

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

X Международные научный конгресс и выставка

## ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

### **СибОптика-2014**

Т. 2

Сборник материалов

Новосибирск  
СГГА  
2014

УДК 535  
С26

Ответственные за выпуск:

Доктор экономических наук, доцент, директор ИОиОТ СГГА, Новосибирск  
*А. В. Шабурова*

Доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств  
и технологий СГГА, Новосибирск  
*В. С. Айрапетян*

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии  
и технологии оптического производства СГГА, Новосибирск  
*О. В. Минин*

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем  
и оптотехники СГГА, Новосибирск  
*Д. В. Чесноков*

Кандидат технических наук, доцент кафедры физики СГГА, Новосибирск  
*Ю. Ц. Батомункуев*

С26 Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля  
2014 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. ма-  
териалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 262 с.

ISBN 978-5-87693-718-6 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-716-2

ISBN 978-5-87693-697-4

В сборнике опубликованы материалы X Международного научного конгресса «Ин-  
терэкспо ГЕО-Сибирь-2014», представленные на Международной научной конференции  
«СибОптика-2014».

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 535

ISBN 978-5-87693-718-6 (т. 2)

ISBN 978-5-87693-716-2

ISBN 978-5-87693-697-4

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

Сборник включен в систему РИНЦ.

УДК 535.33

## **ПРИЗМА В МИРЕ ИМПУЛЬСОВ**

### ***Бронислав Сергеевич Могильницкий***

ФГАОУ АСМС, Новосибирский филиал, 630004, Россия, г. Новосибирск, ул. Революции, 36, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, тел. (383)210-07-75, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Геннадий Владимирович Шувалов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, и.о. директора, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Рассмотрена разрешающая способность призмы при освещении ее лазерными импульсами сверхкороткой длительности.

**Ключевые слова:** дисперсия света, сверхкороткие лазерные импульсы, синхронизация мод.

## **PRISM IN THE WORLD OF IMPULSES**

### ***Bronislav S. Mogilnitsky***

FGAOU ASMS, Novosibirsk branch, 630004, Russia, Novosibirsk, Revolyutsii St., 36, candidate of physical and mathematical sciences, head of the department, tel. (383)210-07-75, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru

### ***Igor V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Oleg V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph. D., professor of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Gennady V. Shuvalov***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Ph. D., acting director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Resolution of a prism is considered when lighting by its laser impulses of supershort duration.

**Key words:** light dispersion, supershort laser impulses, synchronizing the modes.

Призма как дисперсионный элемент является основой целого класса спектральных приборов: монохроматоров, спектрографов, спектрометров, спектрофотометров.

Одной из важнейших метрологических характеристик спектрального прибора является его разрешающая способность - способность оптического прибора воспроизводить изображение близко расположенных объектов. Теоретической разрешающей способностью спектрального прибора называют величину

$$\mathfrak{R} = \lambda / \delta\lambda = (v / \delta v), \quad (1)$$

где  $\lambda, (v)$ -среднее значение длины волны, (оптической частоты),  $\delta\lambda, (\delta v)$ - разность разрешаемых длин волн, (оптических частот) или аппаратная функция спектрального прибора. Аппаратная функция позволяет с единых позиций оценить предел разрешения любых спектральных приборов. Считается, что две спектральные линии находятся на пределе разрешения, если расстояние между их максимумами равно полуширине аппаратной функции. Ширина аппаратной функции является основной характеристикой спектрального прибора. Она определяет спектральное разрешение  $\delta\lambda$  и спектральную разрешающую способность  $\mathfrak{R} = \lambda / \delta\lambda$ . Чем шире аппаратная функция, тем хуже разрешение (и меньше  $\mathfrak{R}$ ), но больше поток излучения, пропускаемый прибором, т. е. больше оптический сигнал. Таким критерием особенно удобно пользоваться при экспериментальном определении разрешения спектрального прибора.

Стационарное излучение различных длин волн, падающих на призму, преломляется под разными углами. Угол преломления для каждой длины волны определяется величиной спектрального показателя преломления материала призмы  $n_\lambda$ . На выходе призмы формируется веер параллельных монохроматических пучков, со своим углом преломления (рис. 1).

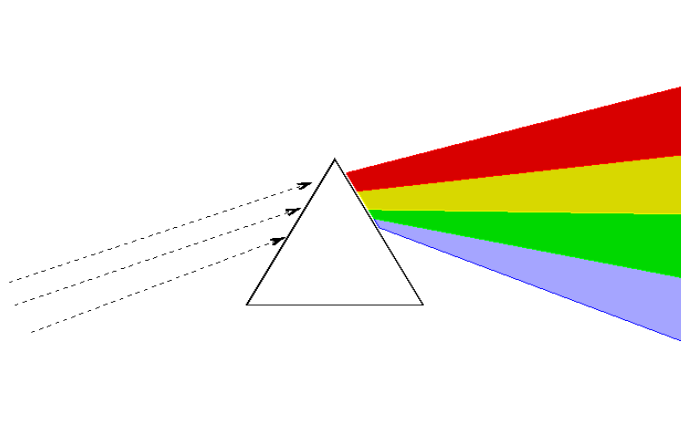


Рис. 1. Разложение света призмой в спектр монохроматических волн



Аппаратная функция призмы имеет вид [1]

$$A=I_{\lambda}/I_{0,\lambda}=\sin^2(\pi D \cdot \sin\beta/\lambda)/(\pi D \cdot \sin\beta), \quad (2)$$

где  $D$  - ширина пучка.

Аппаратная функция определяется дифракцией Фраунгофера, имеет гауссовскую форму и хорошо изучена.

Для характеристики призмных спектральных приборов используют понятие дисперсии материала как производную показателя преломления  $n$  по длине волны  $\lambda$ . Линейная дисперсия призмы связана с угловой как  $dI/d\lambda=f(d\beta/d\lambda)$  где  $dI$ - расстояние между двумя близкими спектральными линиями,  $d\beta$ - угол отклонения луча,  $f$ -фокусное расстояние выходного объектива. При симметричном ходе лучей в призме угловая дисперсия есть

$$d\beta/d\lambda = \{2\sin(\varphi/2)/[(1-n_{\lambda}^2)\sin^2(\varphi/2)]^{1/2}\} \cdot (dn_{\lambda}/d\lambda), \quad (3)$$

где  $\varphi$  - угол при вершине призмы,  $dn_{\lambda}/d\lambda$ - дисперсия материала призмы. Разрешающая способность призмы определяется выражением

$$\mathfrak{R} = a \cdot (dn_{\lambda}/d\lambda), \quad (4)$$

где  $a$  - размер основания призмы. Например, для призмы с  $a = 0.1$  м разрешающая способность составляет величину  $\mathfrak{R} = 10^4$ .

Как изменятся метрологические характеристики призмы при *импульсном* освещении?

Известно, что мир частоты и мир времени взаимно связаны. Согласно интегралу Фурье спектральные и временные характеристики равноправно отражают суть спектрально-временного процесса [2]. Для призмы эту связь можно представить в виде

$$\mathfrak{R}_t \cdot \mathfrak{R}_v = (\tau_n/\tau_0) \cdot a \cdot (dn_{\lambda}/d\lambda), \quad (5)$$

где  $dn_{\lambda}/d\lambda \sim 0.1$  мкм<sup>-1</sup> - коэффициент дисперсии стекла в видимой области спектра,  $\tau_n$  - длительность падающего импульса,  $a$  - размер основания призмы,  $\tau_0 = (a \cdot n)/c$  - время прохождения светом размера призмы,  $\mathfrak{R}_t = (\tau_n/\tau_0) \geq 1$  - параметр, характеризующий длительность временного взаимодействия светового потока с призмой, Для запуска дисперсии света в призме импульс должен «накрыть» временной интервал, соответствующий прохождению светового импульса через призму. Параметр  $\mathfrak{R}_t$  по важности вклада в (5) эквивалентен параметру спектральной разрешающей способности  $\mathfrak{R}_v$ . Призма, как нерезонансный элемент, не накладывает ограничения на длительность световых импульсов вплоть до фемтосекундного диапазона.

С началом дисперсии световых лучей в призме и выполнением условий по освещению  $\tau_n = \tau_0$  спектральная разрешающая способность определяется выражением

$$\mathfrak{R}_v = \tau_n \cdot (c/n_\lambda) \cdot (dn_\lambda/d\lambda), \quad (6)$$

и для  $n_\lambda = 1.5$  будет равна

$$\mathfrak{R}_v = \tau_n \cdot 2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Как видно, спектральная разрешающая способность призмы зависит от длительности освещающего импульса. Так, для наносекундного импульса ( $\tau_n = 10^{-9}$  с)  $\mathfrak{R}_v = 2 \cdot 10^4$ , для пикосекундного ( $\tau_n = 10^{-12}$  с) и  $\mathfrak{R}_v = 20$ . Для фемтосекундных импульсов ( $\tau_n = 10^{-15}$  с) спектральное разрешение утрачивает смысл из-за того, что такие временные интервалы ( $\sim 10^{-13} - 10^{-14}$  с) соответствуют времени резонансного взаимодействия света с атомами и молекулами среды. Запускается процесс резонансного формирования дисперсии в стеклах и кристаллах. Электроны в атоме – пленники своих ядер. Чем короче световая волна, тем выше вероятность ее попадания в резонанс с собственными частотами колебаний электронов. Электроны чаще будут поглощать и испускать фотоны определенной резонансной частоты, задерживая тем самым распространение света на этой частоте. Например, в стекле свет распространяется примерно на треть медленнее, чем в вакууме.

Механизм дисперсии является нелинейным в силу различия фазовой и групповой скоростей света в диспергируемых средах. При преломлении импульса на границе таких сред, плоскости равных фаз и равных амплитуд не совпадают. Появляется поперечное групповое запаздывание и преломленная волна становится неоднородной. Изменяется форма аппаратной функции диспергируемой среды. Появляется сильное временное уширение импульса (частотное сжатие) для нормальной дисперсии и, сильное временное сжатие (частотное уширение) импульса для аномальной дисперсии. Вследствие этого, происходит резкое искажение спектрального разрешения. Этот эффект для фемтосекундных импульсов очень существен, поскольку время запаздывания амплитудного фронта относительно фазового сравним с длительностью самого фемтосекундного импульса [2]. Поэтому, понятие разрешающей способности для фемтосекундных импульсов в начальной трактовке (1) теряет смысл.

Из (6) видно, что, при импульсном освещении из спектральной разрешающей способности, соответствующей стационарному освещению, исчез параметр “а”- размер основания призмы. Тем самым, понизилась ее разрешающая способность. Таким образом, при освещении призмы *одиночными* импульсами она теряет статус спектрального прибора в силу отсутствия дисперсии световых волн. Импульсу света *недостаточно* энергии для производства дисперсии в призме. Электрическое поле световой волны, согласно уравнениям Максвелла, воздействуя на электроны атомов, возбуждает их и теряет, при этом, часть своей энергии. Эти потери ослабляют дисперсию света в призме вплоть до его исчезновения.

Другая ситуация реализуется при освещении призмы синхронизованными сверхкороткими импульсами (СКИ), формируемыми лазерами на основе эф-

фекта синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы света в виде периодической последовательности импульсов нано-, пико- и фемтосекундной длительности генерируются лазерами. Причем, период следования когерентных импульсов определяется параметрами резонатора лазера. Если период следования импульсов  $T = 1/f = 2L/c$ , (где  $f = c/2L$  – частота следования,  $L$  - длина резонатора, а  $c$  - скорость света) выбрать равным длительности переходного процесса  $\tau_0$ , т.е.  $T=\tau_0$ , то разрешающая способность призмы в импульсном режиме освещения независимо от длительности СКИ вернется к уровню ее разрешения при стационарном освещении, поскольку в момент выхода светового импульса из призмы, на ее входе появляется точно такой же световой импульс. Происходит постоянная подпитка энергией механизма дисперсии. Призма возвращает себе статус спектрального прибора *с разрешающей способностью*, эквивалентной случаю стационарного освещения. Она становится спектральным прибором высокой разрешающей силы, что открывает хорошие возможности использования призмных устройств для анализа микро- и наносвойств пространства и времени. Для одиночных фемтосекундных импульсов, понятие спектрального разрешения для призмы не применимо.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. – М.: МГУ, 1977. – 384 с.
2. Ахманов С. А., Вислоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. – М.: Наука, 1988. – 312 с.

© Б. С. Могильницкий, И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, 2014

## **ОЦЕНИВАНИЕ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ГЛОНАСС**

*Александр Сергеевич Толстик*

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, доктор технических наук, начальник ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства СГГА, тел. (383)210-11-85, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

*Артем Андреевич Карауш*

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, научный сотрудник ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», тел. (383)210-11-85, e-mail: karaush.a@mail.ru

*Екатерина Андреевна Ханькова*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирантка кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: hanikovak@mail.ru

Важной задачей сегмента контроля и мониторинга системы ГЛОНАСС является оценивание текущих навигационных параметров спутников и величин уходов их бортовых шкал времени. В данной работе рассматривается возможность повышения точности таких оценок за счёт привлечения фазовых псевдодальномерных измерений.

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС-технологии, координатно-временные определения, частотно-временные поправки, орбиты навигационных спутников.

## **EVALUATION EPHEMERIS AND TIME PARAMETERS OF THE GLONASS CONSTELLATION**

*Aleksandr S. Tolstikov*

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Pr., Ph. D., Prof. of Department Metrology and Optical Production Technology SSGA, tel. (383)210-11-85, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

*Artem A. Karaush*

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova Pr., Scientist, tel. (383)210-11-85, e-mail: karaush.a@mail.ru

*Ekaterina A. Hanikova*

Siberian State Academy of Geodesy, 10 Plakhotnogo, Russia, Novosibirsk, 630108, Graduate of Department Metrology and Optical Production Technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: hanikovak@mail.ru

An important task of monitoring and control segment of GLONASS is the estimation of the current orbital and timescale parameters of navigation satellites. In this paper we consider the possibility of increasing the accuracy of such estimates by using pseudo-range phase measurements.

**Key words:** GLONASS technology, coordinate and time definition, time-frequency correction, navigation satellite orbits.

Для системы ГЛОНАСС проблема высокоточного эфемеридно-временного обеспечения имеет ключевое значение. Качество эфемеридно-временной информации, передаваемой в составе навигационного сигнала, является ключевой характеристикой, влияющей на точность определения координат и параметров движения потребителя, а также воспроизведения времени на основе применения спутниковых навигационных технологий. Эфемеридно-временная информация представляет собой прогнозы параметров движения навигационных спутников (НС) и уходов бортовых шкал времени.

Необходимость в высокоточных эфемеридно-временных определениях вызвана тем, что погрешности, вносимые уходами бортовых шкал времени и отклонениями траектории движения НС, вносят существенное влияние на результаты навигационных измерений. В связи с этим, одним из необходимых условий выполнения координатно-временных задач является обеспечение орбитальной группировки ГЛОНАСС точными эфемеридами и поправками бортовых шкал времени.

Рассматриваемые алгоритмы должны обеспечивать оценивание текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС и уходов шкал времени этих спутников в условиях решения задачи формирования эфемеридно-временной информации в наземном сегменте эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) СНС ГЛОНАСС [1].

#### ОЦЕНИВАНИЕ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

При формировании указанной эфемеридно-временной информации требуется в максимальной степени учитывать действующие на НС возмущения и компенсировать влияние на результаты траекторных измерений

- уходов бортовых часов относительно момента шкалы времени системы,
- изменений ПВЗ,
- изменения задержки навигационного сигнала в тропосферном и ионосферном слоях.

Синтез алгоритмов оценивания текущих навигационных параметров спутников строится на основе общего подхода к решению задач координатно-временных определений (КВО). В соответствии с этим общим подходом формируется описание расширенного динамического объекта, включающее в себя:

- математическую модель движения навигационного спутника в виде дифференциального уравнения,
- неопределенные параметры согласующей математической модели радиационного давления на спутник солнечного излучения,
- математическую модель ухода бортовых часов в виде дифференциального уравнения и неопределенные параметры нестабильности этих часов,
- влияние ионосферы на скорость распространения сигнала от НС до потребителя,
- неопределенный параметр влажной составляющей тропосферной задержки навигационного сигнала [1].

Задача оценивания текущих навигационных параметров спутников ГЛОНАСС в условиях параметрической неопределенности сводится к оцениванию вектора состояния указанного расширенного объекта. В качестве исходных данных для оценивания вектора состояния используются данные псевдодальномерных измерений для относительного движения спутника вдоль опорной траектории. Эта опорная траектория рассчитывается на основе бортовой эфемеридной информации.

### МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ НС

Для высокоточного прогнозирования движения навигационного спутника (НС) и для расчета на этой основе соответствующих эфемерид используется описание движения в кинематических элементах

$$u''(t) = -\frac{\mu}{\rho^3(t)} \cdot u(t) + \sum_{i=1}^5 s_i(t), \quad u(t_0) = u_0, \quad u'(t_0) = u'_0 \quad (1)$$

где  $u^T(t) = [x(t), y(t), z(t)]$  – вектор текущих координат НС в квазиинерциальной системе координат (ИСК);  $\rho(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$  – текущий радиус орбиты НС;  $\mu$  – геоцентрическая постоянная гравитационного поля Земли;  $s_i(t)$  – вектор действующих на НС возмущений;  $i=1$  – от несферичности гравитационного поля Земли;  $i=2,3$  – от гравитационного воздействия на НС Луны и Солнца;  $i=4$  – от радиационного давления на НС солнечного излучения.

Возмущения  $s_i(t), i=1, \dots, 4$  образуют группу моделируемых возмущений, которые с той или иной точностью могут быть представлены соответствующими математическими моделями и учтены при расчете орбитального движения НС.

$i=5$  – немоделируемые возмущения случайной природы, для которых в лучшем случае могут быть получены статистические характеристики.

Возмущения  $s_i(t)$  приводятся к центру масс НС в объектоцентрической системе координат и преобразуются в ИСК с помощью известных матричных преобразований [2].

### МОДЕЛИ УХОДОВ БОРТОВЫХ ЧАСОВ

Также для адекватного решения КВО потребителя шкалы времени НС и приёмной аппаратуры должны быть синхронизированы с высокой точностью с системной шкалой времени. Уходы бортовых часов компенсируются частотно-временными поправками (ЧВП). Значения ЧВП являются прогнозами уходов бортовых часов и затем транслируются в составе навигационного сигнала потребителю. Процесс расчета ЧВП включает в себя идентификацию математических моделей применяемых часов, прогнозирование уходов часов с помощью этих математических моделей и проверку адекватности полученных математических моделей. Для расчета компенсирующей поправки используют математическую модель нестабильности часов в виде дифференциального уравнения

$$\Delta T'_c(t) = S(t) + w(t), \Delta T_c(t_0) = \Delta T_{c0}, \quad (2)$$

связывающего уход шкалы времени бортовых часов  $\Delta T_c(t)$  на интервале времени  $[t_0, t_k]$  и характеристики долговременной  $S(t)$  и кратковременной  $w(t)$  нестабильностей частоты генератора этих часов [3].

Схема оценивания вектора начальных условий расширенного динамического объекта строится на основе уравнения измерений, которое связывает значения измеренных псевдодальностей с геометрическими дальностями и с рядом влияющих факторов, в число которых входят погрешности ЭВИ.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПСЕВДОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Исходными данными для оценивания эфемеридно-временных параметров являются результаты беззапросных дальномерных измерений. Беззапросные измерения подразделяются на кодовые и фазовые.

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c + \tau_{ion}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^N p_{Di}(t) \quad (3)$$

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c - \tau_{ion}(t) \cdot c + K \cdot \lambda + \sum_{i=1}^N p_{\varphi i}(t) \quad (4)$$

где  $D(t)$  и  $\varphi(t)$  – измеренные на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну кодовые и фазовые псевдодальности, выраженные в единицах длины;  $\rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) = \sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2 + (z_S - z_R)^2}$  – геометрическая дальность от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя;  $\mathbf{u}_S^T = (x_S, y_S, z_S)$  – вектор координат НС ГЛОНАСС в системе координат ПЗ-90;  $\mathbf{u}_R^T = (x_R, y_R, z_R)$  – вектор координат антенного модуля потребителя;  $\Delta T_{SR}(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)$  – суммарное расхождение бортовой и наземной шкал относительно системного времени;  $\lambda$  – длина волны несущей с литерной частотой, на которой передается навигационный сигнал;  $K$  – целое неопределённое число длин волн, укладываемых в измеренном расстоянии;  $c$  – скорость распространения навигационного сигнала в вакууме;  $\tau_{ion}(t) \cdot c$  – задержка навигационного сигнала в ионосферном слое;  $\sum_{i=1}^N p_i(t)$  – факторы, влияющие на точность псевдодальномерных измерений, к которым относятся выраженные в единицах длины задержки навигационного сигнала в тропосферном слое, поправки за релятивистские эффекты, смещения фазовых центров антенных модулей, аномальные значения, связанные с многолучевостью распространения навигационного сигнала, неучтенные задержки в радиотрактах передающей и приемной аппаратуры, погрешности измерений и другие факторы [1].

Хотя фазовые измерения имеют точность, на порядки превышающую точность кодовых измерений, для их использования в целях решения задач оценивания эфемеридно-временных параметров требуется сложная и затратная по ресурсам предварительная обработка. Это связано с присущей фазовым измерениям неоднозначностью, которую требуется разрешать. Кодовые и фазовые измерения отличаются на постоянную величину неоднозначности фазовых измерений и удвоенную величину ионосферной погрешности измерений.

Высокоточная оценка эфемеридно-временных параметров принципиально возможна только по двухчастотным кодовым и фазовым измерениям, поскольку только так можно рассчитать влияние ионосферы на навигационный сигнал с высокой точностью. Оценивание величины ионосферной погрешности осуществляется путем формирования линейной комбинации дальномерных измерений на частотах  $L1$  и  $L2$ . Однако следует учитывать, что при формировании такой линейной комбинации шум измерений увеличивается втрое. Кроме того, ионосферная погрешность имеет разный знак для кодовых и фазовых измерений.

Для высокоточного оценивания эфемеридно-временных параметров одночастотные измерения не пригодны в силу присущих им существенных недостатков – невозможности оценивания ионосферной погрешности с требуемым уровнем точности.

Алгоритмы обработки с использованием кодовых и фазовых измерений намного сложнее, чем при использовании только кодовых данных. Это связано с тем, что при непосредственной обработке фазовых измерений не допускается наличие никаких пропусков циклов. При использовании фазовых данных возникают дополнительные особенности, требующие внимания. Во-первых, при обработке этих измерений не допускается наличие пропусков циклов, во-вторых, размерность задачи увеличивается за счет необходимости уточнения неоднозначностей [4].

