Чугреев И.Г. и др. Развитие методов и средств измерений отклонений от прямолинейности объектов. Статья – М.: Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», 2008. – № 1 – С. 126–133.
5. Сможенков Н.Ф., Сергуниев Е.Г., Филин В.Н. Полимерные материалы картографическом производстве. – М.: Недра, 1978 – 133 с.
6. Авхадеев В.Г. Предварительные результаты исследования пластмассовых пленок, используемых в качестве поверхностей с частичным отражением. Статья – М. Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» – 2008. – № 6.
7. Жилкин А.М., Чугреев И.Г., Авхадеев В.Г. и др. Исследования, разработка и подготовка к коммерческой реализации лазерной прецизионной измерительной системы. Статья. Сборник статей по итогам научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 229-летию МИИГАиК. Выпуск 1. М., 2008. – С. 65–67.

*© И.Г. Чугреев, А.М. Жилкин, В.Г. Авхадеев, К.Н. Былинушкин,
И.М. Герасимов, П.И. Савостин, Е.П. Власенко, К.С. Федоров, 2009*

УДК 666.3: 666.11.01

Л.Б. Воробьёва

СГГА, Новосибирск

ИЗУЧЕНИЕ ВЫХОДА КОМПОНЕНТОВ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ В ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

L.B. Vorobieva

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA)

10 Plakhotnogo Ul., Novosibirsk, 630108, Russian Federation

A STUDY OF GOING OUT OF THE COMPONENTS OF SILICA GLASSES INTO THE WATER SOLUTIONS

The study has been made of the effect of composition of the glasses type $K_2O - PbO - SiO_2$ on the acid stability. It has been found that the stability of the low crown glasses depend the K_2O content of glass.

Целью настоящей работы являлось изучение выхода в кислые растворы одно- и двухвалентных катионов из структуры силикатных стёкол. Кислые растворы используются для формирования на полированной поверхности стеклянных изделий плёнок с более низким по отношению к матричному стеклу показателем преломления [1]. Растворы кислот являются фоновыми электролитами для используемых высокоэффективных полирующих суспензий [2].

В опытах использовались три марки силикатного стекла системы $K_2O - PbO - SiO_2$. Готовое стекло подвергалось грубому и тонкому отжигу. Состав стёкол приведён в табл. 1.

Таблица 1. Состав образцов стёкол

N стекла	Состав (по синтезу), мол %		
	K_2O	PbO	SiO_2
1	7,7	23,1	69,2
2	7,7	33,3	60
3	5,9	41,2	52,9

На диаграмме состояния трёхкомпонентной системы $K_2O - PbO - SiO_2$ все три стекла относятся к фазовому полю сложного силиката стекла с возможностью существования в этом поле бисиликата типа $PbO - 2SiO_2$.

Оценка выхода компонентов стекла в водный травящий раствор проводилась наиболее универсальными методами: по величине потери массы и анализу состава травящего раствора. Травление моделировалось на порошках стёкол приготовленных дроблением в шаровой мельнице с последующей классификацией на ситах. Средний размер частиц – 200 мкм.

Навеска порошка стекла в $0,4 \text{ см}^3$, предварительно промытого ацетоном и высушенного, помещалась в фильтр Шотта и доводилась до постоянной массы при температуре 120°C . Удельная поверхность приготовленного таким образом порошка соответствует $0,15 \text{ м}^2/\text{см}^3$ (по величине десорбированного аргона). Травление порошка проводилось из 10 мл раствора в течение 17 часов. По окончании травления стекло промывалось водой до отсутствия реакции на компоненты травящего раствора. Затем стекло в фильтре Шотта доводилось до постоянной массы при температуре 120°C . Разница в массе (Δm) является мерой разрушения поверхностного слоя стекла. Количества K_2O и PbO в травящем растворе определялись методом пламенной фотометрии.

В табл. 2 приведены результаты травления стёкол в растворах серной, хлорной, хлороводородной и азотной кислот.

Анализ приведённых результатов показывает, что химическая устойчивость стёкол № 1, 2, 3 резко уменьшается по сравнению с устойчивостью их в воде. При этом порядок расположения параметров, характеризующих химическую устойчивость в рассматриваемом ряду кислот для каждого стекла, показывает, что кислотоустойчивость стёкол в значительной мере обусловлена растворимостью образующихся поверхностных соединений калия и свинца. Данные о растворимости солей калия и свинца приведены в табл. 3.