Наиболее эффективным способом, нашедшем применение среди специалистов в области высокоточных ЭВО, являются дифференциальные методы, базирующиеся на определении разности фаз несущих колебаний, а не абсолютных значений [5]. Различают первые, вторые и третьи разности, за счёт образования которых существует возможность определения величины  $N$  и расстояния на основе фазовых измерений. Наибольшее прикладное распространение при выполнении высокоточных измерений приобрёл метод, основанный на использовании результатов фазовых измерений двух приёмников, с помощью которых наблюдаются не менее двух навигационных спутников. При образовании вторых разностей из результатов измерений исключаются систематические погрешности уходов часов НС и часов потребителя, а разрешение фазовой неоднозначности достигается с помощью обработки разностей специальными алгоритмами. Наибольшее распространение получили геометрические методы с поиском в пространстве неоднозначностей, такие как быстрый поиск FASF, метод LAMBDA и другие [5].



Разрешённые от неоднозначностей разностные фазовые измерения являются исходными данными для решения задач оценивания эфемеридно-временных параметров НС ГЛОНАСС.

Описанные методы могут быть использованы для высокоточного оценивания эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС. Выполнение указанных в работе условий при обработке псевдодальномерных измерений позволяет повысить оперативность и достоверность выполняемых оценок.

В заключении необходимо отметить, что развитие тематики оценивания эфемеридно-временных параметров навигационных спутников связано с привлечением данных фазовых дальномерных измерений, совершенствованием методов предварительной обработки таких измерений, а также разработкой более точных моделей влияющих факторов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толстиков А. С. Методы и алгоритмы координатно-временных определений на основе применения спутниковых навигационных технологий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Толстиков Александр Сергеевич. – Новосибирск, НГТУ, 2011. – 318 с.

2. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников земли. Томск: Изд-во Том.ун-та, 2007. – 178 с.

3. О влиянии нестабильности часов на точность координатно-временных определений спутниковых навигационных технологий / Е. А. Ханькова, А. С. Толстиков, А. С. Томилов, А. Р. Безродных, Э. О. Непомнящая // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 36–40.

4. Генике А. А., Побединский Г. Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применения в геодезии. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 335с.: ил.

5. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография. В 2 т. Т 2. – М.: Картгеоцентр, 2005. – 360 с.

© А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова, 2014

## **О РАЗРЕШЕНИИ ИМПУЛЬСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ**

### ***Бронислав Сергеевич Могильницкий***

ФГАОУ АСМС, Новосибирский филиал, 630004, Россия, г. Новосибирск, ул. Революции, 36, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, тел. (383)210-07-75, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плехотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плехотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Геннадий Владимирович Шувалов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, и.о. директора, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

При освещении спектрометра одиночными лазерными импульсами разрешающая способность Фурье-спектрометра низкая из-за отсутствия явления многоволновой интерференции. При освещении «синхронизованными» лазерными импульсами разрешающая способность Фурье-спектрометра восстанавливается до уровня стационарного освещения.

**Ключевые слова:** Фурье-спектрометр, синхронизованные лазерные импульсы.

## **ABOUT PULSE FOURIER SPECTROSCOPY PERMISSION**

### ***Bronislav S. Mogilnitsky***

FGAOU ASMS, Novosibirsk branch, 630004, Russia, Novosibirsk, Revolyutsii St., 36, head of the department, candidate of physical and mathematical sciences, tel. (383)210-07-75, e-mail: ats3300-106-45@yandex.ru

### ***Igor V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department "Metrology and Technology of Optical Production" chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Oleg V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Dr.Sci.Tech., professor of "Metrology and Technology of Optical Production" chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Gennady V. Shuvalov***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand.Tech.Sci. of sciences, acting director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

At illumination of a spectrometer by single laser impulses resolution of Fourier spectrometer low due to the lack of the phenomenon of a multiwave interference. When lighting by the "synchronized" laser impulses resolution of Fourier spectrometer is restored to level of stationary lighting.

**Key words:** Fourier spectrometer, the synchronized laser impulses.

Интерференционная спектроскопия с преобразованием Фурье оформилась как научное направление во второй половине XX века. Широкое распространение этого уникального метода обусловлено развитием вычислительной техники. Фурье-спектрометры обеспечили резкое повышение спектрального разрешения, информативность и скорость получения информации. Эта технология нашла широкое применение в задачах атмосферной оптики, в области исследования биологических объектов, газовых и жидких сред, и др.

Работа Фурье-спектрометра основана на принципах двухлучевой интерферометрии (интерферометр Майкельсона). Источником спектроскопической информации является интерференционная картина, формируемая при сканировании одного из зеркал интерферометра. Освещенность приемника, а значит, и регистрируемый сигнал меняется синусоидально вследствие сканирования образовавшейся интерференционной картины (рис. 1) [\*].

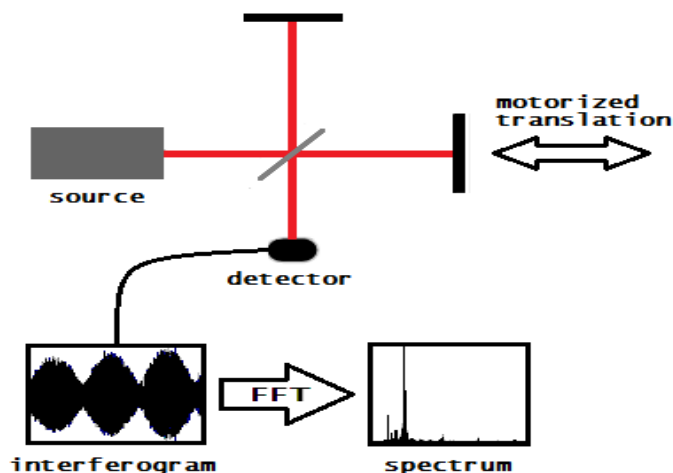


Рис. 1. Современный Фурье-спектрометр

Важнейшей метрологической характеристикой Фурье-спектрометра является его разрешающая способность

$$\mathcal{R} = \lambda / \delta\lambda,$$

где  $\lambda$  - длина волны света,  $\delta\lambda$  - аппаратная функция, определяемая преобразованиями Фурье-спектрометра при конечной разности хода  $L$ . Другими словами, аппаратная функция Фурье -спектрометра - это наблюдаемое распределение спектральной интенсивности на выходе прибора, если на вход поступает строго

монохроматическое излучение. Ширина аппаратной функции определяет разрешающую способность Фурье-спектрометра. Например, ширина аппаратной функции Фурье-спектрометра при треугольной апподизации равна  $\delta\lambda \sim \lambda^2/2L$ , где  $2L$  - длина сканирования зеркала [1]. Тогда разрешающая способность определяется как  $\mathfrak{R} = 2L/\lambda$  и для  $L = 0.1$  м,  $\lambda = 10^{-6}$  м будет равна  $\mathfrak{R} = 2 \cdot 10^5$ . Основные метрологические характеристики Фурье - спектрометров детально изучены с разных точек зрения в режиме стационарного освещения. Как изменится разрешение Фурье-спектрметра при освещении его *импульсным* излучением?

Известно, что импульсный сигнал имеет однозначное соответствие между спектральными и временными составляющими. Согласно интегралу Фурье спектральные и временные характеристики равноправно отражают суть спектрально-временного процесса [2]. Для *моноимпульсного* излучения, освещающего Фурье-спектрометр, это соответствие можно записать

$$\mathfrak{R}_\lambda \cdot \mathfrak{R}_t = \tau_n / \lambda ,$$

как произведение частоты света на длительность импульса (здесь частота света представлена в терминах пространственных частот, т.е.  $\nu = 1/\lambda$ ), где  $\mathfrak{R}_\lambda$  - спектральный параметр,  $\mathfrak{R}_t$  - временной параметр.

Параметр  $\mathfrak{R}_t = \tau_n/\tau_0$ , где  $\tau_n$  - длительность импульса света,  $\tau_0 = 2L/c = 1/\delta\nu$  - время прохождения светом длины пространственного сканирования зеркала - время переходного процесса, определяет работу Фурье-спектрометра. При  $\mathfrak{R}_t = \tau_n/\tau_0 > 1$  в Фурье-спектрометре организуется интерференция. Это соответствует ситуации, когда длительность импульса “накрывает” время переходного процесса. При  $\mathfrak{R}_t < 1$  в Фурье-спектрометре интерференция не формируется. Здесь отметим, что при освещении импульсом света на выходе спектрометра формируются два импульса, разделенных временем  $\tau_0$ . Оценим время переходного процесса  $\tau_0$ . Оно определяется величиной пространственной длины сканирования зеркала. Так, для  $L = 0.1$  м  $\tau_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  с, а при  $L = 0.01$  м  $\tau_0 = 3 \cdot 10^{-11}$  с.

Отсюда следует, что импульсы для Фурье-спектрометра ограничиваются пикосекундным диапазоном длительностей. Для его работы должно выполняться условие  $\tau_n > \tau_0$ . Фемтосекундные импульсы для Фурье-спектрометров *непригодны* вследствие того, что для них необходима ничтожно малая амплитуда пространственного сканирования зеркала спектрометра. Например, при  $\tau_n = 10^{-14}$  с (10 фемтосекунд) длина сканирования должна составлять  $2L = 3 \cdot 10^{-6}$  м, т.е. всего 3 мкм, что технически трудно реализуемо.

С момента начала интерференции, когда выполняется условие  $\mathfrak{R}_t = 1$ , спектральная разрешающая способность Фурье-спектрометра становится равной  $\mathfrak{R}_\lambda = 1/\lambda$ , т.е. существенно понижается. Это означает, что при освещении Фурье-спектрометра *одиночными* импульсами, многоволновая интерференция не формируется. Аппаратная функция Фурье-спектрометра сильно уширяется. В этом случае Фурье-спектрометр не в состоянии образовать интерференцию вследствие дефицита времени и световой энергии в импульсе. В случае  $\mathfrak{R}_t > 1$  спектральная

разрешающая способность определяется выражением  $\mathfrak{R}_\lambda = \tau_0 / \lambda = \tau_0 \cdot \nu$  и при  $\nu = 3 \cdot 10^{11}$   $\mathfrak{R}_\lambda \cong 1$ , т.е. спектральное разрешение практически теряет смысл.

Другая ситуация при *синхронизованном* лазерном импульсном освещении. При равенстве периода следования импульсов  $T = 2d/c$ , ( $d$  - база резонатора импульсного лазера) времени установления интерференции в Фурье-спектрометре  $\tau_0$  т.е.  $T = \tau_0$ , разрешающая способность его *восстанавливается* до прежнего уровня, соответствующего стационарному освещению. Происходит постоянная подпитка световой энергией процесса интерференции в Фурье-спектрометре. В момент окончания освещенности Фурье - спектрометра импульсом на входе плеч интерферометра появляется следующий такой же импульс. Происходит процесс непрерывного освещения Фурье-спектрометра и его разрешающая способность *восстанавливается* до уровня стационарной освещенности.

Синхронизованные лазерные импульсы формируются методом синхронизации мод. Технология производства таких лазеров в настоящее время хорошо отработана. Имея возможность перестройки базы резонатора такого лазера, мы можем всегда организовать синхронизованное когерентное освещение Фурье-спектрометра. Синхронизованное освещение *не ограничивает длительность* сверхкоротких импульсов, организующих интерференцию в Фурье-спектрометре [3].

Сравнительно недавно появился метод импульсной терагерцовой спектроскопии (ТГС). Для генерации терагерцового излучения ( $3 \text{ см}^{-1} \div 100 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует диапазону частот  $3 \cdot 10^{11} \text{ Гц} \div 3 \cdot 10^{13} \text{ Гц}$ ) используются дипольные антенны [4, 5] и нелинейные кристаллы [6, 7] на эффекте оптического выпрямления. Для когерентного детектирования используются нелинейные кристаллы на электрооптическом эффекте [8]. Технология исследований в ТГС основана на синхронизованной последовательности импульсов зондирования и обладает особенностями, описанными выше.

Таким образом, при освещении Фурье-спектрометра *одиночными* импульсами его разрешение *низкое* из-за отсутствия многоволнового интерференционного эффекта. При освещении *синхронизованными* лазерными импульсами, разрешение Фурье-спектрометра *восстанавливается* до уровня разрешения, соответствующего стационарному освещению. Эту особенность необходимо учитывать при проведении прецизионных спектроскопических исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. В. Лебедева. Техника оптической спектроскопии. М.: Наука, 1977. с.384.
2. С. А. Ахманов, В. А. Вислоух, А. С. Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. – М.: Наука.1988. с. 312.
3. Mogilnitsky B.S., Ponomarev Ju.N. Fabry-Perot Interferometer in the World of Pulses: New Approaches and Capabilities // Atmospheric and Oceanic Optics. 2009. Vol.22. № 5. P.544-550.
4. J.Kind, C.Schmittenmaer. Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy // J. Phys. Chem. 1996. Vol.100. P.10373.
5. I. Morino, K. Yamada, A. Maki. Terahertz measurement of rotational transitions in vibrationally excited states of  $\text{N}_2\text{O}$  // J. Of Molekular Spectroskopy. 1999. Vol. 196. P. 131.

6. Y. Ding, I. Zotova. Second-order nonlinear optical materials for efficient generation and amplification of temporally-coherent and narrow-linewidth terahertz waves // Opt. and Quant Electr. 2000. V. 32. P. 531.

7. A. Rice, Y. Jin, X. F. Ma, X.- C. Zhang. Terahertz optical rectification from <110> zinc-blend crystals // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. P.1324.

8. Q. Wu, X.-C. Zhang. Free-space electro-optics sampling of terahertz beams. // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. P.3523.

[\*]. Answers.com

© Б. С. Могильницкий, И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов, 2014

## **РАДИАЦИОННО-КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК**

***Надежда Анатольевна Вихарева***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: milana-maria@mail.ru

***Виктор Яковлевич Черепанов***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Рассмотрена возможность экспериментального уточнения значений реперных точек температурной шкалы с использованием адиабатического теплового излучателя.

**Ключевые слова:** единица температуры, температурная шкала, реперная точка, абсолютно черное тело, радиационно-калориметрический метод.

## **A RADIATION-COLORIMETRIC METHOD DEFINITIONS THERMODYNAMIC TEMPERATURE REFERENCE POINTS**

***Nadegda A. Vikhareva***

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotnogo St., 10, cand. tech. sci, senior teacher of Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: milana-maria@mail.ru

***Victor Ya. Cherepanov***

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotny St., 10, Dr.Sci.Tech., professor of Metrology and Technology of Optical Production, tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The possibility of experimental refinement of the reference points of the temperature scale using adiabatic heat emitter.

**Key words:** unit of temperature, temperature scale, reference point, the absolutely black body, a radiation-colorimetric method.

В настоящее время под эгидой Международного комитета по мерам и весам ведутся работы по подготовке новых определений четырех основных единиц Международной системы СИ (килограмма, ампера, кельвина и моля) через универсальные физические константы. Основная цель таких переопределений – устранить зависимость основных единиц от свойств какого-либо конкретного образца, материала или изделия.

Для нового определения кельвина предлагается использовать фиксированное значение постоянной Больцмана, которая связывает эту единицу с единицей энергии. Это позволит уйти от фиксации значения, приписанного в настоя-

щее время температуре тройной точке воды, которое в действительности зависит от технологии изготовления и использования сосудов, в которых реализуется эта главная реперная точка температурной шкалы. Поэтому сейчас ведётся активное уточнение константы Больцмана, в результате которого последует принятие новой Международной температурной шкалы, основанной на уточнённых значениях температуры реперных точек.

В данной работе проанализирована возможность уточнения этих значений методом радиационной калориметрии. Подобный метод ранее [1-3] было предложено использовать для уточнения постоянной Больцмана. Он основан на законе Стефана-Больцмана, устанавливающего связь плотности радиационного теплового потока  $q_A$ , испускаемого абсолютно черным телом (АЧТ), с его термодинамической температурой  $T_A$ .

$$q_A = \sigma(T_A^4 - T_0^4). \quad (1)$$

Уравнение измерений температуры излучающей полости имеет при этом вид

$$T_A = \left( \frac{q}{\sigma} + T_0^4 \right)^{1/4}. \quad (2)$$

Принципиальная схема реализации метода приведена на рис. 1. Излучатель 1 в виде модели АЧТ снабжен электрическим нагревателем 2. Полость излучателя снабжена отверстием 3 с площадью  $S$  поперечного сечения. Излучатель покрыт эффективной экранно-вакуумной теплоизоляцией 4. Внешняя поверхность теплоизоляции контактирует с оболочкой 5, помещенной в среду чистого вещества 6, находящегося при температуре  $T_R$  фазового перехода одной из реперных точек температурной шкалы. Излучение полости модели АЧТ в виде теплового потока плотностью  $q$  направлено через отверстие 3 в другую полость 7, температура  $T_0$  которой значительно ниже. Излучающая и поглощающая полости находятся в вакууме.

При выключенном нагревателе температура излучающей полости ниже температуры  $T_R$  реперной точки. Регулируя мощность нагревателя, можно подобрать такое её значение  $P_A$ , при котором наступит равенство значений температуры  $T_A$  излучающей полости и температуры реперной точки. Уравнение баланса тепловых потоков для излучателя в этом случае имеет вид [4]:

$$P_A = q_A S + Q_\lambda(T_A, T_R, \lambda_1, \lambda_2, F_1, F_2) + \frac{C_A dT_A}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $Q_\lambda(T_A, T_R, \lambda_1, \lambda_2, F_1, F_2)$  – остаточный тепловой поток между излучателем и оболочкой;  $\lambda_1, \lambda_2$  – значения теплопроводности теплоизоляции, а также тепло-



проводности токоподводящих и измерительных проводников;  $F_1$ ,  $F_2$  – площади поверхности излучателя и оболочки;  $C_A$  – полная теплоемкость излучателя,  $dT_A/d\tau$  – скорость изменения его температуры.

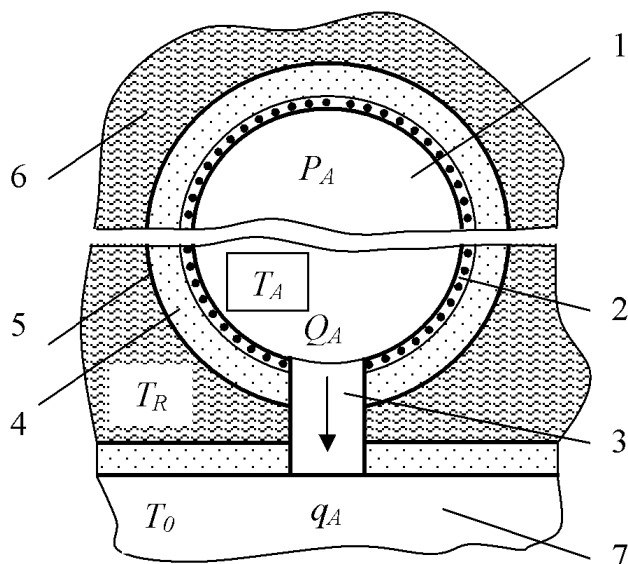


Рис. 1. Принципиальная схема реализации радиационно-калориметрического метода:

1 – излучатель; 2 – электрический нагреватель; 3 – отверстие; 4 – теплоизоляция; 5 – оболочка; 6 – чистое вещество; 7 – поглощающая полость

Как принято в адиабатической калориметрии [5], тепловой поток  $Q_\lambda$  сводится к минимуму благодаря тому, что температура  $T_A$  поддерживается максимально близкой к значению температуры  $T_R$  оболочки путем подбора мощности нагревателя. В этом случае второе слагаемое в правой части уравнения (3) определяет степень соблюдения условия адиабатичности, а третье – условия стационарности теплового режима излучателя.

Остаточный тепловой поток  $Q_\lambda$  между излучателем и оболочкой, когда  $\Delta T = T_A - T_R \rightarrow 0$ , является суммой теплового потока  $Q_{\lambda_1}$  по теплоизоляции излучателя и теплового потока  $Q_{\lambda_2}$  по измерительным и токоподводящим проводникам:  $Q_\lambda = Q_{\lambda_1} + Q_{\lambda_2}$ , где

$$Q_{\lambda_1} = F_1 \Delta T \lambda_1 / d; \quad Q_{\lambda_2} = F_2 \Delta T \lambda_2 / d; \quad (4)$$

Здесь  $F_1$ ,  $d$  – эффективная площадь и толщина теплоизоляции между излучателем и оболочкой;  $F_2$ ,  $l$  – полная площадь сечения и длина проводников.

Если задать значения  $P_A$  мощности нагревателя и погрешности  $\Delta T$  поддержания равенства температуры излучателя и оболочки, то относительная погрешность  $\delta_p$  определения мощности, обусловленная неидеальной адиабатизацией, будет равна

$$\delta_p = \frac{Q_\lambda}{P_A} = \left( \frac{\lambda_1 F_1}{d} + \frac{\lambda_2 F_2}{l} \right) \frac{\Delta T}{P_A}. \quad (5)$$

Для экранно-вакуумной изоляции  $\lambda_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·К) при  $\Delta T = 0,25$  мК,  $P_A = 0,15$  Вт,  $F_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>,  $d = 1 \cdot 10^{-2}$  м,  $\lambda_2 = 50$  Вт/(м·К),  $F_2 = 0,1$  мм<sup>2</sup>,  $l = 0,1$  м искомое значение  $\delta_p$  погрешности составляет  $0,13 \cdot 10^{-6}$ .

Другим важным, но часто не принимаемым во внимание требованием к моделям АЧТ является условие стационарности их температуры, соблюдение которого особенно необходимо при использовании теплового излучателя с адиабатической оболочкой. Влияние этого фактора на точность измерений потока излучения  $q_A$  можно оценить, привлекая данные по теплоемкости  $C_A$  излучателя и скорости  $v$  изменения (дрейфа) его температуры. Как следует из соотношения (3), второе слагаемое в его правой части отображает тепловой поток  $Q_v$ , обусловленный изменением температуры излучателя:

$$Q_v = C_A v. \quad (6)$$

Требование стационарности ограничивает значение  $Q_v$  по сравнению с  $P_A$ , например  $Q_v < 1 \cdot 10^{-6} P_A$ . Из этого условия при  $P_A = 0,15$  Вт и, например,  $C_A = 40$  Дж/К,  $Q_v = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Вт следует, что дрейф температуры должен составлять около 1 мкК/ч. Это очень жесткое требование к стабилизации температуры. Однако для температуры фазовых переходов его можно выполнить. Для высокотемпературных реперных точек значения  $P_A$  становятся существенно больше и, соответственно, требования к стационарности ослабляются.

При выполнении условий адиабатичности и стационарности, как следует из (3), радиационный тепловой поток  $Q_S$ , выходящий из полости АЧТ, равен мощности нагревателя:  $Q_S = q_A S = P_A$ , откуда  $q_A = P_A/S$ . Поэтому для нахождения значения  $q_A$  весьма важен вопрос о максимально возможной точности измерений площади  $S$  выходного отверстия излучателя. В соответствии с [6] вторичный эталон единицы длины обеспечивает определение диаметра отверстий с абсолютной погрешностью, не превышающей  $\Delta = (0,01 + 0,4D)$  мкм, где  $D$  – диаметр, выраженный в метрах. Если  $D = 0,02$  м, то  $\Delta = 0,018$  мкм. Это соответствует относительной погрешности измерений диаметра, равной  $9 \cdot 10^{-7}$ . При

этом относительная погрешность  $\delta_S$  определения площади отверстия составит  $1,8 \cdot 10^{-6}$ .

При проведении измерений желательно, чтобы температура полости  $T_0$  была значительно ниже  $T_A$ , например, имела температуру кипения гелия. В этом случае плотность теплового потока  $q_A$  будет больше, что повысит точность ее измерений, а требования к точности и стабильности значения  $T_0$  будут не столь жесткими и достаточными для введения соответствующей поправки. Действительно, как следует из (2), при  $T_A \approx 300$  К,  $T_0 \approx 4$  К поправка на температуру  $T_0$  составит всего лишь  $3,2 \cdot 10^{-8}$  и ей можно пренебречь.

В этом случае значение возможной относительной погрешности определения термодинамической температуры реперных точек при фиксированном значении постоянной Стефана–Больцмана можно оценить по формуле:

$$\Delta_T = T_A \delta_T = 1,4 T_A [0,25(\delta_p^2 + \delta_s^2)]^{1/2}. \quad (7)$$

При полученных значениях погрешности ( $\delta_p = 2,25 \cdot 10^{-7}$ ,  $\delta_s = 1,8 \cdot 10^{-6}$ ) из (7) следует оценка погрешности, например, для  $T_A = 300$  К, равная 0,38 мК. Это значение не превышает желаемый результат, составляющий для реперной точки галлия  $\pm 0,5$  мК.

Следует отметить, что приведенные выше результаты получены в представлении излучателя в виде АЧТ. При этом не учитывается важнейший источник погрешности, связанный с неопределенностью действительного значения его Расчет  $\varepsilon$  излучателя при температуре плавления галлия для диаметра выходного отверстия 20 мм, дает значение 0,999929 [7]. Однако подтвердить эти цифры экспериментально, к сожалению, невозможно.

Следует отметить, что рассматриваемый вариант радиационно-калориметрического метода на основе адиабатического излучателя позволяет также проводить измерения его коэффициента черноты [8,9]  $\varepsilon$ , который находят обычно расчетным путем на основе математических моделей по данным о неоднородности температурного поля излучающей полости и находят оптимальную геометрию полости излучателя экспериментально.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает принципиальную возможность уточнения или определения термодинамической температуры методом радиационной калориметрии. Однако при его реализации могут возникнуть технологические, материаловедческие и другие проблемы, которые могут исчерпать полученный запас точности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куинн Т. Температура. – М.: Мир, 1985.
2. Курбатова Н. А., Симонова Г. В., Черепанова В. Я. Анализ возможности экспериментального уточнения константы Больцмана радиационно–калориметрическим методом // Измерительная техника – 2011. – № 10. – С. 21–24.

3. Kurbatova N. A Simonova G. V., Cherepanov V. Ya. Analysis of the possibility of an experimental refinement of Boltzmann's constant by a radiation-calorimetric method // *Measurement Techniques*. Springer Link. – 2012, Volume 54, No 10. – P. 9–14.
4. Черепанов В. Я. Адиабатический метод формирования и измерения тепловых потоков в эталонах физических величин // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 4, ч. 2. – С. 201–206.
5. West E. D. Heat exchange in adiabatic calorimeters // *J. Res. NBS.*, 1963. V. 67 A. N 4. – P. 331–341.
6. МИ 2060-90. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} \dots 50$  м и длин волн в диапазоне  $0,2 \dots 50$  мкм.
7. Sapritsky V. I., Prokhorov A. V. Calculation of the effective emissivities of specular-diffuse cavities by the Monte Carlo method // *Metrologia*, 1992. V. 29. – P. 9–14.
8. Черепанов В. Я. Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 6. – С. 176–181.
9. Курбатова Н. А., Черепанов В. Я. Установка для поверки датчиков теплового потока // АПЭП-2010. Материалы международной конференции «Актуальные вопросы электронного приборостроения»: сб. материалов – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 31-34.

© Н. А. Вихарева, В. Я. Черепанов, 2014

## **ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВОК В НЕФТЕПРОДУКТАХ**

### ***Геннадий Владимирович Шувалов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, и.о. директора, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

### ***Валерий Николаевич Половинкин***

ФГУП ГНЦ «ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова», 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, доктор технических наук, профессор, референт научного руководителя – директора, тел. (383)210-17-26

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (812)328-90-47, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Иван Владимирович Клековкин***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, зам. начальника лаборатории, тел. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

### ***Александр Петрович Ильин***

ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30, профессор кафедры общей и неорганической химии, тел. (3822)56-34-74, e-mail: ilyinar@mail.ru

### ***Ольга Александровна Ясырова***

Омский институт водного транспорта ФГБОУ ВПО «НГАВТ», 644099, Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы оценки термической безопасности нанопорошков металлов, которые могут использоваться для модификации свойств топливо-смазочных материалов.

**Ключевые слова:** топливо-смазочные материалы, нанопорошки металлов, термическая безопасность.

## **ASSESSMENT OF THERMAL SAFETY OF NANOPOWDERS OF THE METALS USED AS ADDITIVES IN OIL PRODUCTS**

### ***Gennady V. Shuvalov***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. Tech. Sci. of sciences, acting director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

***Valery N. Polovinkin***

Federal State Unitary Enterprise GNTs "Central research institute of a name of the academician A. N. Krylov", 196158, Russia, St. Petersburg, 44 Moskovskoye Highway, the Dr. Sci. Tech., professor, the assistant of the research supervisor – the director, tel. (383)210-17-26

***Igor V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Oleg V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Dr.Sci.Tech., professor of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Ivan V. Klekovkin***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., deputy chief of laboratory, tel. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

***Alexander P. Ilyin***

FGBOU VPO TPU, 634050, Russia, Tomsk, 30 Lenin Ave., professor of chair of the general and inorganic chemistry, tel. (3822)56-34-74, e-mail: ilyinap@mail.ru

***Olga A. Yasyrova***

Omsk institute FGBOU VPO "NGAVT's" water transport, Russia, Omsk, 2 Ivan Alekseev St., associate professor of physics, tel. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

In article questions of an assessment of thermal safety of nanopowders of metals which can be used for modification of properties fuel-lubricants are considered.

**Key words:** fuel-lubricants, nanopowders of metals, thermal safety.

Использование нанопорошков металлов (НП) в различных отраслях промышленности может привести к существенному улучшению характеристик продукции и материалов, значительному росту ее качества и повышению производительности технологических процессов. Это связано с тем, что малый размер частиц НП (10 – 100 нм) обуславливает их особые электрические, теплофизические, магнитные и другие свойства, благодаря которым НП находят все большее применение при производстве керамических и композиционных материалов, добавок и присадок к топливо–смазочным материалам и т.д. На сегодняшний день существует достаточно большое количество технологий получения нанопорошков. Одним из наиболее перспективных методов получения НП является электрический взрыв проводников, под которым понимается резкое изменение физического состояния металлического проводника (проволочки) в результате интенсивного выделения в нем энергии при пропускании импульсного тока большой плотности ( $j \geq 10^6$  А/см<sup>2</sup>) [1]. При электрическом взрыве материал проводника находится в неравновесных условиях, связанных с его быстрым нагревом и охлаждением продуктов диспергирования, с воздействием

электрического и магнитного полей, интенсивным тепло- и массопереносом, ионизацией и диффузией. Благодаря этим процессам электровзрывные нанопорошки обладают рядом особых свойств в сравнении с НП, полученными другими технологиями. Во-первых, они имеют сферическую форму частиц, устойчивы к окислению и спеканию при комнатной температуре, во-вторых, их характеризует высокая диффузионная активность при нагревании, связанная с особыми теплофизическими и термохимическими свойствами. Для модификации состава нанопорошка диспергирования проводника осуществляют в химически активной среде, в этом случае продукты диспергирования проводника вступают в химическое взаимодействие со средой при их разлете и охлаждении [2, 3].

В последнее время проводятся работы по использованию металлических порошков в технических устройствах для снижения внутренних механических потерь и скорости износа сопряженных деталей, понижения температуры смазочного масла, что продлевает сроки службы смазочного масла и, как следствие, повышает срок службы машин и механизмов [4, 5]. Известны смазочные материалы, содержащие в своем составе частицы металлов бронзы – сплава меди и олова (реметаллизанты). Медь, как правило, в чистом виде не используется, т.к. является катализатором окисления масла. Наиболее известные представители этой группы смазочных составов - «RESURS» производства России (г. С-Петербург), «ENGINE RESTORER» производства США, «Metall 5» производства Франции. Эти составы содержат микронные порошки в жидких маслах.

Как и у любого смазочного материала эффективность реметаллизантов зависит от размера частиц. Чем меньше размер – тем активнее частица. Механизм действия заключается в уплотнении зазоров в цилиндро–поршневой группе и, как следствие, росту КПД работы двигателя. В этой связи возрастает интерес к использованию в реметаллизантах нанопорошков металлов. Использование нанодисперсных порошков – это новые технологии в повышении износостойкости машин и механизмов и экономии горюче-смазочных материалов.

Нанопорошки металлов, как и все нанопорошковые материалы, обладают высокой реакционной способностью. Поэтому при их хранении, транспортировании и при переработке необходимо снижать и контролировать способность нанопорошков к спеканию, самоспеканию и к взаимодействию с различными компонентами и реагентами. В этой связи актуальны работы по определению термической безопасности нанопорошков металлов, в основе которых лежат параметры термохимической активности, которые позволяют сравнивать по химической активности нанопорошки разных по природе металлов [6-8].

К этим параметрам относятся: тепловой эффект реакций, температура начала окисления, степень окисленности, тепловой поток при горении нанопорошков металлов. Последние параметры будут определять термическую безопасность наноматериалов – т.е. опасность соприкосновения незащищенных частей тела человека от воздействия высоких температур при изготовлении, применении, транспортировке и хранении нанопорошков металлов.

Для тестирования устойчивости нанопорошков и их смесей к окислению и к химическому взаимодействию был использован дифференциальный термический анализ (ДТА). Метод ДТА основан на сравнении термических свойств образца исследуемого вещества и инертного эталона. Регистрируемым параметром является разность температур вещества и эталона, измеряемая при нагревании или охлаждении образца с постоянной скоростью. На основе данных ДТА определяют четыре параметра химической активности исходных НП и их смесей: температуру начала окисления ( $T_{н.о.}$ , °C), степень окисленности ( $\alpha$ , %), максимальную скорость окисления ( $V_{max}$ , %мас./с) и удельный тепловой эффект ( $\Delta H/\Delta t$ , отн. ед.).

Для определения плотности теплового потока при горении различных нанопорошков металлов измеряли тепловой поток от пробы нанопорошка в одинаковых условиях.

На рис. 1 приведены данные по максимальному тепловому потоку при горении различных нанопорошков металлов.



Рис. 1. Максимальный тепловой поток при горении различных нанопорошков металлов

Учитывая термохимические параметры нанопорошков металлов и их излучательные энергетические характеристики в виде плотности теплового потока можно построить шкалу термической безопасности нанопорошков металлов.

Расчет термической безопасности нанопорошков металлов можно провести по формуле, учитывающей все термохимические параметры нанопорошков металлов:

$$P = 0,25 \cdot \left( \frac{\Delta H_i}{\Delta H_{max}} + \frac{T_i}{T_{max}} + \frac{\alpha_{max}}{\alpha_i} + \frac{P_i}{P_{max}} \right)$$



В табл. 1 приведены термохимические параметры исследованных нанопорошков металлов.

Таблица 1

Термохимические параметры нанопорошков металлов

№ пп	Нанопорошок	$\Delta H$ кДж/ г	$T_{но}$ , °С	$\alpha$ , %	Макс. тепловой поток (Вт/м <sup>2</sup> )	Термическая опасность, Р
1	алюминий	31	420	97,8	22,6	0,96
2	титан	19,6	120	98,8	26,3	0,72
3	молибден	7,9	175	96,5	4,5	0,46
4	железо	7,3	160	93,2	4,6	0,46
5	никель	5,2	165	91,4	4,8	0,45
6	нихром	5,2	165	91,9	4,8	0,45
7	медь	2,4	165	89,3	2	0,41
8	вольфрам	4,5	110	98,7	6	0,41

С учетом результатов расчета в табл. 2 приведена шкала термической опасности нанопорошков металлов.

Таблица 2

Шкала термической опасности нанопорошков металлов

Степень термической опасности		
Высокая, Р=1-0,6	Средняя, Р=0,6-0,45	Низкая, Р=0,44 и ниже
алюминий титан	молибден железо никель нихром	медь вольфрам

Видно, что наибольшей степенью термической опасности обладают нанопорошки алюминия и титана

Таким образом, в результате проведенных исследований были определены термохимические параметры нанопорошков различных металлов и параметры их термической опасности, которые необходимо учитывать при разработке металлоплакирующих смазочных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильин А. П., Краснятов Ю. А., Ларионов С. А. Применение электровзрывных ультрадисперсных порошков в качестве добавок к маслам // Получение, свойства и применение энергонасыщенных порошков металлов и их соединений: Тез. докл. Рос. конф. Томск: НИИ ВН при ТПУ, 1993. С. 83.

2. Назаренко О. Б. Особенности формирования продуктов электрического взрыва проводников в конденсированных средах: Дис. ... к.т.н. Томск, 1996. 129 с.
3. Ильин А. П., Назаренко О. Б. Модифицирование минеральных масел электрическим взрывом проводников // Высоковольтная техника и электротехнология: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 1. Иваново, 1997. С. 71–73.
4. Патент № 1730842. Ильин А. П., Краснятов Ю. А., Елизаров А. В., Чернов М. Г. Смазочный состав. Приор. от 14.02.1990.
5. Патент № 2132363. Ильин А. П., Петрунин В. Ф. Металлоплакирующий смазочный состав. Приор. от 24.04.1997.
6. Ильин А. П., Медведев Г. А., Петрунин В. Ф. Динамические эффекты в процессе трения при плакировании ультрадисперсными порошками // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем: Тез. докл. VI Всерос. конф. М.: МИФИ, 2002. С. 397.
7. Ильин А. П., Назаренко О. Б., Рихерт С. В. Влияние суспензии «моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь – низколегированная сталь» // Изв. ТПУ. 2004. Т. 307, № 3. С. 77–79.
8. Ильин А. П., Яблуновский Г. В., Громов А. А. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. - № 4. – С. 58-62.

*© Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин, О. В. Минин,  
И. В. Клековкин, А. П. Ильин, О. А. Ясырова, 2014*

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ПОМЕЩЕНИЙ

*Анна Дмитриевна Зонова*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

*Виктор Яковлевич Черепанов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

В статье показано, что объективную оценку качества тепловой защиты помещений можно осуществить на основе оперативных измерений тепловой мощности, выделяемой системой отопления. Для решения этой задачи предложено использовать неразрушающий теплотрический метод измерений.

**Ключевые слова:** неразрушающий теплотрический метод, массовый расход, показатель эффективности, тепловая защита помещений, тепловая мощность.

## THE NON-DESTRUCTIVE METHOD OF THE ESTIMATION FACTOR TO EFFICIENCY OF HEAT PROTECTION OF THE PREMISES

*Anna D. Zonova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. tech., senior teacher Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

*Victor Ya. Cherepanov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Prof. Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

In article is shown that objective estimation quality heat protection of the premises possible to realize on base of the operative measurements to heat power, selected a system of the heating. For decision of this problem is offered use of a non-destructive heat measurement method.

**Key words:** non-destructive heat measurement method, mass consumption, factor to efficiency, heat protection of the premises, heat power.

Главной задачей теплоснабжения является обеспечение нормальной температуры  $T_0$  внутри отапливаемого помещения. Выделяемая системой теплоснабжения тепловая мощность  $P$  распределяется на тепловые утечки (тепловые потоки  $Q_i$ ) через ограждающие помещение конструкции в окружающую среду с

температурой  $T_C$ . В стационарном режиме, соответствующем установившимся значениям  $T_0$  и  $T_C$  выполняется условие теплового баланса [1]:

$$P = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество разнородных зон в ограждающих конструкциях помещения, отличающихся интенсивностью теплообмена с окружающей средой.

Из этого уравнения следует, что при известных значениях  $Q_i$  тепловых потоков можно определить необходимую мощность  $P$  отопительной системы помещения. С другой стороны, при известных значениях достаточной для отопления помещения мощности можно решить важную для энергосбережения задачу определения фактического состояния его тепловой защиты. Данная работа направлена на решение этой задачи.

Тепловая защита помещения характеризуется значениями  $Q_i$ , которые зависят от эффективных коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{oi}$  на внутренних и  $\alpha_{ci}$  на внешних поверхностях ограждающих конструкций, а также от их теплопроводности  $\lambda_i$ , площади  $F_i$  и толщины  $d_i$ . Эта зависимость имеет вид [2]:

$$Q_i = k_i (T_0 - T_C) F_i, \quad (2)$$

где  $k_i = \left( \frac{1}{\alpha_{oi}} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ci}} \right)^{-1}$  – коэффициент теплопередачи  $i$ -ой зоны.

Таким образом, уменьшение значений таких физических величин, как коэффициенты теплоотдачи, теплопроводность и толщина стен приводит к снижению тепловых потерь (потоков) через ограждающие конструкции и, следовательно, решает главную задачу энергосбережения: при меньших значениях тепловой мощности  $P$ , выделяемой системой отопления, обеспечить комфортную для жизнедеятельности температуру  $T_0$  помещения при пониженных значениях  $T_C$  температуры окружающей его среды.

Однако использование соотношения (2) для расчета  $Q_i$  затруднено, в частности, из-за неопределенности эффективных значений  $\alpha_{oi}$  и  $\alpha_{ci}$ , которые зависят от совокупности свойств (геометрических, терморadiационных) поверхности ограждающих конструкций и свойств окружающей их воздушной среды (температуры, давления, влажности, скорости движения). Поэтому их рассчитывают по измеренным значениям температуры  $T_{oi}$  и  $T_{ci}$  внутренней и внешней поверхности ограждающих конструкций с привлечением справочных данных по их теплопроводности  $\lambda_i$ .

Формула для этого расчёта имеет вид:

$$Q_i = \lambda_i (T_{0i} - T_{Ci}) F_i / d_i, \quad (3)$$

Из формулы следует, что для расчёта значений  $Q_i$  необходимы данные не только по температурным полям на поверхностях ограждающих конструкций, но и по фактическим значениям теплопроводности материалов, из которых они изготовлены. Многоточечные измерения теплового потока на их поверхностях контактными датчиками с последующим усреднением полученных результатов также не дают полную картину из-за сложного характера теплообмена помещений с окружающей средой.

Таким образом, есть основание полагать, что определить необходимую для создания комфортных условий в помещении тепловую защиту или оценить её качество можно только альтернативным путём, основанным на измерениях фактической мощности, выделяемой системой отопления. Необходимое значение этой мощности, как следует из (1) и (2), равно

$$P = (T_0 - T_C) \sum_{i=1}^n k_i F_i. \quad (4)$$

Отсюда следует, что комфортную температуру помещения можно определить по формуле

$$T_0 = T_C + \frac{P}{\sum_{i=1}^n k_i F_i}. \quad (5)$$

Уравнение (5) устанавливает взаимосвязь комфортной температуры в отапливаемом помещении при заданных характеристиках теплопередачи его тепловой защиты с температурой окружающей среды и мощностью размещённой в нём отопительной системы.

При известных значениях фактической мощности отопления, а также разности температур помещения и окружающей среды можно установить показатель  $\eta$  эффективности тепловой защиты помещения:

$$\eta = \sum_{i=1}^n k_i F_i = P / (T_0 - T_C). \quad (6)$$

Значение этого показателя ( $\text{Вт}/^\circ\text{C}$ ) можно определять экспериментально для каждого помещения, например, жилого, при вводе его в эксплуатацию, а затем при необходимости периодически его подтверждать и вносить в специальный паспорт помещения. В случае обнаружения несоответствия показателя установленным для данного помещения значениям проводится экспертиза ис-

правности системы отопления или качества теплоизоляции. Однако для этого необходимо иметь результаты оперативных измерений фактической мощности и температуры.

Для решения этой задачи предлагается использовать неразрушающий теплометрический метод [3, 4]. Сущность метода заключается в следующем. Нагретый теплоноситель, проходя по подающему трубопроводу, создаёт на его поверхности тепловой поток плотностью  $q$ . При этом температура теплоносителя понижается на некоторое значение  $\Delta t$ . В этом случае массовый расход теплоносителя  $G_M$  будет равен

$$G_M = qF / K_S \Delta t, \quad (7)$$

где  $F$  – площадь поверхности расходомерного участка;  $K_S$  – коэффициент, учитывающий калорические свойства теплоносителя и зависящий от его давления и температуры.

Соответственно тепловую мощность, выделяемую теплоносителем в системе отопления или в отопительном приборе, определяют по формуле [4, 5]

$$P = qF \Delta T / \Delta t, \quad (8)$$

где  $\Delta T$  – разность температуры на входе и выходе отопительного прибора.

Как видно из соотношения (8), в расчётную формулу для тепловой мощности не входит коэффициент  $K_S$ , учитывающий калорические свойства теплоносителя. Это является преимуществом предлагаемого метода по сравнению с традиционным энтальпийным методом, который основан на использовании стандартных справочных данных по коэффициенту  $K_S$ . Однако эти данные хорошо изучены только для чистой дистиллированной воды и индивидуальны для каждого конкретного теплоносителя. Поэтому данный метод позволяет измерять фактическую мощность, выделяемую реальным теплоносителем, в том числе, содержащим газовую фазу и различные примеси.

На этом методе основано устройство для оперативного неразрушающего контроля эффективности систем отопления помещений и их тепловой защиты (рис. 1).

На поверхности участка трубопровода, соединяющего систему теплоснабжения с отопительным прибором 4, размещают накладные датчики разности температуры 1 и датчик теплового потока 2. Этот участок трубопровода выполняет функцию расходомерного. Расстояние между датчиками температуры выбирают достаточным, чтобы зафиксировать малый перепад  $\Delta t$  температуры на расходомерном участке, обусловленный выделением с его поверхности теплового потока плотностью  $q$ , которую измеряют датчиком 2. Кроме этого, устройство содержит накладные датчики разности температуры 3, измеряющие разность  $\Delta T$  её значений на входе и выходе системы (или прибора) отопления. Сигналы всех датчиков поступают на измерительный прибор 5.