Наибольшей кислотоустойчивостью все стёкла обладают в растворе H_2SO_4 . Образующийся мелкодисперсный осадок труднорастворимой соли PbSO_4 отлагается в порах поверхностного слоя и препятствует диффузии компонентов травящего раствора в глубину стекла. Это также способствует формированию более тонкопористой структуры, чем та, которая формируется в результате травления HClO_4 , HNO_3 и HCl . Подобное сдерживание разрушения стёкол в растворе H_2SO_4 на двух в одинаковой степени неустойчивых стёклах № 2 и № 3 проявляется в большей степени для стекла с большим содержанием PbO . Соотношение количеств покинувших стекло окислов показывает, что относительное количество перешедшего в раствор PbO не зависит от природы кислоты и составляет 56 мол. % от всей массы растворённого стекла. Щелочной компонент переходит в растворы HNO_3 и HClO_4 в одинаковом соотношении. Повышенный выход K_2O в раствор HCl происходит, возможно, из-за особенностей пептизации кремниевой кислоты. Отмеченные особенности разрушения стекла № 3 можно интерпретировать как подтверждение того, что устойчивость стекла № 3 полностью обуславливает PbO , который переходит в растворы HCl , HNO_3 и HClO_4 в количестве (относительно всей растворённой части стекла), не зависящем от аниона кислоты.

Для стекла № 2 увеличение массы перешедшего в раствор стекла (Δm) соответствует растворимости соответствующих солей K^+ . Уменьшение выхода PbO в раствор HCl в сравнении с раствором HNO_3 можно объяснить ограниченной растворимостью PbCl_2 . Двукратное превышение устойчивости стекла № 2 в HClO_4 над устойчивостью в HCl и HNO_3 (по величине Δm) происходит из-за малой растворимости перхлората калия. Содержание KClO_4 в

травящем растворе меньше количества необходимого для насыщения, но в порах поверхностного слоя, возможно, присутствует насыщенный раствор. Соотношение K_2O : PbO в растворе соответствует составу стекла. Таким образом, устойчивость стекла № 2 определяет щелочная компонента. Степень растворимости солей свинца влияет лишь на относительный выход PbO из стекла.

Таблица 2. Разрушение стекла в кислых растворах

№ стекла	Электролит, которым обрабатывалось стекло	Потеря массы Δm		Выход компонентов в стёкла в травящий раствор			
		10^3 г/0,4 см^3	Масса, %	РbO		K ₂ O	
				10^3 г/0,4 см^3	Мол. %	10^3 г/0,4 см^3	Мол. %
Стекло № 1	H ₂ O	–	–	Не обнаружено		0,04	–
	H ₂ SO ₄ , 0, 1н р-р	1,80	0,12	Не обнаружено		0,19	–
	HClO ₄ , 0, 1н р-р	2,92	0,19	2,38	36	0,20	6
	HCl, 0, 1н р-р	3,50	0,23	2,36	30	0,23	7
	HNO ₃ , 0, 1н р-р	4,47	0,29	3,05	31	0,27	6
Стекло № 2	H ₂ O	2,95	0,16	Не обнаружено			
	H ₂ SO ₄ , 0, 1н р-р	33,00	1,80	Не обнаружено			
	HClO ₄ , 0, 1н р-р	52,55	2,90	45,60	44	5,95	8
	HNO ₃ , 0, 1н р-р	90,00	5,00	68,00	40	6,05	9
	HCl, 0, 1н р-р	93,24	5,20	57,35	31	6,45	9
Стекло № 3	H ₂ O	1,50	0,07	Не обнаружено		0,02	2
	H ₂ SO ₄ , 0, 1н р-р	19,00	0,15	Не обнаружено		6,25	43
	HCl, 0, 1н р-р	51,54	2,57	49,50	56	9,06	24
	HNO ₃ , 0, 1н р-р	99,57	4,97	97,05	56	6,66	9
	HClO ₄ , 0, 1н р-р	101,00	5,15	101,00	57	6,88	9

Таблица 3. Растворимость солей K^+ и Pb^{2+} при 20 °С

Соли свинца			Соли калия		
Соль	ПР	Растворимость, г/100 мл	Соль	ПР	Растворимость, г/100 мл
$PbSO_4$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	K_2SO_4	–	10,0
$Pb(ClO_4)_2$	–	400,0	$KClO_4$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1,52
$PbCl_2$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,7	KCl	–	25,5
$Pb(NO_3)_2$	–	34,3	KNO_3	–	24,0

С учётом отмеченных особенностей устойчивость стёкол № 2 и № 3 практически одинакова. Устойчивость стекла № 1 согласуется с растворимостью солей K^+ и на порядок выше устойчивости стёкол № 2 и № 3.

Показано, что кислотоустойчивость стёкол состава $K_2O - PbO - SiO_2$ низкосвинцовых стёкол определяется содержанием K_2O . Стёкла с относительно высоким содержанием PbO одинаково кислотонеустойчивы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ястребов, Л.С., Погодаев, А.К., Добычин, Д.П. О влиянии состояния поверхности стекла на пористую структуру плёнок кислотного травления на нестойких стёклах. – Коллоидный журнал. – 1960. - т. XXII, вып. 2. – С. 243–246.
2. Воробьёва, Л.Б., Окатов, М.А. О связи между скоростью споллирования стекла и его составом на примере системы $K_2O - PbO - SiO_2$. – Оптико-механическая промышленность. – 1975. - № 6. – С. 26–27.

© Л.Б. Воробьёва, 2009