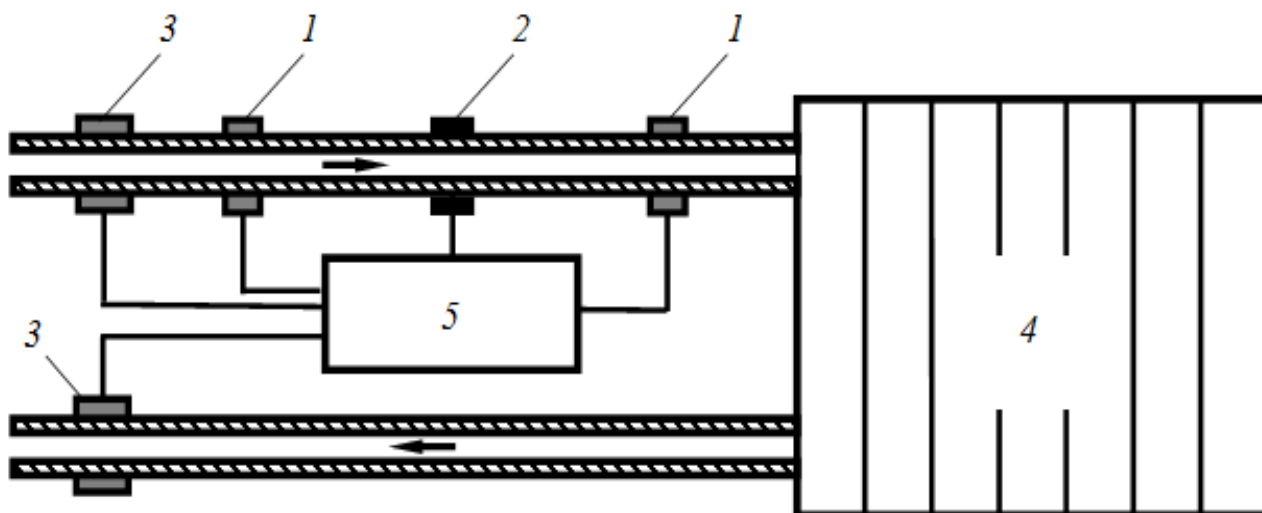


Рис. 1. Схема устройства для реализации неразрушающего теплотрического метода:

1 – накладные датчики разности температуры на расходомерном участке трубы; 2 – накладной датчик теплового потока; 3 – накладные датчики разности температуры на входе и выходе отопительной системы; 4 – отопительный прибор; 5 – измерительный прибор

Таким образом, устройство представляет собой набор накладных дифференциальных термоэлектрических датчиков температуры и датчика теплового потока, а также измерительного прибора, регистрирующего их сигналы [4]. Оно позволяет оперативно измерять фактическую тепловую мощность, выделяемую системами и приборами отопления, без нарушения их целостности и тем самым решать задачу оценки эффективности тепловой защиты помещений.

Устройство также может быть использовано в качестве переносного прибора для оперативных измерений при энергоаудите систем отопления или стационарного средства измерений, например, при поквартирном учёте тепла. Это открывает перспективы использования его для решения многих задач в сфере рационального использования теплоэнергетических ресурсов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепанов, В. Я. Методы и средства метрологического обеспечения измерений параметров теплообмена и теплоносителей [Рукопись]: дис.... д-ра техн. наук: 05.11.15, 05.11.01 / Черепанов Виктор Яковлевич. – Новосибирск, 2005. – 298 с.
2. ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции: межгос. стандарт. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
3. Зонина А. Д., Черепанов В. Я. Исследование неразрушающего метода измерений тепловой мощности отопительных приборов // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 5, ч. 2. – С. 124–129.

4. Зонова А. Д., Черепанов В. Я. Методика экспресс-измерений тепловой мощности отопительных приборов неразрушающим методом // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 158–163.
5. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Учебник для вузов. – М.: Изд-во «Энергия», 1975. – 488 с.

© А. Д. Зонова, В. Я. Черепанов, 2014



## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

### ***Геннадий Владимирович Шувалов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, и.о. директора, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

### ***Валерий Николаевич Половинкин***

ФГУП ГНЦ «ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова», 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, доктор технических наук, профессор, референт научного руководителя – директора, тел. (812)328-90-41

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

### ***Иван Владимирович Клековкин***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, зам. начальника лаборатории, тел. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

### ***Ольга Александровна Ясырова***

Омский институт водного транспорта ФГБОУ ВПО «НГАВТ», Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

В статье приведены результаты работ по созданию прибора для определения температуры вспышки нефтепродуктов, его описание и технические характеристики.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, температура вспышки, прибор.

## **DEVELOPMENT AND DEVICE RESEARCH FOR DETERMINATION OF TEMPERATURE OF FLASH OF OIL PRODUCTS**

### ***Gennady V. Shuvalov***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. Tech. Sci. of sciences, acting director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

### ***Valery N. Polovinkin***

Federal State Unitary Enterprise GNTs «Central research institute of a name of the academician A. N. Krylov», 196158, Russia, St. Petersburg, 44 Moskovskoye Highway, the Dr.Sci.Tech., professor, the assistant of the research supervisor – the director, tel. (383)210-17-26

***Igor V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Oleg V. Minin***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Dr.Sci.Tech., professor of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Ivan V. Klekovkin***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., deputy chief of laboratory, tel. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

***Olga A. Yasyrova***

Omsk institute FGBOU VPO «NGAVT's» water transport, 644099, Russia, Omsk, 2 Ivan Alekseev St., associate professor of physics, tel. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

Results of works on device creation are given in article for determination of temperature of flash of oil products, its description and technical characteristics.

**Key words:** oil products, flash temperature, device.

Одним из основных показателей качества нефтепродуктов является значение температуры вспышки. Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» предъявляет обязательные требования к качеству отечественных судовых топлив в виде двух показателей: содержание серы и температура вспышки. Содержание серы характеризует экологические показатели топлива, а температура вспышки определяет теплофизические свойства нефтепродуктов и характеризует их способность к воспламенению при нагреве, а также их пожароопасные свойства.

Нормативная база, регламентирующая вопросы метрологического обеспечения учета нефтепродуктов, в основном сложилась в 70 - 80 годах прошлого века и морально устарела, в связи с чем, в настоящее время она активно обновляется. Принципиально она может быть существенно модернизирована только с принятием проекта Технического регламента «О требованиях к средствам измерений показателей нефти и нефтепродуктов», устанавливающего метрологические и технические требования к средствам и методам измерений показателей нефтепродуктов. Показатели точности измерений температуры вспышки в дизельном и судовом топливе согласно Технического регламента не должна превышать значений, указанных в табл. 1.

В связи с важностью показателя температура вспышки для его практического определения существует ряд приборов отечественного и зарубежного производства. Данные о некоторых приборах для определения температуры вспышки нефтепродуктов приведены в табл. 2.

Таблица 1

## Показатели точности измерения температуры вспышки

Температура вспышки	Сходимость	Воспроизводимость
До 104	2	4
Свыше 104	5	8

Таблица 2

## Приборы для определения температуры вспышки нефтепродуктов

1 Анализатор АК-5Д	Россия	ГОСТ 6356-75	Определение температуры вспышки до 300 °С
2 Аппарат ТВЗ-ЛТ	Россия	ГОСТ 6356-75	Температура вспышки, °С (30 - 360)
3 Аппарат ТВЗ-1М	Россия	ГОСТ 6356-75	Диапазон рабочих температур, °С (30 – 360)
4 Аппарат ТВЗ-ЛАБ-01	Россия	ГОСТ 6356-75	Диапазон рабочих температур, °С (35–350)
5 Анализатор СИМ-5Д	Россия	ГОСТ 6356-75	Определение температуры вспышки до 300°С
6 Прибор ВСПЫШКА-А	Россия	ГОСТ 4333 и ГОСТ 6356-75	Температур вспышки в закрытом тигле, °С (30–260)

Анализ технических характеристик и конструктивного исполнения приборов для определения температуры вспышки показывает, что в настоящее время нет единых принципов их конструирования. Это связано с отсутствием методологии расчета приборов для определения температуры вспышки [1].

В этой связи при проведении испытаний по определению температуры вспышки нефтепродуктов возникла необходимость установить стабильность определения этого показателя в зависимости от числа испытаний, проводимом на одном и том же образце. Для этого проводили многократные измерения по определению температуры вспышки трансформаторного масла и динамики его испарения в зависимости от количества измерений. Нагрев нефтепродукта осуществлялся со скоростью  $(6 - 8)^\circ\text{C}/\text{мин}$  при подводимом напряжении на тигле - 150 В.

Результаты этих экспериментов представлены в табл. 3.

Из таблицы видно, что температура вспышки трансформаторного масла при проведении 10 последовательных испытаний на одной и той же пробе незначительно меняется (в пределах 2-3 °С). Это означает, что двухкратное испытание, необходимое для получения результата измерения температуры вспышки, можно проводить на одной пробе. Это особенно актуально в условиях, когда имеется незначительное количество нефтепродукта при проведении измерений.

Температура вспышки трансформаторного масла и динамики его испарения в зависимости от количества измерений

Номер измерения	$T_{всп1}, ^\circ\text{C}$	$T_{всп2}, ^\circ\text{C}$	$T_{всп.ср}, ^\circ\text{C}$	$L^*, \text{мм}$
1	153,1	154	153,5	22,3
2	153,8	154,4	154,1	22,6
3	153,5	154,5	154	22,8
4	154,3	155	154,6	23,0
5	154,9	155,7	155,3	23,1
6	156,1	156,8	156,4	23,2
7	156,4	157,3	156,8	23,3
8	155,5	156,8	156,1	23,4
9	155,7	156,8	156,2	23,5
10	154,9	156	155,4	23,6

\*L – расстояние от верхнего края тигля до нефтепродукта, перед началом испытания равно  $(22,3 \pm 0,1)$  мм

Кроме того, ранее [2] было показано, что уменьшение объема моторного масла и площади поверхности испарения при испытаниях не влияет на значения температуры вспышки

С учетом данных этих исследований разработана конструкция прибора для определения температуры вспышки нефтепродуктов СИМ-5 [3]. Прибор предназначен для определения температуры вспышки дизельного топлива, моторных и автотракторных масел экспресс-методом и может применяться при оперативном контроле их качества.

Технические характеристики прибора:

1 Диапазон измерений температуры вспышки дизельного топлива анализатором СИМ-5Д - от 17 до 350 °С

2 Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры вспышки  $\pm 5$  °С

3 Время измерения температуры вспышки образца не более 1 часа

4 Габаритные размеры, мм, не более – 280x160x240

5 Масса анализатора не более 6,5 кг.

Принцип действия анализатора основан на нагревании контролируемого нефтепродукта электронагревателем, периодическом поджигании паров нефтепродукта и измерение температуры, при которой происходит вспышка.

Функциональная схема анализатора приведена на рис. 1.

В состав функциональной схемы входят нагревательный блок 1, блок электроники и управления 2.

Сверху в нагревательный блок вставляется тигель с испытываемым ГСМ. Нагрев жидкости в тигле осуществляется с помощью электронагревателя

(Эл.Н). Для поджига паров нефтепродукта служит газовая горелка с регулятором расхода газа, газ в которую поступает из газового баллона (Г.Б.). Температура образца испытуемого ГСМ снимается измерительной термопарой (ДТ) и отображается на цифровом индикаторе (ТРМ).

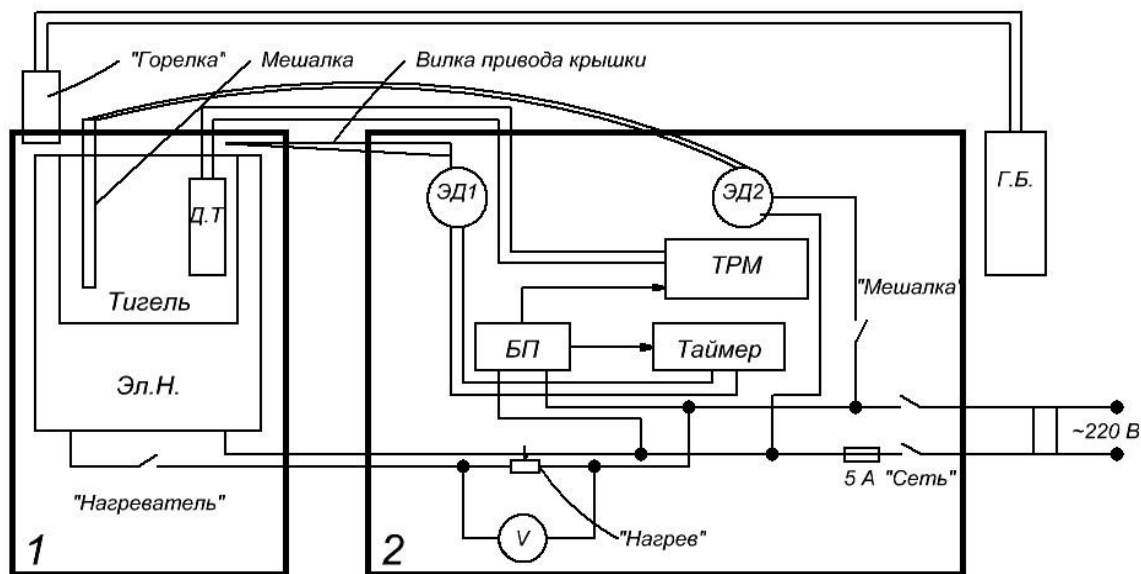


Рис. 1. Схема электрическая функциональная

Управление перемещением поворотного устройства с газовой горелкой над тиглем осуществляется с помощью таймера и электродвигателя (ЭД1), вращающего вилку привода крышки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экономия горючесмазочных материалов при работе двигателей внутреннего сгорания / А. В. Бондарев, И. С. Новиков [и др.] // Сибирский научный вестник / Вып. VI. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2003. – С. 49–52.
2. Анализатор температуры вспышки нефтепродуктов / М. А. Мишагин, А. В. Бондарев [и др.] // 2-я междуна. науч.-техн. конф., 8-11 сентября 2004 «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт»: Часть 2 / Под ред. В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека, В. В. Охотниковой. – Тобольск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – С. 153–155.
3. Приборы экспресс-анализа диэлектрических жидкостей / В. П. Горелов, А. В. Бондарев [и др.] // Физика. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 200–202.

© Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин,  
О. В. Минин, И. В. Клековкин, О. А. Ясырова, 2014

## **СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ЧАСОВ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОДАЛЬНОМЕРНЫХ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Александр Сергеевич Толстиков*

Сибирский научно-исследовательский институт метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, начальник ГСВЧ ФГУП «СНИИМ», доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства СГГА, тел. (383)210-11-85, e-mail: [tolstikov@mail.ksn.ru](mailto:tolstikov@mail.ksn.ru)

*Анжелика Равильевна Безродных*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирантка кафедры метрологии и технологии оптического производства, e-mail: [a.bezrodnykh@mail.ru](mailto:a.bezrodnykh@mail.ru)

В работе анализируются погрешности синхронизации пространственно-разнесенных часов на основе применения спутниковых навигационных технологий и обсуждаются возможности повышения точности синхронизации на основе принципов, используемых в методологии PPP.

**Ключевые слова:** спутниковые навигационные технологии, координатно-временные определения, псевдодальномерные фазовые измерения, пространственно-разнесенные часы, методология PPP.

## **SYNCHRONIZATION SPATIALLY SEPARATED CLOCK BASED ON PSEVDODALNOMERNYH PHASE MEASUREMENTS**

*Aleksandr S. Tolstikov*

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova, Ph. D., Prof. of Department metrology and optical engineering technologies SSGA, e-mail: [tolstikov@mail.ksn.ru](mailto:tolstikov@mail.ksn.ru)

*Angelika R. Bezrodnikh*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, graduate department of metrology and optical engineering technologies, e-mail: [a.bezrodnykh@mail.ru](mailto:a.bezrodnykh@mail.ru)

This paper analyzes the synchronization error spatially separated clock based on the use of satellite navigation technologies and the possibilities of increasing the accuracy of synchronization based on the principles used in the methodology of PPP.

**Key words:** satellite navigation technology, coordinate temporary definitions, psevdodalnomernye phase measurements, spatially separated clocks, PPP methodology.

### *Введение*

Одной из задач прямого назначения ГНСС является предоставление потребителю информации о моменте эталонном времени. При этом навигационные технологии опираются на применение частотно-временных измерений.

Исходными данными для координатно-временных определений на основе спутниковых навигационных технологий являются результаты измерений дальностей от навигационных спутников до потребителя. Эти измерения сво-

дятся к измерению интервалов времени, необходимого для прохождения навигационного сигнала от передающей антенны навигационного спутника до приемной антенны аппаратуры потребителя. При этом необходимо, чтобы эти интервалы времени измерялись с требуемой точностью, и, что особенно важно, эти интервалы должны отсчитывались от согласованных моментов времени.

Последнее условие делает актуальной задачу синхронизации шкал времени часов, участвующих в измерениях.

В настоящее время в спутниковых навигационных технологиях находит применение методология PPP (Precise Point Positioning) [1]. Повышение точности позиционирования согласно этой методологии достигается за счет привлечения апостериорной, более точной по сравнению с бортовой, эфемеридно-временной информации, использования в качестве исходных данных результатов фазовых псевдодальномерных измерений и улучшения качества исходных данных за счет предварительной обработки результатов псевдодальномерных измерений.

Целью настоящей работы является анализ точности синхронизации пространственно-разнесенных часов на основе применения спутниковых навигационных технологий и исследования возможностей повышения точности синхронизации на основе принципов, используемых в методологии PPP.

### *1 Постановка задачи синхронизации*

Согласно [2], синхронизация пространственно-разнесенных часов сводится к последовательности действий, в результате которых моменты шкал времени указанных часов оказываются согласованными.

Эти действия предполагают: определение расхождения шкал времени синхронизируемых часов теми или иными методами, а также расчет и применение поправок, компенсирующих это расхождение.

Существующие методы сравнения шкал времени часов могут быть объединены в три группы [3,4]:

1. Методы прямой передачи потребителю момента шкал времени часов. Точность синхронизации этими методами зависит от характеристик канала связи и от уровней влияющих факторов.

2. Дифференциальные методы, более точные по сравнению с методами первой группы, предполагают прием в пунктах синхронизации сигналов от "третьих" часов и обмен информацией о результатах приема между этими пунктами. Результаты синхронизации в этом случае зависят от неодинаковости условий прохождения синхронизируемого сигнала по радиотрассам.

3. Дуплексные методы [5], наиболее точные, используют прямую передачу с помощью специальной аппаратуры синхронизируемого сигнала от одного пункта синхронизации к другому и переизлучение этого сигнала в обратном направлении. Точность синхронизации в этом случае не зависит от характеристик канала связи.

Спутниковые навигационные технологии позволяют реализовать методы синхронизации первой и второй группы без привлечения специальной аппара-

туры. Информация о шкалах времени синхронизируемых часов в этом случае извлекается непосредственно из результатов беззапросных псевдодальномерных измерений.

Уравнения беззапросных кодовых и фазовых измерений имеют вид:

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^N p_i(t), \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) + \Delta T_{SR}(t) \cdot c + K \cdot \lambda + \sum_{i=1}^N q_i(t), \quad (2)$$

где  $D(t)$  и  $\varphi(t)$  - измеренные на момент прихода навигационного сигнала на приемную антенну кодовые и фазовые псевдодальноности, выраженные в единицах длины;  $\rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) = \sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2 + (z_S - z_R)^2}$  - геометрическая дальность от передающей антенны спутника до приемной антенны потребителя;  $\mathbf{u}_S^T = (x_S, y_S, z_S)$  - вектор координат спутника в геоцентрической Гринвичской системе координат;  $\mathbf{u}_R^T = (x_R, y_R, z_R)$  - вектор координат антенного модуля пункта синхронизации;  $\Delta T_{SR}(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)$  - суммарное расхождение бортовой  $\Delta T_S(t)$  и наземной  $\Delta T_R(t)$  шкал относительно эталонного времени;  $\lambda$  - длина волны несущей с литерной частотой, на которой передается навигационный сигнал;  $K$  - целое неопределённое число длин волн, укладываемых в измеренном расстоянии;  $c$  - скорость распространения навигационного сигнала в вакууме;  $p_i(t)$ ,  $q_i(t)$  - факторы, влияющие на точность кодовых и фазовых псевдодальномерных измерений, к которым относятся выраженные в единицах длины задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, поправки за релятивистские эффекты, смещения фазовых центров антенных модулей, аномальные значения, связанные с многолучевостью распространения навигационного сигнала, неучтенные задержки в радиотрактах передающей и приемной аппаратуры, погрешности измерений и другие факторы.

Необходимо отметить, что уровень шумов в фазовых измерениях существенно ниже, чем в кодовых измерениях. Это делает фазовые измерения более привлекательными для задач синхронизации.

## 2 Применение фазовых псевдодальномерных измерений

Проблема состоит в наличии в составе фазовых измерений составляющей  $K \cdot \lambda$ , связанной с неопределенностью числа фазовых циклов в  $\varphi(t)$ .

Определение  $K \cdot \lambda$  непосредственно из разности  $D(t) - \varphi(t)$  не даст желаемых результатов, поскольку в кодовые  $D(t)$  и фазовые  $\varphi(t)$  измерения составляющие связанные с ионосферной задержкой  $p_1(t) = \tau_{ion}(t) \cdot c$  и



$q_1(t) = -\tau_{ion}(t) \cdot c$  входят с противоположными знаками. По этой причине для оценивания  $K \cdot \lambda$  в кодовых  $D(t)$  и фазовых  $\varphi(t)$  измерениях применяется предварительная компенсация ионосферной задержки на основе привлечения измерений на комбинационной частоте [6]. Полученные таким образом свободные от ионосферной задержки фазовые измерения

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) - \hat{K} \cdot \lambda = T_{SR}(t) \cdot c + \sum_{i=1}^{N-1} q_i(t) \quad (3)$$

после компенсации с помощью поправок геометрической дальности  $\hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R)$  и фазовой неоднозначности  $\hat{K} \cdot \lambda$  с учетом равенства  $\Delta T_{SR}(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R(t)$  непосредственно могут использоваться для оценивания прямым методом момента шкалы времени синхронизируемых часов  $\Delta T_R(t)$ .

Согласно (3), погрешности оценивания ухода шкалы времени синхронизируемых часов будут зависеть от уровней некомпенсированных влияющих факторов, погрешностей оценивания геометрической дальности  $\delta\rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) = \hat{\rho}(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R) - \rho(\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R)$ , погрешностей оценивания фазовой неоднозначности  $\delta K = \hat{K} - K$ , погрешностей представления уходов бортовой шкалы времени с помощью частотно-временных поправок  $\delta T_S(t) = \Delta \dot{T}_S(t) - \Delta T_S(t)$ .

Более высокими характеристиками точности, по сравнению с прямыми методами синхронизации обладают дифференциальные методы. В соответствии с методологией «common view», в пунктах синхронизации  $A$  и  $B$  прямыми методами оцениваются суммарные расхождения шкал времени  $\Delta T_{SR}^A(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R^A(t)$  и  $\Delta T_{SR}^B(t) = \Delta T_S(t) + \Delta T_R^B(t)$  на основе квазисинхронного приема сигналов одного, выбранного определенным образом, спутника. После обмена результатами оценивания между пунктами синхронизации  $A$  и  $B$  из разностей  $\Delta \dot{T}_{SR}^A(t) - \Delta \dot{T}_{SR}^B(t)$  непосредственно определяется оценка расхождения шкал времени  $\Delta \dot{T}_R^{AB}(t) = \Delta \dot{T}_R^A(t) - \Delta \dot{T}_R^B(t)$ .

В настоящее время метод «common view» трансформировался в метод синхронизации, включающий в обработку данные по всей радиовидимой в каждом пункте в течение суток орбитальной группировке спутников. В обмен информацией между пунктами синхронизации представлялись результаты усреднения по всему ансамблю орбитальной группировки. Этот подход был предложен в 1993 году международной группой CGGTTS по выработке стандарта – Common GPS GLONASS Time Transfer Standard.

Программная реализация метода выполнена Р. Defraigne для GPS наблюдений. Позднее программа Р. Defraigne была адаптирована сотрудниками «ВНИИФТРИ» М.Б.Кауфманом и С.Л.Пасынком для обработки результатов наблюдений ГЛОНАСС (версия CV-GG).

Погрешности синхронизации часов дифференциальными методами по сравнению с прямыми методами оказываются существенно меньше. Это обеспечивается частичной компенсацией всех влияющих факторов  $q_i^A(t)$  и  $q_i^B(t)$  в уравнениях оценивания (3). Полной компенсации не происходит по причине существования в этих факторах случайных составляющих.

В частности, при расчете прогнозов положения бортовых шкал времени  $\Delta T_s^i(t)$  с применением частотно-временных поправок используются упрощенные математические модели нестабильности часов [6]. Эти модели используют информацию об отклонении момента бортовой шкалы времени от системной  $\Delta T_s(t_0)$  и относительном отклонении частоты бортового генератора  $s(t_0)$  на момент прогнозирования  $t_0$ . Такие прогнозы частично компенсируют систематическую погрешность.

### *Заключение*

В ходе проведенного анализа погрешностей синхронизации шкал времени пространственно-разнесенных часов на основе применения спутниковых навигационных технологий и использования псевдодальномерных фазовых измерений, используемых в методологии PPP, был сделан вывод, что при данных методах измерения не учитывается влияние случайной составляющей погрешности при компенсации уходов бортовых шкал времени навигационных спутников с помощью частотно-временных поправок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large network / J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb // J. of Geoph. Research, Vol. 102, No B3. – 1997. – P. 5005-5017. – Англ.
2. ГОСТ 8.567-99. Измерение времени и частоты. Термины и определения. Введ. 01.01.2001. 2001. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 11с.
3. Толстикова А. С. Алгоритмы синхронизации пространственно-разнесенных часов по сигналам спутниковых навигационных систем. // «Метрология», приложение к журналу «Измерительная техника». – 2009. – №9. – С.25-35.
4. Новиков И. А., Рабкин В. С., Филатченков С. В., Шебанов А. А., Шебшаевич В. С. Использование спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR для синхронизации шкал времени – «Зарубежная радиоэлектроника», № 11,1987. – с 3-15.
5. Koudelka O., Ressler H. Two-way Satellite Time Transfer for the Synchronization of reference Clocks for Satellite Navigation Systems. // Proceeding of GNSS 2003. – European Navigation Conference / 22-25 April 2003. Graz, Austria.- P. 1-7.
6. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высоко стабильных генераторов: // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – № 9. – С. 70.

© А. С. Толстикова, А. Р. Безродных, 2014

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКостНОГО УРОВНЕМЕРА УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВОВ**

***Геннадий Владимирович Шувалов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, кандидат технических наук, и.о. директора, тел. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

***Валерий Николаевич Половинкин***

ФГУП ГНЦ «ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова», 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, доктор технических наук, профессор, референт научного руководителя – директора, тел. (383)210-17-26

***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Анатолий Алексеевич Мамонов***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, начальник сектора, тел. (383)210-17-26

***Иван Владимирович Клековкин***

ФГУП «СНИИМ», 630004, Россия, г. Новосибирск, пр. Димитрова, 4, зам. начальника лаборатории, тел. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

***Ольга Александровна Ясырова***

Омский институт водного транспорта ФГБОУ ВПО «НГАВТ», Россия, г. Омск, ул. Ивана Алексеева, 2, доцент кафедры физики, тел. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы экспериментального исследования параметров емкостного уровнемера установки измерения температурного коэффициента объемного расширения нефтепродуктов для метрологического обеспечения измерения их количественного учета.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, коэффициент объемного расширения, измерения.

## **RESEARCH OF PARAMETERS OF THE CAPACITOR LEVEL GAUGE OF INSTALLATION FOR DETERMINATION OF TEMPERATURE COEFFICIENT OF THE NEFTEPRODUKTOVOV VOLUME EXPANSION**

***Gennady V. Shuvalov***

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., Cand. Tech. Sci. of sciences, acting director, tel. (383)210-17-26, e-mail: shuvalov@sniim.ru

**Valery N. Polovinkin**

Federal State Unitary Enterprise GNTs «Central research institute of a name of the academician A.N. Krylov», 196158, Russia, St. Petersburg, 44 Moskovskoye Highway, the Dr.Sci.Tech., professor, the assistant of the research supervisor – the director, tel. (383)210-17-26

**Igor V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

**Oleg V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotny St., Dr.Sci.Tech., professor of Metrology and Technology of Optical Production chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

**Anatoly A. Mamonov**

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., chief of sector, tel. (383)210-17-26

**Ivan V. Klekovkin**

Federal State Unitary Enterprise SNIIM, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrov Ave., deputy chief of laboratory, tel. (383)210-12-65, e-mail: klekovkin@sniim.ru

**Olga A. Yasyrova**

Omsk institute FGBOU VPO «NGAVT's» water transport, Russia, Omsk, 2 Ivan Alekseev St., associate professor of physics, tel. (3812)31-89-29, e-mail: 300520@mail.ru

In article questions of a pilot study of parameters of the capacitor level gage of installation of measurement of temperature coefficient of volume expansion of oil products for metrological ensuring measurement of their quantitative account are considered.

**Key words:** oil products, coefficient of volume expansion, measurement.

Определение температурного коэффициента объемного расширения нефти и нефтепродуктов в условиях низких температур является весьма актуальным при создании метрологического обеспечения учета количества нефтепродуктов. Был предложен метод определения температурного коэффициента объемного расширения нефтепродуктов  $\beta$  с помощью емкостного низкотемпературного уровнемера, когда объем расширенного нефтепродукта определяется путем измерения электрической емкости конденсатора [1].

Ранее в [1] было показано, что рабочая формула для расчетов  $\beta$  будет иметь вид

$$\beta = K \cdot \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{C_2 - C_1}{\varepsilon_{омн} - 1}, \quad (1)$$

где  $K$  - нормируемый коэффициент.

Конструкция уровнемера (первичного преобразователя) выполняет функцию определения высоты подъема диэлектрической восприимчивости вытесня-

емой жидкости через косвенные измерения электрической емкости уровнемера при различных схемах его подключения к измерителю емкости.

Рассмотрим третий сомножитель уравнения измерения  $\beta$ .

$$\frac{C_2 - C_1}{\varepsilon_{отн} - 1}, \quad (2)$$

где  $C_1$  - начальное значение электрической емкости уровнемера;  $C_2$  - значение электрической емкости после нагрева;  $\varepsilon_{отн}$  - относительная диэлектрическая проницаемость измеряемого нефтепродукта.

Поскольку выражение  $(\varepsilon_{отн} - 1)$  является ничем иным как диэлектрической восприимчивостью  $\gamma$ , то преобразуем его, с учетом (8), до следующего вида

$$\varepsilon_{отн} - 1 = \gamma = \frac{C^\varepsilon - C_0}{C_0}. \quad (3)$$

Обозначим основную (суммарную емкость) пустого уровнемера до обнуления потенциала части уровнемера, используемой для определения  $\varepsilon$  как  $C_1^0$ , тогда  $C_0$  в выражении (3) будет иметь вид  $C_0 = C_1 - C_1^0$ .

При заполнении уровнемера нефтепродуктом изменится как его основная емкость до значения  $C_2$ , так и та часть, которая используется для определения  $\varepsilon$ .

Это изменение, по аналогии с вышесказанным, выразится как

$$C^\varepsilon = C_2 - C_2^0,$$

а выражение для диэлектрической восприимчивости будет иметь вид

$$\gamma = \frac{(C_2 - C_1) - (C_2^0 - C_1^0)}{C_1 - C_1^0}. \quad (4)$$

Таким образом, сомножитель уравнения измерения  $\beta$  будет содержать только значения емкостей первичного преобразователя при различных схемах его подключения к измерителю емкости, соответствующих различным температурам нефтепродукта.

$$\frac{(C_2 - C_1)(C_1 - C_1^0)}{(C_2 - C_1) - (C_2^0 - C_1^0)}. \quad (5)$$

Следовательно, для определения  $\beta$  в каждом интервале температурной шкалы необходимо знать четыре значения электрической емкости первичного преобразователя уровнемера:  $C_1; C_2; C_1^0; C_2^0$ , соответствующих различным состояниям уровнемера. Поскольку в выражении (5) используются исключительно

разности емкостей, примерно на порядок меньшие, чем сами емкости, то к измерителю емкости предъявляются довольно высокие требования к точности и стабильности показаний. В наших исследованиях использовались самые точные автоматические цифровые измерители P5083 и МНС-1100 класса 0,01-0,02 %. В табл. 1 представлены результаты исследований стабильности показаний измерителя емкости P5083 в течение 8 ч, при стабильности температуры в помещении  $\Delta T = \pm 2$  °С и измерение рабочего эталона емкости P597 с номинальной емкостью, примерно равной начальному значению уровнемера, т.е.  $C_{ном} \approx 100$  pF.

Таблица 1

Определение стабильности показаний измерителя емкости P5083

№ п/п	$C_{i,pF}$	$C_{среднее,pF}$	$(C_i - C_{cp})^2$	$\sum_{i=1}^n (C_i - C_{cp})^2$
1	100,041	100,045	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-4}$
2	100,041		$1,6 \cdot 10^{-5}$	
3	100,059		$1,96 \cdot 10^{-4}$	
4	100,055		$1 \cdot 10^{-4}$	
5	100,041		$1,6 \cdot 10^{-5}$	
6	100,041		$1,6 \cdot 10^{-5}$	
7	100,041		$1,6 \cdot 10^{-5}$	
8	100,046		$1 \cdot 10^{-6}$	
9	100,041		$1,6 \cdot 10^{-5}$	
10	100,043		$4 \cdot 10^{-6}$	

Примечание. Измерения проводились при частоте 1000 Гц и температуре  $T = 19$  °С.

Оценим стандартную неопределенность приведенного ряда измерений  $U_A$  по типу А, выраженную в абсолютных единицах.

$$U_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_{cp})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{3,97 \cdot 10^{-4}}{90}} = 2,1 \cdot 10^{-3} pF,$$

что составляет относительную стандартную неопределенность

$$U_A^I = \frac{U_A}{C_{cp}} = \frac{2,1 \cdot 10^{-3} pF}{100,045 pF} = 2,1 \cdot 10^{-5}.$$

Кроме измерителя емкостей достаточно заметный вклад в общую стандартную неопределенность  $\sum U_A$  в целом, вносят коммутируемые и сменные элементы уровнемера (внутренние электроды).

Как указывалось ранее [2], с целью оптимального выбора пары  $\left(\frac{D}{d}\right)$ , были изготовлены четыре сменных внутренних электрода ( $d$ ) для работы с одним внешним электродом ( $D$ ).

Результаты исследований случайных погрешностей, возникающих при смене электродов и коммутации (при обнулении потенциала вспомогательного внешнего электрода), приведены в табл. 2 – 5.

Для системы электродов, представленной в табл. 2,  $U_A$ , выраженная в абсолютных единицах, равна  $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ pF}$ , что составляет относительную стандартную неопределенность  $U_A^{T9} = \frac{6,6 \cdot 10^{-3} \text{ pF}}{16,237 \text{ pF}} = 4 \cdot 10^{-4}$ .

Таблица 2

Результаты исследований случайных погрешностей  
(электроды 24/23 «латунь-латунь»)

№ изм п/п	$C_1$ pF	$C_1^0$ pF	$\Delta_i =$ $C_1 - C_1^0$ pF	$\Delta_{cp}$ pF	$\Delta_i - \Delta_{cp}$ pF	$(\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>	$\sum_{n=1}^n (\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>
1	181,765	165,533	16,232		$-5 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-6}$	
2	181,675	165,465	16,210		$-27 \cdot 10^{-3}$	$729 \cdot 10^{-6}$	
3	181,833	165,603	16,230	16,237	$-7 \cdot 10^{-3}$	$49 \cdot 10^{-6}$	$1292 \cdot 10^{-6}$
4	181,853	165,608	16,245		$-8 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-6}$	
5	181,878	165,620	16,258		$-19 \cdot 10^{-3}$	$361 \cdot 10^{-6}$	
6	181,850	165,605	16,245		$-8 \cdot 10^{-3}$	$64 \cdot 10^{-6}$	

Таблица 3

Результаты исследований случайных погрешностей  
(электроды 24/22 «латунь-латунь»)

№ изм п/п	$C_1$ pF	$C_1^0$ pF	$\Delta_i =$ $C_1 - C_1^0$ pF	$\Delta_{cp}$ pF	$\Delta_i - \Delta_{cp}$ pF	$(\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>	$\sum_{n=1}^n (\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>
1	92,891	85,008	7,883		$-6,833 \cdot 10^{-3}$	$4,668 \cdot 10^{-5}$	
2	92,888	85,001	7,887		$-2,833 \cdot 10^{-3}$	$8,0275 \cdot 10^{-6}$	
3	92,917	85,026	7,891	7,88983	$-1,1667 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,128 \cdot 10^{-4}$
4	92,905	85,013	7,892		$-2,1667 \cdot 10^{-3}$	$4,6946 \cdot 10^{-6}$	
5	92,944	85,055	7,889		$-8,333 \cdot 10^{-3}$	$6,944 \cdot 10^{-7}$	
6	92,983	85,086	7,897		$-7,167 \cdot 10^{-3}$	$5,136 \cdot 10^{-5}$	

Таблица 4

Результаты исследований случайных погрешностей  
(электроды 24/22 «латунь-дюраль»)

№ ИЗМ п/п	$C_1$ pF	$C_1^0$ pF	$\Delta_i =$ $C_1 - C_1^0$ pF	$\Delta_{cp}$ pF	$\Delta_i - \Delta_{cp}$ pF	$(\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>	$\sum_{n=1}^n (\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>
1	93,052	85,153	7,899		$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,225 \cdot 10^{-5}$	
2	93,053	85,154	7,899		$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,225 \cdot 10^{-5}$	
3	93,095	85,190	7,905	7,9025	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$4,35 \cdot 10^{-5}$
4	93,102	85,196	7,906		$-3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,225 \cdot 10^{-5}$	
5	93,110	85,207	7,903		$-5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	
6	93,108	85,205	7,903		$-5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	

Таблица 5

Результаты исследований случайных погрешностей  
(электроды 24/19,2 «латунь-дюраль»)

№ ИЗМ п/п	$C_1$ pF	$C_1^0$ pF	$\Delta_i =$ $C_1 - C_1^0$ pF	$\Delta_{cp}$ pF	$\Delta_i - \Delta_{cp}$ pF	$(\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>	$\sum_{n=1}^n (\Delta_i - \Delta_{cp})^2$ pF <sup>2</sup>
1	40,210	37,140	3,070	3,07 1	$-1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
2	40,171	37,102	3,069		$-2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	
3	40,209	37,138	3,071		0		
4	40,221	37,150	3,071		0		
5	40,221	37,149	3,072		$-1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-6}$	
6	40,167	37,094	3,073		$-2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	

Для системы электродов, представленной в табл. 3,  $U_A$ , выраженная в абсолютных единицах, равна  $1,9 \cdot 10^{-3}$  pF, что составляет относительную стандартную неопределенность  $U_A^{T10} = \frac{1,9 \cdot 10^{-3} \text{ pF}}{7,9 \text{ pF}} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Для этой системы электродов  $U_A$ , выраженная в абсолютных единицах, равна  $1,2 \cdot 10^{-3}$  pF, что составляет относительную стандартную неопределенность  $U_A^{T11} = \frac{1,16 \cdot 10^{-3} \text{ pF}}{7,9 \text{ pF}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

Для этой системы электродов  $U_A$ , выраженная в абсолютных единицах, равна  $5,7 \cdot 10^{-4}$  pF, что составляет относительную стандартную неопределенность  $U_A^{T12} = \frac{5,7 \cdot 10^{-4} \text{ pF}}{3,1 \text{ pF}} = 1,9 \cdot 10^{-4}$ .



Приведенные в табл. 2, 3, 4, 5 результаты исследований различных комбинаций рабочих пар электродов свидетельствуют, что наименьшая относительная неопределенность  $U_A$  у пары с диаметрами 24/22, выполненной из разнородных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шувалов Г. В., Мамонов А. А., Ясырова О. А. Образцовые средства измерений коэффициента объемного расширения и плотности нефтепродуктов // Датчики и системы. – 2012. – № 6. – С. 27–29.
2. Шувалов Г. В., Мамонов А. А., Гапонов Ю. А., Клековкин И. В., Ясырова О. А. Разработка приборов для определения коэффициента объемного расширения и плотности нефтепродуктов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы 11-ой международной конференции АПЭП-2012, 2–4 октября 2012. – Новосибирск, 2012. – Т. 3. – С. 13–15.

*© Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин, О. В. Минин,  
А. А. Мамонов, И. В. Клековкин, О. А. Ясырова, 2014*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Галина Вячеславна Симонова*

Сибирская геодезическая государственная академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. 8913-724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

*Елена Павловна Хлебникова*

Сибирская геодезическая государственная академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. 8913-901-94-58, e-mail: HleLenka@yandex.ru

*Дмитрий Павлович Симонов*

Сибирская геодезическая государственная академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования, тел. 8923-245-38-99, e-mail: dumkah@gmail.com

Показана возможность использования статистических характеристик спектральных и интегральных распределений коэффициентов яркости для получения количественных значений показателей качества различных поверхностей. На основе полученных результатов рассмотрена возможность автоматизации контроля качества поверхностей разного типа.

**Ключевые слова:** автоматизация, контроль качества, коэффициенты яркости, статистические характеристики, спектральные и интегральные зависимости.

## **AUTOMATION OF QUALITY CONTROL SURFACES BASED ON THE ANALYSIS THE STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THEIR DIGITAL IMAGES**

*Galina V. Simonova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plakhotnogo 10, Ph. D. tech., assistant professor department of metrology and optical instrumentation technology, tel. 8913-724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

*Elena P. Khlebnikova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plakhotnogo 10, Ph. D. tech., assistant professor department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. 8913-901-94-58, e-mail: HleLenka@yandex.ru

*Dmitry P. Simonov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, str. Plakhotnogo, 10, graduate student department of Physical Geodesy and Remote Sensing, tel. 8923-245-38-99, e-mail: dumkah@gmail.com

The possibility of using the statistical characteristics of spectral and integral distributions brightness coefficients to obtain quantitative values of quality indicators of different surfaces. Discussed the possibility of automating the quality control for different types of surfaces.

**Key words:** automation, quality control, brightness coefficients, statistical characteristics, spectral and integral dependence.

Большое разнообразие объектов, различающихся по материалам, способам получения и контролируемым параметрам, требует развития различных методов и аппаратуры контроля. Решение об использовании того или иного метода необходимо принимать с учетом всех факторов, действующих как при изготовлении так и при или исследовании объекта.

В настоящее время широкое применение получили оптические методы контроля, благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Одним из наиболее простых и широко используемых методов является визуальный контроль, с помощью которого находят видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т.д. Известные методы визуального контроля очень разнообразны, но достаточно трудоёмки и не всегда однозначны. Создание объективных оптических методов изучения состояния поверхностей позволило бы обеспечить оперативность и достоверность контроля их параметров. Более того, измерения проводятся бесконтактным способом, что исключает возможность повреждения детали.

Автоматизация технологических процессов позволяет значительно повысить производительность труда и качество получаемых результатов, но требует однозначно определённых количественных характеристик исследуемого объекта. Поэтому создание методик автоматизированного измерительного контроля является востребованным и перспективным направлением метрологического обеспечения.

Исследования проводилась на образце, полученным методом микродугового оксидирования для упрочнения поверхности алюминия в среде электролитной плазмы [1].

На рис. 1 приведен результат микродугового оксидирования алюминиевой подложки (а) и фрагмент центральной части (б) поскольку каждый тип материала на исследуемом в данной работе образце имеет существенные отличия отражательной способности, то разумно оценить степень дефектности каждой области отдельно.

В процессе микродугового оксидирования поверхность исходного материала меняет свойства. Фрагменты инородного материала частично попадают на соседние области, кроме этого возникают механические повреждения и искажение рельефа поверхности. В данной работе рассматривается возможность оперативного контроля качества поверхности после оксидирования на основе анализа её цифровых изображений. В качестве инструмента анализа использовался программный продукт Erdas Imagine 8.3[2].

На рис. 2 представлен участок образца с фрагментами нарушенного слоя и результат классификации по заданным уровням градации яркости.

Нарушение поверхностного слоя образцов может оцениваться как по изменению его отражательных свойств, так и по размерам области с нарушенными свойствами. На рис. 2а представлена центральная область образца, а на рис. 2б распределение яркости по выбранным уровням дискредитации, с указанием количества пикселей отнесённого к каждому классу. Программный продукт позволяет определить локализацию пикселей заданного класса на изобра-

жении. Число уровней дискретизации выбирается экспериментально исходя из предельно возможного числа и фактически реализуемых значений яркости.

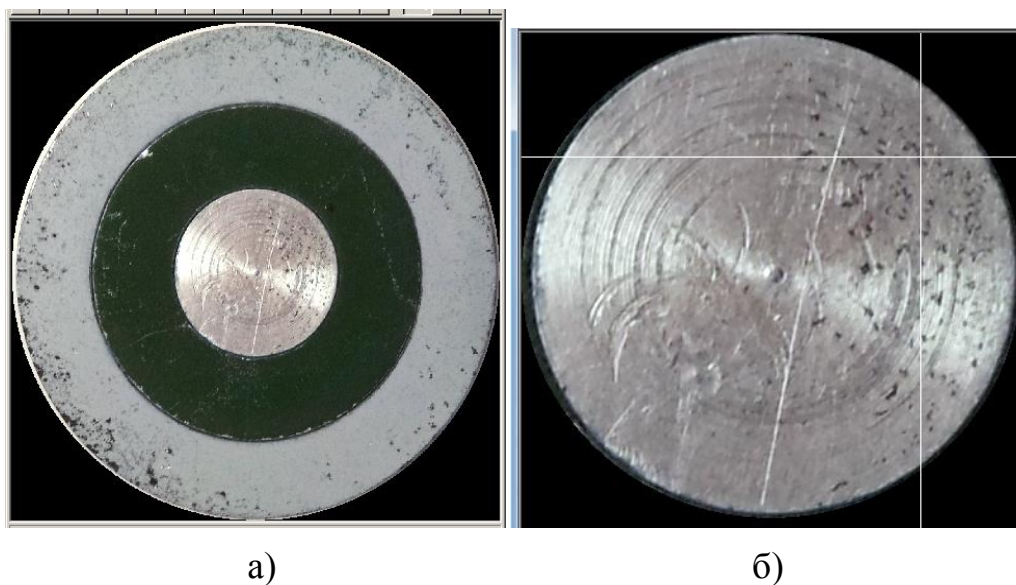


Рис. 1. Результат микродугового оксидирования алюминиевой подложки:  
 а) в центре – исходная заготовка алюминия с определенной шероховатостью поверхности, среднее кольцо (зеленое) – покрытие из плавленного кварца, периферийное кольцо – покрытие  $Al_2O_3$ ; б) центральная область образца

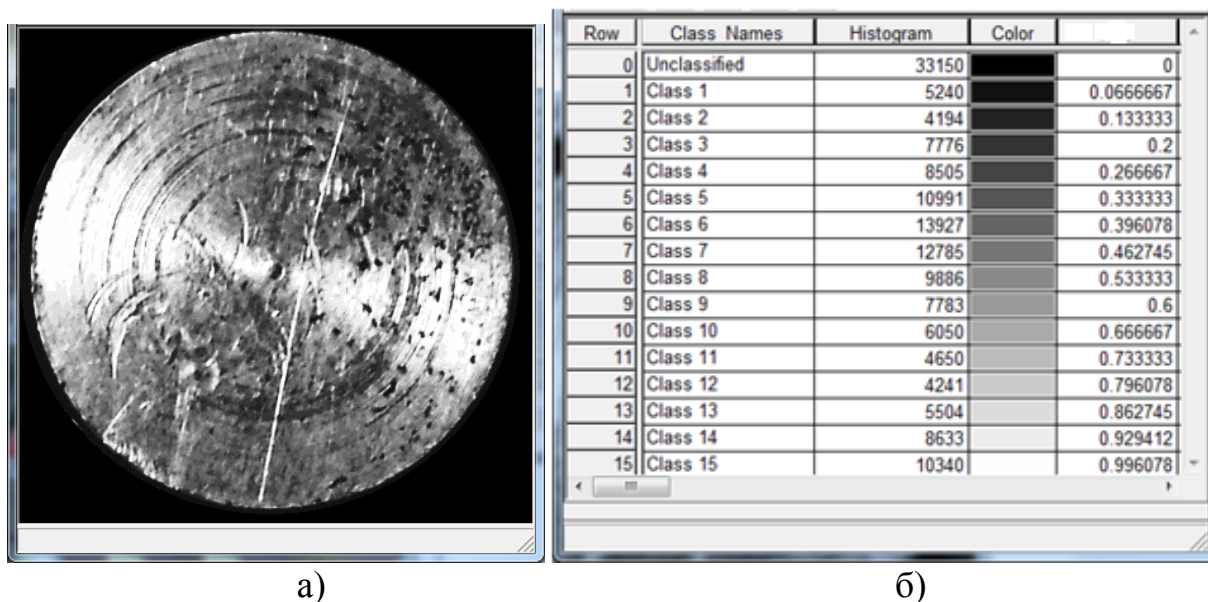
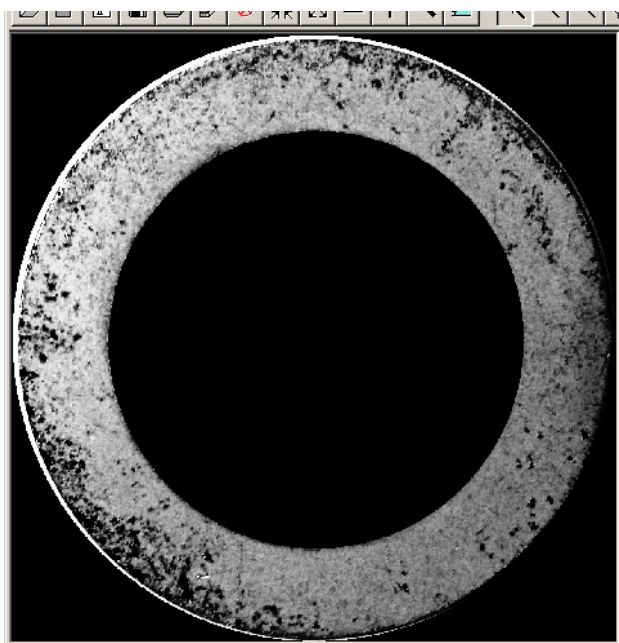


Рис. 2. Результат классификации алюминия

На рис. 3 приведен пример визуализации и классификации внешнего кольца образца ( $Al_2O_3$ ).

Количество градаций яркости выбиралось на основе выборки из полного набора градаций в соответствии с фрагментом на рис. 3б.



а)

Row	Histogram	Color	Red
0	764770		0
1	9389		0.00392157
2	13119		0.00784314
3	0		0.0117647
4	0		0.0156863
5	0		0.0196078
6	0		0.0235294
7	0		0.0313725
8	13426		0.0352941
9	0		0.0392157
10	0		0.0431373
11	0		0.0470588
12	0		0.0509804
13	0		0.054902
14	0		0.0627451
15	10971		0.0666667
16	0		0.0705882
17	0		0.0745098
18	0		0.0784314
19	0		0.0823529
20	0		0.0901961
21	7938		0.0941176
22	0		0.0980392
23	0		0.101961
24	0		0.105882

б)

Рис. 3. Фрагмент классификации по предельным значениям градации, что составляет 256 уровней в данном случае

В таблице приведены результаты определения числа пикселей, а следовательно, доли площади и размера возникающих дефектов. Показано количество пикселей и доля дефектной площади каждого типа материала.

*Таблица*

Оценка степени дефектности

№	Наименование	Общее кол-во пикселей	Дефекты	Процентное соотношение
1	Al	120505	25715	21,34
2	SiO <sub>2</sub>	362245	33025	9,12
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	543966	71085	13,07

На рис. 4 показана возможность получения распределения, формы и количества дефектов методом обучаемой классификации по методике предложенной в [3]. Выборка может осуществляться как по заданному уровню яркости, так и по размеру площади занимаемому дефектом.

Предложенный метод позволяет осуществить оперативный контроль качества поверхности различных материалов. Доля и размер критической компоненты дефектов в каждом конкретном случае подбирается экспериментально в соответствии с техническим заданием. Полученный результат сожжет служить основой для создания автоматизированной системы контроля качества поверхности.

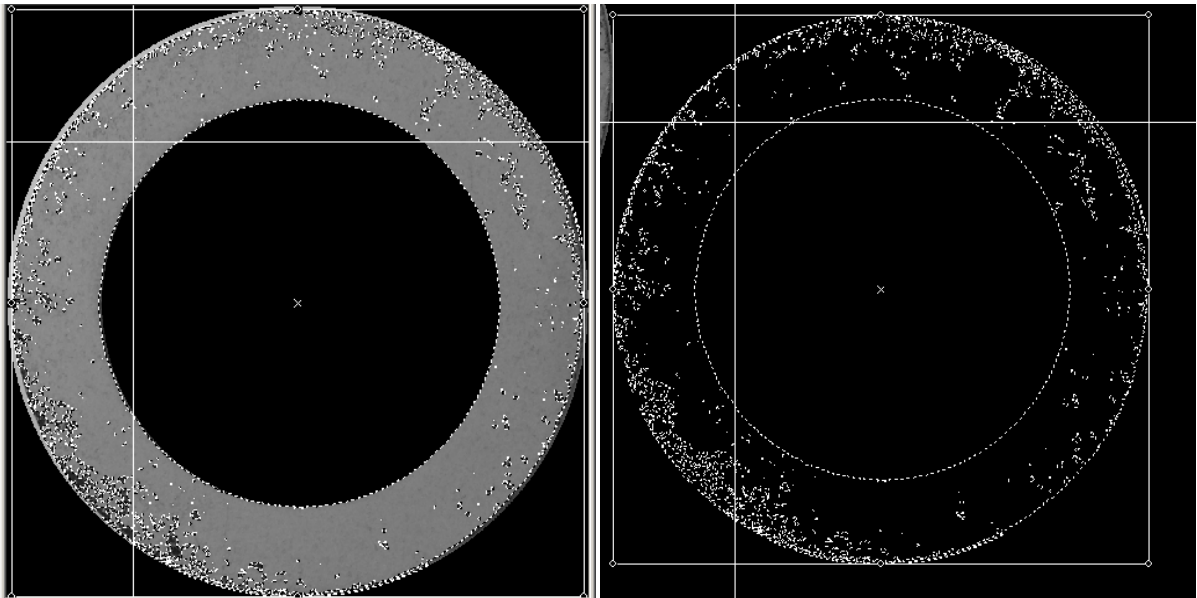


Рис. 4. Выделение дефектов заданного типа

Авторы выражают благодарность И. В. Минину и О. В. Минину за предоставленные образцы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Способ изготовления литейных форм и стержней / Минин В. Ф., Марков Г. А., Пещевицкий Б. И. и др.: авторское свидетельство СССР № 657908 от 28.12.78.
2. Симонов Д.П. Анализ возможности создания цифровых эталонов признаков для структурированных поверхностей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 209–212.
3. Симонова Г.В., Симонов Д.П. Разработка оптического метода контроля качества поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 62–66.

© Г. В. Симонова, Е. П. Хлебникова, Д. П. Симонов, 2014

## **ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ**

### ***Людмила Борисовна Воробьева***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат химических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

### ***Анна Дмитриевна Зонova***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

### ***Светлана Арсеньевна Степанова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79

В статье рассмотрены погрешности измерений содержания стеклофазы в микроструктуре корундовой керамики.

**Ключевые слова:** корундовая керамика, микроструктура, погрешность измерения, кристаллофаза, стеклофаза.

## **ESTIMATING ERROR OF THE MEASUREMENTS OF CERAMIC MICROSTRUCTURE PARAMETERS**

### ***Ludmila B. Vorobyeva***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the chemical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

### ***Anna D. Zonova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, senior teacher, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

### ***Svetlana A. Stepanova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-79

In article studied errors of the measurements to content of the glassphase in the microstructure of alumina ceramics.

**Key words:** alumina ceramics, cristalphase, error of the measurements, glassphase, microstructure.

Соотношение в структуре керамики размеров кристаллофазы, размеров и качества включений стеклофазы в совокупности с порами тесно взаимосвязаны и определяют эксплуатационные свойства изделия [1]. Кристаллическая фаза обеспечивает высокую механическую прочность керамики, а присутствие стеклофазы в составе позволяет керамическим деталям паяться друг с другом и с металлами посредством легкоплавких и тугоплавких стеклоприпоев. Вышесказанное в совокупности с широким распространением изделий из керамики является основанием актуальности проблемы изучения микроструктуры керамики, а, следовательно, и точности измерения составляющих микроструктуры.

Исследована микроструктура изделия из вакуум-плотной корундовой керамики ВК-95, содержащей 95 % оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в качестве основной кристаллической фазы, а также 3 % MgO и 2 %  $SiO_2$ , наличие последних определяет особенности технологии и эксплуатационные свойства. Изделие имело форму полого цилиндра диаметром 100 мм и длиной 70 мм, толщина стенки составляла 4 мм. Изделие изготавливалось методом горячего литья под давлением с последующим двухстадийным отжигом.

#### *Оценка точности количественного определения показателей микроструктуры керамики линейным методом*

Для определения содержания стеклофазы, пористости, размера зерен кристаллической фазы исследуемой керамики использовались микроскопы МИМ-7, ММР- 2Р, оснащенные окуляр-микрометром МОВ-И-15Х.

При проведении данной работы экспериментальным путем была установлена точность метода количественного определения параметров микроструктуры линейным методом на аншлифах керамики ВК95-1.

Погрешность при определении содержания стеклофазы складывается из следующих элементов [2, 3]:

- погрешности, вызванной неточным совпадением линии двойного штриха окуляр-микрометра с границей участка стеклофазы, т.е. неточным измерением отдельного участка стеклофазы ( $\delta_1$ );

- погрешности, вызванной недостаточным количеством измеряемых полей ( $\delta_2$ );

- погрешности, вызванной неравномерным распределением стеклофазы по плоскости аншлифа ( $\delta_3$ );

- погрешности, вызванной неравномерным распределением стеклофазы в объеме изолятора ( $\delta_4$ ).

Суммарная погрешность рассчитывалась по закону сложения случайных погрешностей:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2}. \quad (1)$$

Для определения погрешности  $\delta_1$  измерение содержания стеклофазы в одном поле построили 10 раз. Отдельные участки стеклофазы в керамике ВК95-1



имеет размер 1,5-3,0 мкм. Погрешность измерения участка стеклофазы в делениях окуляр-микрометра составляет  $\pm 1$  %. Погрешность  $\delta_1$  составляет 0,2-0,3 % (табл. 1).

Погрешность  $\delta_2$ , вызванную недостаточным количеством измеряемых полей, определяли измерением содержания стеклофазы на одном аншлифе по 5, 10 и 20 полям (табл. 2).

Таблица 1

Погрешность определения содержания стеклофазы в одном поле

№ образца	содержания стеклофазы, %										минимальное содержание стеклофазы, %	максимальное содержание стеклофазы, %	$\delta_1$ , %
	измерения одного поля в образце												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	5,8	6,0	5,8	5,9	5,9	5,9	6,0	5,8	5,9	5,9	5,8	6,0	0,2
2	4,3	4,6	4,6	4,5	4,4	4,6	4,3	4,6	4,4	4,5	4,3	4,6	0,3
3	5,4	5,2	5,4	5,1	5,1	5,2	5,4	5,4	5,3	5,2	5,1	5,4	0,3
4	6,2	6,2	6,1	6,4	6,4	6,2	6,3	6,2	6,3	6,2	6,1	6,4	0,3
5	6,9	6,7	6,7	6,9	6,8	6,8	6,8	6,9	6,7	6,9	6,7	6,9	0,2
6	4,1	4,1	4,1	4,4	4,2	4,1	4,3	4,4	4,4	4,3	4,1	4,4	0,3
7	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	7,5	7,7	7,5	7,7	7,5	7,7	0,2
8	9,2	9,5	9,5	9,5	9,5	9,3	9,4	9,4	9,2	9,5	9,2	9,5	0,3
9	8,6	8,8	8,7	8,7	8,8	8,6	8,7	8,8	8,8	8,7	8,6	8,8	0,2
10	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	7,8	8,0	7,8	8,0	0,2

Таблица 2

Значение погрешности  $\delta_2$ , обусловленной недостаточным количеством измерений

№ образца	Содержание стеклофазы по 5 полям, %	Содержание стеклофазы по 10 полям, %	Содержание стеклофазы по 20 полям, %	$\delta_2$ , %
1	4,3	4,9	4,8	0,6
2	8,5	8,9	9,2	0,7
3	6,8	6,5	6,3	0,5
4	7,4	8,0	7,6	0,6
5	5,1	5,8	5,4	0,7

Погрешность  $\delta_3$ , обусловленная неравномерным распределением стеклофазы в плоскости аншлифа, включает в себя две предыдущие погрешности  $\delta_1$  и  $\delta_2$  и вычисляется по ним

$$\delta_3 = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,7^2} = 0,77 \%. \quad (2)$$

Погрешность  $\delta_4$ , вызванная неравномерным распределением стеклофазы в объеме керамического изолятора, представляет собой суммарную погрешность на  $\delta_2$  и  $\delta_3$ :

$$\delta_4 = \sqrt{\delta_2^2 + \delta_3^2} = \sqrt{0,7^2 + 0,77^2} = 1,05 \%. \quad (3)$$

Таким образом, общая погрешность количественного определения стеклофазы в изоляторе по аншлифу линейным методом составляет

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{0,3^2 + 0,7^2 + 0,77^2 + 1,05^2} = 1,5 \% .$$

Погрешность определения среднего размера кристаллов корунда обуславливается теми же причинами, что и погрешность при определении содержания стеклофазы, и складывается из следующих элементов:

- погрешности, вызванной неточным измерением размеров отдельного кристалла ( $\Delta_1$ );
- погрешности, вызванной недостаточным количеством измеряемых кристаллов ( $\Delta_2$ );
- погрешности, вызванной неравномерной зернистостью кристаллов в плоскости аншлифа ( $\Delta_3$ );
- погрешности, вызванной неравномерностью зернистости кристаллов в объеме изолятора ( $\Delta_4$ ).

Погрешность  $\Delta_1$  определялась повторными измерениями одних и тех же зерен. Независимо от зернистости кристаллов корунда  $\Delta_1$  равна 0,4 мкм. Величина погрешности, равная 0,4 мкм, объясняется скорее разрешающей способностью микроскопа при используемом увеличении (360X), чем размерами кристаллов. Погрешность  $\Delta_2$  определялась измерениями 50, 100 и 250 кристаллов в плоскости аншлифа. Она равна 0,8 мкм (табл. 3).

Погрешность  $\Delta_3$  является суммарной из погрешностей измерений  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ :

$$\Delta_3 = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,8^2} = 0,9 \text{ мкм}. \quad (4)$$

При определении погрешности  $\Delta_4$  выяснилось, что неравномерность зернистости кристаллов корунда в разных сечениях перекрывается их равномерностью в любом сечении и дополнительной погрешности не возникает. Отсюда  $\Delta_4 = 0,9$  мкм, а также  $\Delta_{\text{общ}} = 0,9$  мкм.

Значение погрешности, вызванной недостаточным количеством определяемых кристаллов ( $\Delta_2$ )

№ аншлифа	Средний размер кристаллов корунда по 50 измерениям, мкм	Средний размер кристаллов корунда по 100 измерениям, мкм	Средний размер кристаллов корунда по 250 измерениям, мкм	$\Delta_2$ , мкм
1	5,6	6,4	6,2	0,8
2	5,1	4,5	4,4	0,7
3	6,8	7,3	7,5	0,7
4	7,2	8,0	7,9	0,8
5	7,3	6,5	6,7	0,8
6	5,8	6,5	6,2	0,7

Погрешность определения пористости керамики складывается из следующего [2, 3]:

- неравномерности размера пор ( $\delta'_1$ );
- наличия выколов ( $\delta'_2$ );
- неравномерности распределения пор по плоскости аншлифа ( $\Delta_3$ );
- неравномерности распределения пор по объему изолятора ( $\delta'_4$ ).

Погрешности, вызванные неравномерностью размеров пор, а также неравномерностью их распределения по плоскости аншлифа и объему изолятора, родственны. Определялись погрешности  $\delta'_1$ ,  $\delta'_2$  и  $\delta'_4$  одним и тем же способом – измерением пористости по возрастающему числу полей (10, 20, 25 полей). В результате достаточно большого числа измерений установлено, что  $\delta'_1 = \delta'_2 = \delta'_4 = 1\%$ . Эффект погрешности из-за образования «выколов» сильнее всего сказывается в двух случаях:

- при пережоге керамики, когда поры укрупняются и теряют округлую форму;
- в случае ее мелкокристаллической структуры, когда мелкие кристаллы корунда, окружающие поры, легко выкрашиваются в процессе изготовления аншлифа.

Статистическим путем установлено, что максимальная величина  $\delta'_2 = 1\%$ . Поскольку неравномерность распределения пористости по объему равна неравномерности их распределения по сечению аншлифа и дополнительной погрешности не вносит, то суммарная погрешность определения пористости вычисляется по формуле:

$$\delta'_\Sigma = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_4^2} = 1,7\% . \quad (5)$$

Таким образом, установлено, что при линейном методе измерения параметров микроструктуры керамики по аншлифам максимальная погрешность составляет:

- при определении содержания стеклофазы – 1,5 %;
- при измерении размеров кристаллов – 0,9 мкм;
- при определении пористости – 1,7 %.

Решетников А.М. и Самохина Р.А. основным фактором, определяющим прочность спая корундовой керамики с металлом, считают миграцию стеклофазы в металлизационный слой. По их мнению, мигрирующая стеклофаза способствует протеканию химических реакций между компонентами керамики и металлизационного слоя, образованию переходного слоя и, кроме того, является связующим элементом между зёрнами молибдена и керамикой. Они установили, что стеклофаза керамики способна мигрировать в металлизационный слой за счет капиллярных сил и смачивания зёрен молибдена. Существенное влияние на процесс миграции стеклофазы в металлизационный слой и его вакуумную плотность оказывают количество и вязкость стеклофазы, а также характер её распределения в керамическом изделии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симонова Г. В., Плетнёв П. М., Степанова С. А. Связь микроструктуры функциональной керамики с ее физико-техническими свойствами // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5. – С. 80–84.
2. Симонова Г. В., Плетнёв П. М., Степанова С. А. Разработка оптического метода контроля качества функциональной керамики // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 5. – С. 147–150.
3. Разработка бесконтактных методов количественного определения структурных характеристик керамических материалов / Г. В. Симонова, Д. П. Симонов, П. М. Плетнёв, С. А. Степанова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 2. – С. 204–208.

© Л. Б. Воробьёва, А. Д. Зонова, С. А. Степанова, 2014

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ

*Александр Фёдорович Бродников*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

*Виктор Яковлевич Черепанов*

Сибирская государственная геодезическая академия, Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

Рассмотрена методика реализации реперной точки затвердевания металлов в миниатюрных ампулах. Предложен способ управления тепловым режимом ампулы с целью достижения большой длительности фазового перехода.

**Ключевые слова:** методика, реперная точка, температурная шкала, температура, воспроизведение и передача единицы, фазовые переходы, индий, затвердевание.

## OPTIMIZATION OF A THERMAL MODE AT REPRODUCTION OF REFERENCE POINTS A TEMPERATURE SCALE

*Alexander F. Brodnikov*

Siberian Branch of Russian Academy of Science, Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, 11, Akademika Lavrentieva prospect, cand. tech. sci, senior scientist, tel. (383)329-45-82, e-mail: A.F.Brodnikov@inp.nsk.su

*Victor Ya. Cherepanov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Ph.D., Prof. of Department Metrology and Technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: cherepanov73@mail.ru

The experimental of realization of reference points of hardening of metals in tiny ampoules is considered. The way of management by a thermal mode of an ampoule with the purpose of achievement of the big duration of phase transition is offered.

**Key words:** experimental method, reference point, temperature scale, temperature, reproduction and transfer unit, phase transitions, Indium (In), solidification.

Процесс реализации реперных точек, например, при температуре затвердевания, заключается в нагревании ампулы, содержащей чистое вещество в твердом состоянии, до температуры, превышающей значение температуры плавления, и последующего охлаждения вещества. При наступлении фазового перехода затвердевания наблюдается стабилизация температуры (площадка на кривой зависимости температуры от времени), обусловленная выделением теплоты, равной теплоте плавления вещества.

Вопросам влияния температурного режима на качество площадок при фазовых переходах в классических полногабаритных ампулах реперных точек, посвящён большой ряд работ, например, [1, 2]. Нагревание и охлаждение ампул осуществляют обычно в вертикальных трубчатых печах. При этом перегрев (или недогрев) печи относительно температуры фазового перехода составляет несколько кельвинов. Такие ампулы содержат обычно более одного килограмма высокочистого вещества. Зачастую именно большой массой и чистотой вещества объясняют значительную длительность площадок при фазовых переходах, которая составляет несколько часов.

Ранее в [3, 4] были рассмотрены основные принципы воспроизведения температуры фазовых переходов в миниатюрных ампулах, содержащих менее десяти граммов чистого вещества. Показано, что при фазовом переходе плавления или затвердевания происходит дополнительное поглощение или выделение теплоты, которое приводит к стабилизации температуры ампулы с веществом на некоторый период времени  $\Delta\tau$ , равный

$$\Delta\tau = \Delta H / Q, \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – теплота плавления (затвердевания) вещества;  $Q$  – тепловой поток на поверхности ампулы.

Соотношение (1) показывает важную особенность рассматриваемого процесса – продолжительность «площадки» фазового перехода на кривой плавления или затвердевания зависит не столько от массы вещества, а сколько от отношения значений величин  $\Delta H$  и  $Q$ . Благодаря этому появляется возможность создания миниатюрных ампул с химически активными и (или) вредными веществами с достаточной для практики продолжительностью фазового перехода.

В данной работе предложена и экспериментально исследована методика получения оптимального теплового режима, обеспечивающего достаточную длительность и стабильность площадки затвердевания индия при его размещении в термометрическом канале калибратора температуры.

Как следует из (1), при отсутствии теплового потока, воздействующего на навеску вещества, длительность фазового перехода может быть бесконечной. Значение  $Q$  этого потока зависит от теплового сопротивления  $R$  между ампулой и окружающей её средой, а также от разности  $\Delta T$  значений их температуры:

$$Q = \Delta T / R. \quad (2)$$

В связи с этим целесообразно осуществлять плавление или затвердевание металла при тепловом режиме ампулы, близком к адиабатическому, при котором разность значений температуры ампулы и окружающей его среды минимальна. Например, для получения площадки плавления (рис. 1) достаточно установить в калибраторе температуру  $T_2$ , минимально превышающую температуру  $T_{\text{ф}}$  плавления, и погрузить в него ампулу. При достижении ампулой

температуры плавления наступает фазовый переход, длительность которого тем больше, чем ближе температура калибратора к температуре перехода.

Однако процесс воспроизведения температуры затвердевания имеет особенность, затрудняющую получение такого режима в калибраторе. Для получения площадки затвердевания необходимо охладить расплавленный металл до некоторой температуры  $T_X$ , которая может быть значительно ниже температуры  $T_\Phi$  затвердевания и значения которой для разных металлов различны. Поэтому калибратор надо сначала охладить от температуры  $T_2$  до температуры  $T_0$ , которая несколько ниже значения  $T_X$ , а затем, после начала площадки затвердевания, вновь установить в нём температуру  $T_1$ , максимально близкую к температуре  $T_\Phi$  затвердевания. Осуществить такую перестройку температурного режима калибратора затруднительно из-за большой амплитуды колебаний его температуры при переходных процессах и их значительная длительность. Это не позволяет оперативно изменять и точно устанавливать минимальную разность температуры, а, соответственно, и интенсивность теплообмена между ампулой и окружающей её средой.

В связи с этим появилась идея управлять тепловым режимом ампулы с помощью малоинерционного нагревателя, размещённого на её внешней поверхности. В этом случае процесс воспроизведения температуры затвердевания заключается в следующем (рис. 1): 1) в калибраторе установить температуру  $T_0$  несколько ниже, чем  $T_X$ ; 2) поместить ампулу в калибратор; 3) при стабилизации её температуры включить в момент времени  $\tau_1$  нагреватель (мощность  $P_1$ ) и выключить его только после перегрева ампулы до температуры  $T_2$  в момент времени  $\tau_2$ ; 4) наблюдать за переохлаждением ампулы до температуры  $T_X$ ; 5) после начала затвердевания включить в момент времени  $\tau_3$  нагреватель с мощностью  $P_2$ , необходимой для установления значения  $T_1$ , близкого к  $T_\Phi$ .

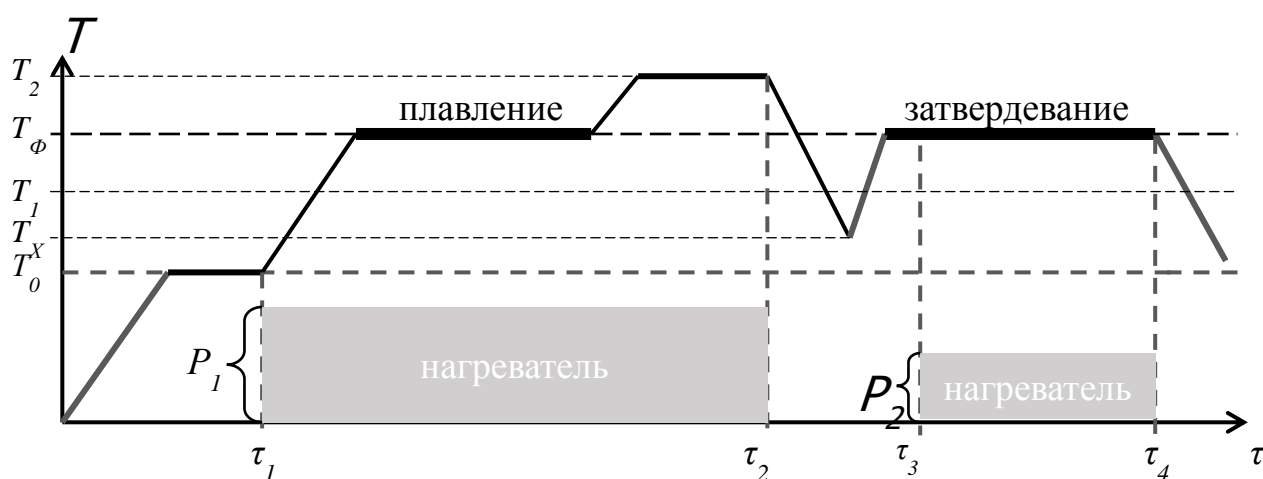


Рис. 1. Температура калибратора, ампулы и нагревателя при воспроизведении реперных точек плавления и затвердевания

Такая методика была опробована путём воспроизведения температуры затвердевания индия ( $156,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в миниатюрной ампуле ( $1,4\text{ г}$ ). Для этой цели использовалась измерительная установка, представленная на рис. 2. Сначала в измерительном блоке калибратора 1 устанавливают температуру  $T_x = 155,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , достаточную для переохлаждения и кристаллизации индия после его плавления. Затем в один из каналов блока помещают пробирку с индием 2 и включают нагреватель 4. Его мощность  $P_1$  устанавливают с помощью регулируемого источника 11 достаточной ( $\approx 720\text{ мВт}$ ), чтобы сократить продолжительность площадки плавления за счёт быстрого перегрева ампулы на  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительно температуры  $T_x$ . После расплавления индия ( $T_2 = 157\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) нагреватель выключают и наблюдают за процессом переохлаждения по изменению сигнала контрольного термометра 3, которое измеряет вторичный прибор 8 и регистрирует компьютер 9. После выхода на площадку затвердевания вновь включают нагреватель. Значение его мощности  $P_2$  ( $\approx 130\text{ мВт}$ ) устанавливают с таким расчётом, чтобы температура  $T_1$  нагревателя была ниже температуры  $T_{\phi}$  затвердевания не более, чем на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этом случае площадка затвердевания может длиться несколько часов (рис. 3), а воспроизводимость её температуры находится в пределах  $\pm 5\text{ мК}$ .

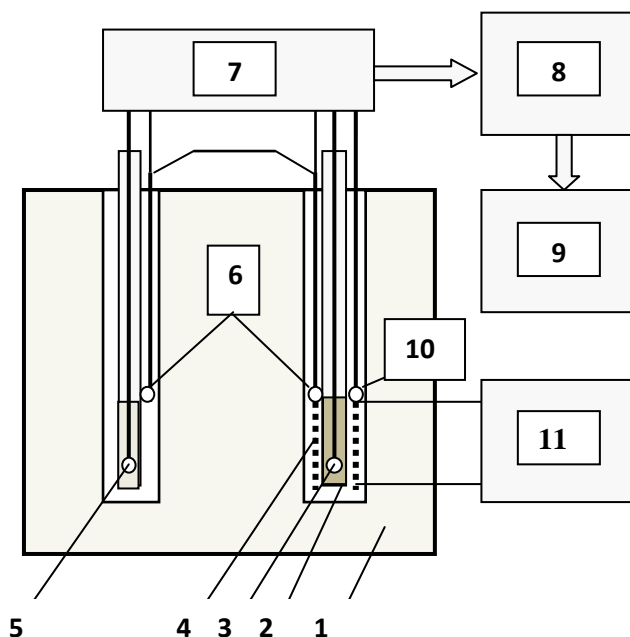


Рис. 2. Схема измерительной установки:

1 – калибратор, 2 – пробирка с индием, 3 – термопара, 4 – нагреватель  
 5 – эталонный термометр, 6 – дифференциальная термопара, 7 – коммутатор,  
 8 – измеритель термометрических сигналов, 9 – ПК, 10 – контрольный термометр,  
 11 – регулируемый источник напряжения.

Для регистрации хода изменений температуры при воспроизведении реперной точки затвердевания использовался контрольный термометр сопротивления 10 на основе миниатюрного датчика фирмы «Heraeus». Дифференциаль-



ная термопара 6 предназначена для аттестации исследуемой ампулы в качестве однозначной меры температуры по эталонному термометру 5. Термопара изготовлена из медных и константановых термоэлектродов, содержит 5 пар спаев и имеет при температуре 156 °С чувствительность 200 мкВ/°С. Это обеспечивает погрешность определения действительного значения температуры затвердевания дифференциальным методом [3, 4] менее 5 мК при погрешности измерителя 1 мкВ.

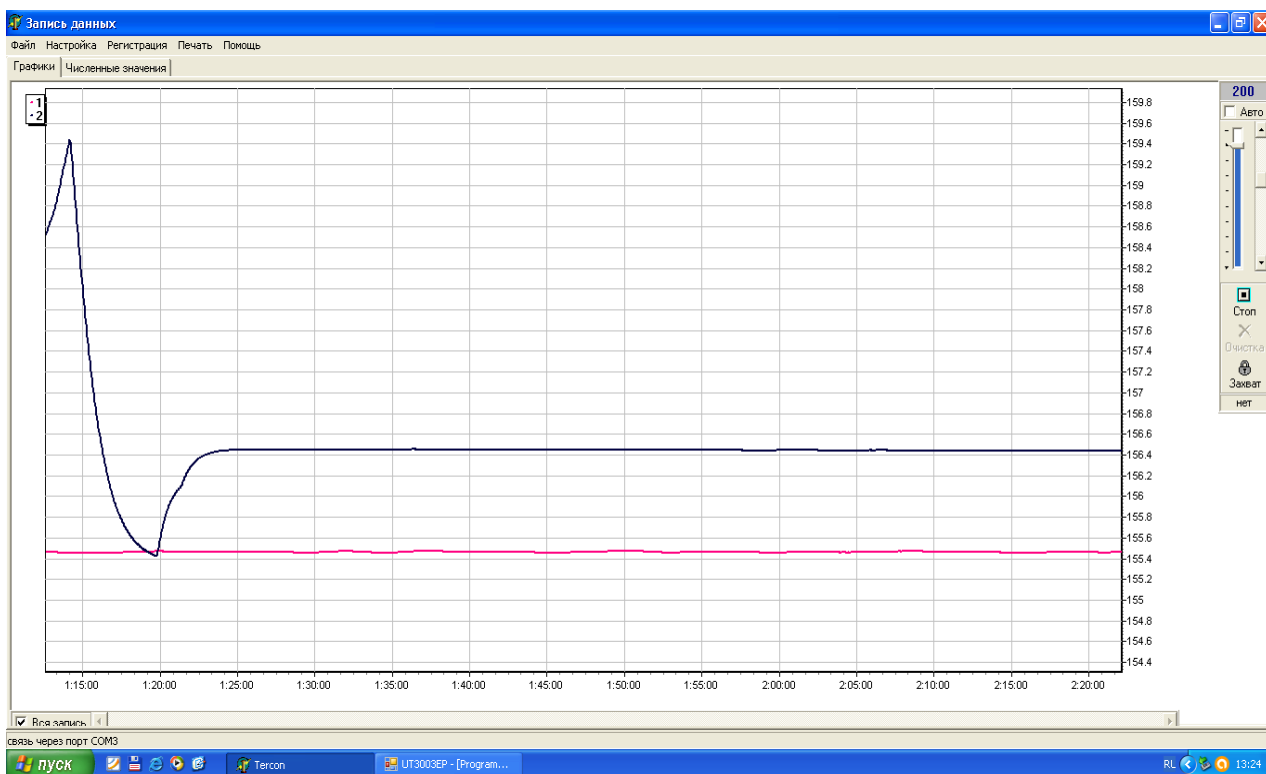


Рис. 3. Характер изменения температуры при фазовом переходе затвердевания индия в миниатюрной ампуле (верхняя кривая) и температура эталонного термометра

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность предложенной методики оптимизации теплового режима миниатюрной ампулы при воспроизведении реперной точки затвердевания индия. Методику можно использовать для других реперных точек, в том числе, реализуемых в традиционных крупногабаритных ампулах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. WG2 / Recommended values of temperature on the ITS-90 for a selected set secondary reference points // Metrologia. – 1996. – №.33. – P. 133–154.
2. Иванова А. Г., Ильин А. Ю. Анализ условий образования внутреннего фронта раздела фаз и их влияние на температуру затвердевания цинка // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 43–46.

3. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Результаты исследований и перспективы использования миниатюрных ампул реперных точек для воспроизведения и передачи температурной шкалы // Измерительная техника. – 2009. – №10. – С. 49–52.

4. Brodnikov A. F., Cherepanov V. Ya. The results of investigations and prospects for using miniature ampoules of fixed points to reproduce and transfer a temperature scale // Measurement Techniques. Springer Link. – 2010, Volume 52. – P.1096–1100.

© А. Ф. Бродников, В. Я. Черепанов, 2014

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭТАЛОННОГО БАЗИСА**

### ***Александр Владимирович Кошелев***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: alvlkosh@yandex.ru

### ***Анна Александровна Дубинина***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

### ***Юрий Григорьевич Костына***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, тел. (383)343-25-77, e-mail: kostinaug@mail.ru

### ***Вера Леонидовна Неклюдова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, тел. (383)343-25-77, e-mail: neklyudova@ssga.ru

В данной работе по результатам экспериментальных светодальномерных измерений эталонного базиса получены более точные алгоритмы для учета влияния тропосферы на результаты светодальномерных и интерференционных измерений.

**Ключевые слова:** показатель преломления атмосферы, точность измерений, эталонный базис.

## **DETERMINATION OF REFRACTION INDEX OF THE ATMOSPHERE THROUGH THE MEASUREMENTS RESULTS WITH ON ELECTRONICS RANGE – FINDER OF STANDARD BASIS**

### ***Aleksandr V. Koshelev***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Docent of Department of the Specal devicis and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: alvlkosh@yandex.ru

### ***Anna A. Dubinina***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Assistant of Department of the Specal devicis and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: kaf.suit@ssga.ru

### ***Yuriy G. Kostyna***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Do-cent of Department of Higher mathematics, tel. (383)343-25-77, e-mail: kostinaug@mail.ru

*Vera L. Neklyudova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., Do-  
cent of Department of Higher mathematics, tel. (383)343-25-77, e-mail: neklyudova@ssga.ru

In the article the authors describe when through the measurements results with electronic range-finder of a standard basis the more precise algorithms to register troposphere influence on the electronic range-finder and interference measurements results have been obtained.

**Key words:** refraction index of atmospheres, measurement accuracy, standard basis.

В настоящее время современные зарубежные лазерные дальнометры и электронные тахеометры по точности линейных измерений существенно выше, чем аналогичные приборы, выпускаемые раньше как в России, так и за рубежом. По мнению автора, существенное уменьшение их результирующей погрешности произошло за счет применения более точных алгоритмов для учета влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений. Однако точные алгоритмы, используемые в современных западных дальнометрах, в открытой печати автором не обнаружены.

В данной работе автором предпринята попытка по результатам экспериментальных светодальномерных измерений эталонных линий уточнить известные алгоритмы Баррелла и Сирса, а также определить их реальную точность и эффективность. Известно, что измеренное светодальномером расстояние с учетом воздействия атмосферы определяется по формуле [1,2]

$$D_{изм} = \frac{V \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2n} \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $c$ -скорость света в вакууме;  $\tau$  - время распространения оптической волны в тропосфере со скоростью  $V=c/n$  до отражателя и обратно;  $n$  – показатель преломления тропосферы.

Из формулы (1) следует, что истинное расстояние  $D_0$ , неискаженное воздействием атмосферы, можно получить в вакууме, когда  $n=1$  и оно определяется по формуле

$$D_0 = \frac{c}{2} \cdot \tau.$$

Тогда формулу (1)можно переписать в виде

$$D_{изм} = \frac{D_0}{n}$$

или

$$n = \frac{D_0}{D_{изм}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что по результатам измеренного дальнометром расстояния  $D_{изм}$ , например, максимальной длины эталонного базиса  $D_0$ , можно

определить наиболее близкое к истинному значение показателя преломления  $n$ . В исследованиях, выполненных в работе [3,4] показано, что формулы Баррелла и Сирса, используемые раньше только в интерферометрах позволяют более адекватно определять показатель преломления оптических волн для светодальнономерных измерений. Эти формулы имеют следующий вид[1]:

$$N_{0g} = 272,6129 + \frac{1,5294}{\lambda^2} + \frac{0,01367}{\lambda^4}, \quad (3)$$

$$N_g = N_{0g} \frac{T_0 \cdot P}{P_0 \cdot T} - \left( 17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) значение индекса показателя преломления  $N_{0g}$  определено для стандартных условий температуры воздуха  $T_0 = 273,16 + 15^{\circ}C = 288,16^{\circ}K$  и давления  $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$  Однако в данной работе установлено, что эти формулы содержат весьма значительные систематические погрешности.

Необходимость применения одного и того же значения группового показателя преломления в лазерных интерферометрах [3] и светодальномерах объясняется тем, что любое реальное оптическое излучение всегда является модулированным. Например, в интерферометрах лазерное излучение всегда модулировано по частоте и фазе нестабильностью частоты лазерного излучения. Другим источником амплитудной модуляции лазерного излучения в интерферометрах является их ограничение временем измерения длины. Поскольку при включении и выключении интерферометра происходит модуляция излучения лазера импульсом по амплитуде. Длительность этого импульса определяется временным интервалом самих измерений.

Кроме того, еще одним подтверждающим этого же высказывания является то, что любое оптическое излучение - это поток квантов (импульсов) света, каждый из которых имеет длительность порядка  $10^{-8}$  с. Известно, что импульсы в диспергирующей среде распространяются только с групповой скоростью.

На современном этапе развития фазовой светодальнометрии справедливо полагают, что в качестве истинного и независимо измеренного расстояния можно использовать длины линий определенные инвариантными проволоками. В этой работе автором при проведении экспериментальных исследований использовались линии эталонного базиса достаточно точно и многократно измеренные инвариантными проволоками.

Максимальная длина базиса, для которого изначально точно было определено значение показателя преломления, атмосферы, имеет длину 1103 м. Для проведения полевых измерений автор использовал высокоточный электронный тахеометр TS02 фирмы Leica. В этом дальномере используется длина волны несущего излучения  $\lambda = 0,78 \text{ мкм.}$  По результатам экспериментальных светодальнономерных измерений максимальной длины базиса было установлено, что измеренное расстояние  $D_{из}$  в соответствии с формулой (1), меньше на 12мм истин-

ного расстояния  $D_0$ , т.к. показатель преломления воздуха  $n > 1$ . Полевые измерения этой линии были выполнены при температуре воздуха  $T = 273,16 + 23,2^{\circ}\text{C} = 296,4^{\circ}\text{K}$ , давлении  $P = 747,8 \text{ мм рт. ст.}$  и влажности  $e = 17,35 \text{ мм рт. ст.}$ . Для этих метеоданных расчетное значение индекса показателя преломления вычисленное по формулам (3) и (4) с учетом длины волны несущего излучения  $\lambda = 0,78 \text{ мкм}$  составило  $N = 262,2830$ .

Определенное по формуле (2) значение реального показателя преломления воздуха для этих же метеоданных имеет значение  $n = 1,0000108747$ . Полученной величине показателя преломления оптических волн соответствует значение индекса показателя преломления  $N = (n - 1) \cdot 10^6 = 10,8747N \text{ ед.}$

Отсюда следует принципиально важный вывод, что вычисленное по формуле (4) Баррелла и Сирса значение индекса показателя преломления тропосферы больше реального индекса показателя преломления воздуха в  $262,2830/10,8747 = 24,1187$  раза.

Поэтому для определения корректного индекса показателя преломления оптических волн в атмосфере по формулам Баррелла и Сирса автором была выполнена нормировка формулы (3), путем деления ее составляющих на безразмерный коэффициент  $K = 24,1187$ . В результате формула (3) приняла следующий вид

$$\frac{N_{0g}}{K} = \frac{272,6129}{24,1187} + \frac{1,5294}{24,1187 \cdot \lambda^2} + \frac{0,01367}{24,1187 \cdot \lambda^4} = 11,3030 + \frac{0,0634}{\lambda^2} + \frac{0,00057}{\lambda^4}, \quad (5)$$

а нормированная вторая составляющая в уравнении (4) может быть представлена выражением

$$\frac{1}{24,1187} \left( 17,045 - \frac{0,5572}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{T} = \left( 0,7067 - \frac{0,0231}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{T}. \quad (6)$$

В итоге, уточненное уравнение индекса показателя преломления Баррелла и Сирса (4), приняло вид

$$N_k = \left( 11,3230 + \frac{0,0634}{\lambda^2} + \frac{0,00057}{\lambda^4} \right) \frac{T_0}{P_0} \frac{P}{T} - \left( 0,7067 - \frac{0,0231}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{T}. \quad (7)$$

Для конкретного значения длины волны  $\lambda = 0,78 \text{ мкм}$ , температуры воздуха  $T_0 = 286,16^{\circ}\text{K}$  и атмосферного давления  $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$  формула (7) может быть представлена уравнением

$$N_k = 4,3257 \cdot \frac{P}{T} - 0,6687 \cdot \frac{e}{T}. \quad (8)$$

В процессе проведения экспериментальных исследований высокоточным тахеометром были выполнены точные измерения пяти линий, имеющие в метрах следующие значения: 1103м, 900м, 660м, 420м и 192 м. Результаты учета поправок по формуле (8) с использованием точно измеренных расстояний для первых четырех линий дали полное совпадение с их точными эталонными значениями базиса. Лишь для линии с длиной 192 м ее вычисленное значение отличалось от эталонного расстояния на величину в 1мм. Важно отметить, что и в этом случае исправленный результат измерения находился в пределах инструментальной точности самого прибора  $\pm 1$  мм.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования дают основания утверждать, что в данной работе получены более точные аналоги формул Баррелла и Сирса, позволяющие в 24 раза точнее определять реальное значение показателя преломления земной атмосферы. Поэтому при их использовании можно повысить точность как высокоточных импульсных и фазовых светодальномерных, так и оптических интерференционных измерений.

В заключении важно отметить, что выполненные исследования также открывают перспективы возрождения отечественного производства высокоточных светодальномеров и электронных тахеометров. При использовании, полученных автором формул, погрешности измерений российских дальномеров по точности не будут уступать их западным аналогам. Поскольку в светодальномерах и тахеометрах, создаваемых в России более двух десятков лет назад, инструментальные погрешности были на уровне  $\pm 1$ мм, как и в современных западных приборах. Примером такого прибора может служить российский светодальномер 2 СТ-10.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В. Д., Деймлих Ф., Голубев А. Н., Васильев В. П. Радиогодезические и электрооптические измерения. – М.: Недра, 1985. – 303 с.
2. Камен Х. Электронные способы измерений в геодезии. Пер. с нем. – М.: Недра, 1982. – 252 с.
3. Кошелев А.В. Учет влияния атмосферы на результаты светодальномерных измерений // Геодезия и картография. – 2011. – № 2. – С. 4–8.
4. Учет корректного показателя преломления атмосферы в результатах измерений современных светодальномеров и электронных тахеометров / А. В. Кошелев, А. П. Карпик, С. С. Овчинников, А. А. Дубинина // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 67–71.

© А. В. Кошелев, А. А. Дубинина, Ю. Г. Костына, В. Л. Неклюдова, 2014

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

*Валерий Андреевич Райхерт*

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

*Владимир Владимирович Чесноков*

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

*Дмитрий Владимирович Чесноков*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, заведующий кафедрой наносистем и опто-техники, тел. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Рассматриваются методики исследования распределения относительной квантовой эффективности излучений светодиодов по излучающей поверхности при малых размерах – до десятка мкм – участков свечения, основанные на фотометрировании яркости излучающих участков с помощью многоэлементных фотоприёмников.

**Ключевые слова:** методика исследования, кристалл светодиода, эффективность вывода излучения, полное внутреннее отражение, модификация поверхности, поверхностный рельеф.

## **RESEARCH TECHNIQUE PREPARATION OF EXTERNAL QUANTUM EFFICACY OF LED'S CHIP RADIATION**

*Valery A. Reichert*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Engineer of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: phys003@list.ru

*Vladimir V. Chesnokov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, Professor of Physics Department, tel. (383)361-08-36, e-mail: garlic@ngs.ru

*Dmitry V. Chesnokov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Candidate of Technical Sciences, Chair of Nanosystems and Optical Engineering Department, tel. (383)343-29-29, e-mail: phys003@list.ru

Research technique of external quantum efficacy of LED chip surface radiation's distribution are considered. Photometric measurements of small surface area luminescence by multielement photodetector are applied.

**Key words:** research technique, LED chip, efficacy of radiation coupling, total internal reflection, surface modification, surface relief.



Методы исследования излучений полупроводниковых светодиодов обусловлены характеристиками излучений: электролюминесцентной природой, сравнительно с тепловыми излучателями узкой полосой спектра, широкой диаграммой направленности [1]. Для измерения изменения квантового и энергетического выхода люминесцентного излучения при внесении изменений в излучающие устройства прибегают к относительным измерениям, что в ряде случаев значительно проще определения абсолютных характеристик светодиодов [2], используют сравнение с эталонным устройством.

В данном сообщении рассматриваются методики относительных измерений распределения квантовой эффективности по излучающей поверхности светодиодов на примере исследования промышленных образцов светодиодов компании CREE [3,4]. При исследованиях локально модифицировалась излучающая поверхность светодиода (формировался дополнительный рельеф на поверхности) и измерялись изменения энергетического выхода излучения из этих участков путём измерения яркости излучающей поверхности в сравнении с яркостью не модифицированных участков. Используемая методика измерений квантовой эффективности близка к методам измерения энергии в пятне рассеяния объектива оптической системы [5], где применено фотометрирование пятна; отличием является фотометрирование оптического изображения излучающей поверхности светодиода с помощью многоэлементного фотоприёмника, в качестве которого может выступать фотодиодная линейка или фотоприёмная ПЗС-матрица. При измерении изменений квантового выхода по изменениям яркости может возникать погрешность, вызываемая возможным отличием диаграммы направленности исследуемого излучения от излучения эталонного образца, но в нашем случае изменения направленности не приводили к изменениям величины светового потока, попадающего в апертуру изображающего объектива. Оптическая схема лабораторной установки измерений квантового выхода и её фотография представлены на рис. 1.

На рис. 1: 1 – экспериментальный образец светодиода, закреплённый на панельке с выводами, 2 – зона поверхности подложки с рельефом, 3 – зона поверхности подложки без рельефа, 4 – двухкоординатный столик с ручным управлением; 5 – объектив; 6 – фотоприёмная матрица; 7 – монитор ПК, 8 – блок сменных светофильтров.

На фотоприёмной матрице 6 объективом формируется изображение излучающей поверхности светодиода. Сменные светофильтры 8 позволяют установить линейный режим работы матрицы фотоприёмника изображения; с помощью специальной программы обработки сигналов матрицы можно провести относительные измерения яркости свечения различных областей поверхности светодиода.

При измерениях экспериментальный образец светодиода устанавливался под объективом с увеличением 4× микроскопа лабораторной установки и подключался к источнику питания светодиода. Изображение излучающей поверхности светодиода формировалось на фотоприёмной матрице. Пример изображения участка излучающей поверхности светодиода приведён на рис. 3.

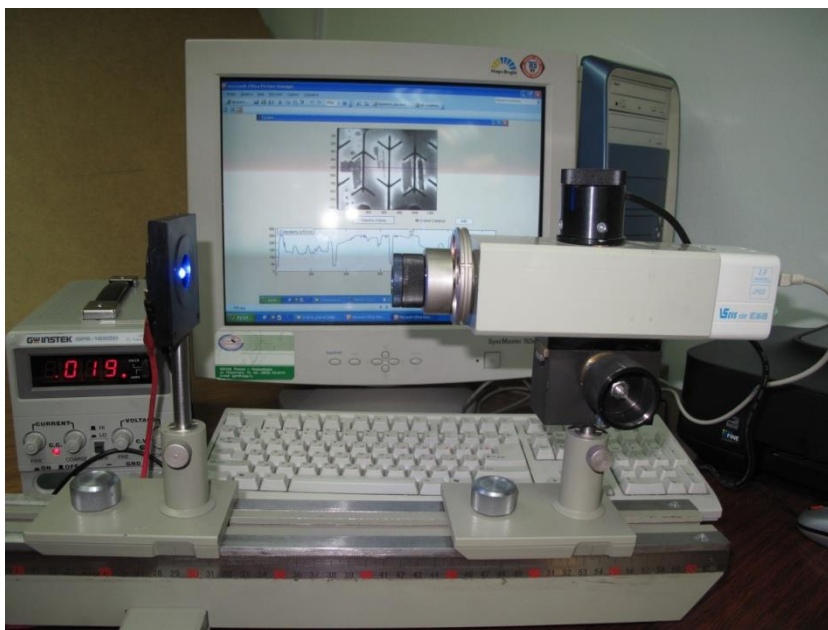
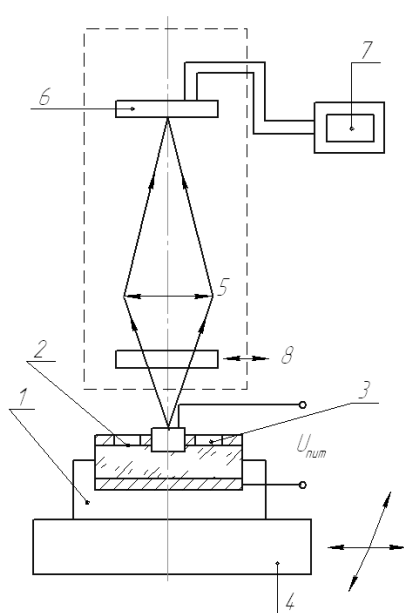


Рис. 1. Оптическая схема и внешний вид установки измерений внешнего квантового выхода

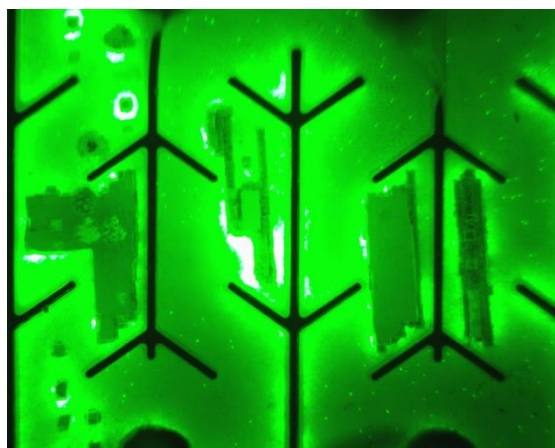


Рис. 2. Изображение участка излучающей поверхности

На изображении тёмные линии в виде ёлочек – полоски электрической разводки катода светодиода, излучающей поверхностью является вся остальная поверхность отображаемого участка кристалла. Более светлые области этой поверхности соответствуют участкам светодиода с большей яркостью свечения.

Лазерная обработка поверхности проведена на локальных участках поверхности лучом примерно квадратного сечения с поперечником 20x20 мкм (темные квадраты в левом нижнем углу рисунка, более обширные тёмные области вблизи второй слева ёлочки и по сторонам четвёртой слева ёлочки). Более обширные области получены сканированием лазерного луча по поверхности этих областей ручным управлением перемещения предметного столика лазер-

ной установки, в этих областях обнажена поверхность монокристаллической подложки SiC с микролинзовой структурой. Яркость областей со вскрытой микролинзовой структурой меньше, чем остальной излучающей поверхности, так как в этих областях удален «просветляющий» слой промышленного образца светодиода.

Белые участки, расположенные вблизи областей лазерного воздействия, имеют яркость, увеличенную на порядок величины по сравнению с имевшейся до облучения.

Внутри областей со вскрытой микролинзовой структурой поверхности монокристалла в отдельных участках этих областей лазерным лучём проведено микроструктурирование (лазерное термогидродинамическое формирование рельефных поверхностных структур). На изображении видно, что эти модифицированные области имеют большую яркость, чем соседние участки с оставшейся микролинзовой структурой (выглядят более светлыми).

Недостатком ПЗС-матрицы при её использовании в качестве измерительного устройства является недостаточный динамический диапазон измеряемых яркостей объектов наблюдения и наличие встроенной системы авторегулировки чувствительности, что может приводить к ошибочным результатам. Для исключения таких ошибок, интенсивность падающего на фотоприёмник излучения с помощью светофильтров уменьшалась до значения, при которой сигнал от наиболее ярких точек изображения изменялся линейно с изменением их яркости; система авторегулировки чувствительности матрицы отключалась.

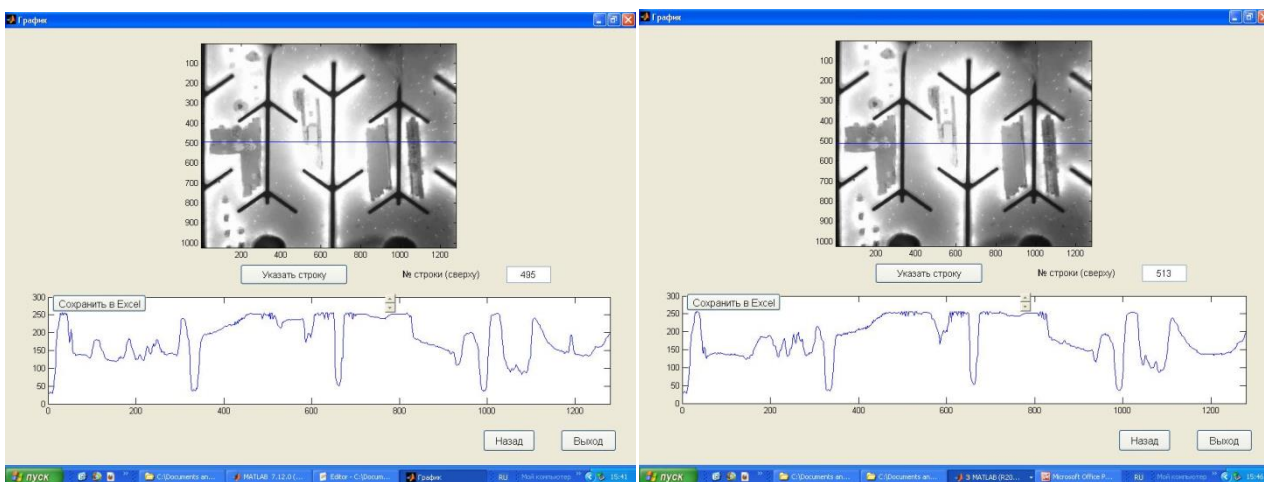
Разработана компьютерная программа цифровой обработки сигналов изображения фотоматрицы, позволяющая определять распределение яркостей изображения по заданной прямой линии, выбранной на картине изображения. Программное обеспечение разработано на основе использования пакета Matlab. Анализу подвергалась электронная запись сигналов отснятого изображения.

На рис. 4-5 иллюстрируется проводимый цифровой анализ изображения.

Распределение яркости в относительных единицах точек поверхности вдоль строки (горизонтальная линия на изображении структуры) показано в несколько увеличенном вдоль строки масштабе на графике, приведённом на нижней врезке рисунка. Четыре резких провала на графике соответствуют полоскам электрической разводки. Координатам строки 120, 200 и 260 на графике соответствуют области с лазерным микроструктурированием поверхности, имеющим ординаты 180 отн. ед.; областям с не структурированной облучением поверхностью соответствуют координаты 90, 150, 300 и близлежащие области поверхности с ординатами (130-150) отн. ед. Яркость областей с лазерным микроструктурированием поверхности в сравнении с неструктурированными областями составляет (138-120) %. Области с ненарушенным просветляющим покрытием имеют яркость 250 отн. ед., то есть, яркость модифицированных участков составляет от яркости ненарушенных участков 72%.

Аналогичным рассмотренному методом исследованы экспериментальные образцы кристалла с рельефной поверхностью светодиода гибридной конструкции. В гибридном светодиоде излучение промышленного образца свето-

диода с помощью иммерсионной прослойки жидкости вводилось в пластину с рельефной поверхностью, являющейся излучающей поверхностью гибридного светодиода.

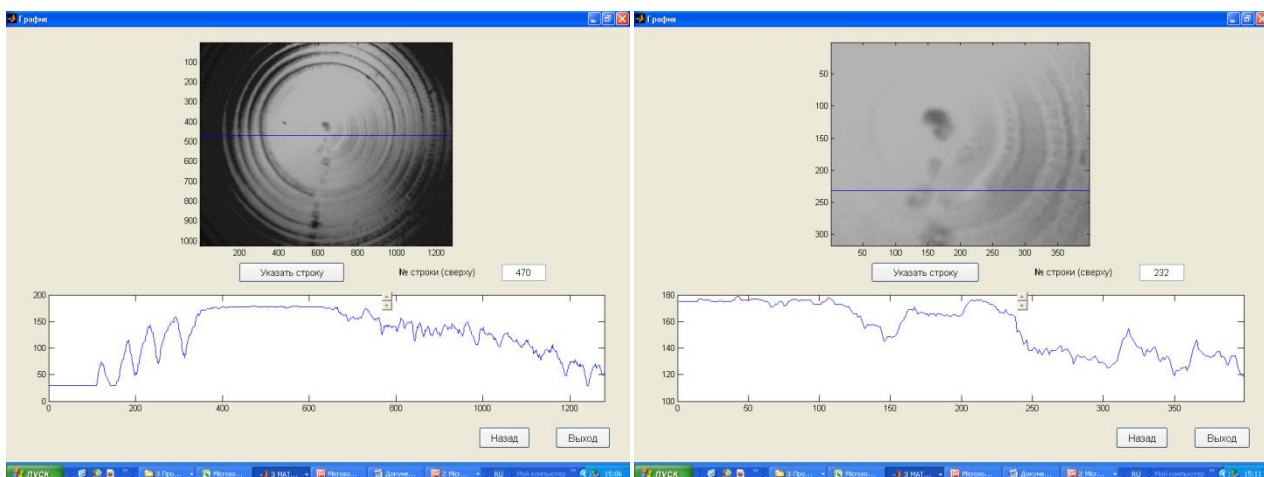


*a*

*б*

Рис. 4. Анализ распределения яркости излучающей поверхности светодиода по строке изображения фотоматрицы: *a* – № 495; *б* – № 513

На рис. 5 показан анализ распределения яркости излучающей поверхности гибридного светодиода, в котором рельефная пластина изготовлена из лейкосапфира.



*a*

*б*

Рис. 5. Анализ распределения яркости излучающей поверхности гибридного светодиода по строке изображения фотоматрицы: *a* – № 470; *б* – № 232

Из приведённых графиков следует, что относительные яркости соседних участков пластины с рельефом и без рельефа относятся друг к другу как 150:130; превышение яркости участков с рельефом составляет 15 %. Участки без рельефа пропускают излучение фирменного светодиода, в котором введение иммерсионной жидкости в пространство между поверхностью светодиодного кристалла и рельефной пластиной существенно не изменило выходящий световой поток, поэтому указанное превышение означает увеличение эффективности гибридного светодиода в сравнении с фирменным.

В табл. 1 приведены значения яркостей излучающих рельефной и плоской площадок выходной поверхности кристалла светодиода гибридной и монокристаллической конструкции.

Таблица 1

Относительные яркости излучающих рельефной и плоской площадок выходной поверхности кристалла светодиода

Конструкция	Координата рельефной площадки	$\lambda$ , нм	Прямой ток диода, мА	Яркость рельефной площадки, отн. ед.	Яркость плоской площадки, отн. ед.		
Гибридная	180	450	20	120	(30–50)		
	220			140	(50–60)		
	280			160	(60–70)		
монокристаллическая	120	550	20	175	130		
	190						
	190					190	120
	270					200	130
	1070			160	100		

Разработана лабораторная методика исследования распределения внешнего квантового выхода светодиодов по их излучающей поверхности. Применение описываемой методики в практике относительных измерений квантовой эффективности электролюминесцентных устройств с размерами излучающих участков порядка десятка микрон показало сравнительную простоту и мобильность измерений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берг А., Дин П. Светодиоды. – М.: Мир, 1979.
2. Оптические измерения. Уч. пособие / А.М. Борбат и др. – Киев: Техника, 1967.
3. Елисеев И. Обзор светодиодной продукции компании CREE // Новости электроники. – 2009. – № 9. – С. 5-12.
4. Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 48-57.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения: Учебник для вузов / Под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М.: Машиностроение, 1987.

© В. А. Райхерт, В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков, 2014

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*Александр Викторович Куликов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий метрологической лабораторией, тел. (383)344-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Лазерная измерительная система ML10 Gold Standard является главной составляющей компаратора СГГА. Система предназначена для метрологического обеспечения геодезических работ. Линейные измерения от 0 до 40 м, точность  $0,025 \text{ мкм} \pm 0,7 \text{ мкм/мм}$ .

**Ключевые слова:** точность, лазерная измерительная система ML10.

## RESEARCH OF LASER DISPLACEMENT INTERFEROMETER ACCURACY

*Alexander V. Kulikov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Head of Metrological Laboratory, tel. (383)343-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

Laser measuring system ML10 Gold Standard is a basic component of SSGA comparator. The system is intended for metrological assurance of geodetic works (linear measurements of 0 to 40 m, with  $\pm 0,7$  ppm accuracy).

**Key words:** accuracy, laser measuring system ML10.

Ошибка, которую обычно приходится наблюдать при представлении результатов линейных измерений, характеризуется постоянным углом наклона. Такое поведение может быть связано с ошибками, которые имеются в системе измерений с обратной связью. Это, тем не менее, может быть вызвано одной из следующих ошибок измерений:

- неверной компенсацией изменения длины волны лазерного излучения в воздухе;
- неправильной компенсацией теплового расширения направляющих компаратора;
- неудачным выбором места установки датчика измерения температуры воздуха;
- вторичной статической ошибкой;
- неверным расположением датчиков измерения температуры направляющих компаратора;
- статическими ошибками;
- ошибкой юстировки;
- ошибкой смещения Аббе;
- локальными источниками тепла;
- неправильным расположением оптических элементов;
- отсутствием жесткости в местах крепления оптических элементов.

Рассмотрим наиболее значимые ошибки:

а) ошибка юстировки. Любое отклонение траектории распространения лазерного луча от оси перемещения приводит к отличию между измеренным и фактическим перемещением (см. рис. 1). Эту ошибку мы будем называть ошибкой юстировки. Ее значение зависит от величины угла, образованного лазерным лучом и осью перемещения, который на рис. 1 обозначен как  $\theta$ . Ошибка юстировки лазерной интерферометрической системы приводит к тому, что измеряемое перемещение оказывается меньше, чем фактически пройденное расстояние. Из приведенной ниже табл. 1 видно насколько сильно величина этой ошибки растет с увеличением угла между лучом и осью перемещения.

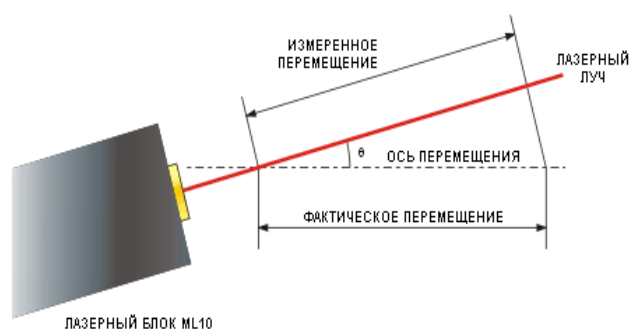


Рис. 1. Ошибка юстировки

Таблица 1

Угол $\theta$ (мм/м)	Угол $\theta$ (угловые минуты)	Ошибка (ppm)
0,45	1,53	0,1
1,00	3,43	0,5
1,40	4,87	1,0
3,20	10,87	5,0
4,50	15,39	10,0
10,00	35,39	50,0

Чтобы избавиться от ошибки юстировки, измерительный лазерный луч следует располагать параллельно оси перемещения каретки по направляющим интерференционного компаратора. В СГГА разработана методика юстировки интерферометра ML 10. Настоящая методика предназначена для юстировки параллельности оси лазерного луча излучателя направлению перемещения каретки компаратора на всей длине перемещения, а также для оценки работоспособности интерферометра ML 10 в составе компаратора КИ – 24000.

Примечание – Лазером называется устройство, в котором используется эффект вынужденного излучения активной среды для генерации и усиления электромагнитных колебаний оптического и инфракрасного диапазона волн.

Для компенсации наклона при измерениях прямолинейности в СГГА разработана методика контроля и регулировки параметров направляющих компаратора интерференционного. Настоящая методика устанавливает методы, средства контроля и регулировки параметров направляющих компаратора в процессе его эксплуатации;

б) статическая ошибка. Статическая ошибка связана с изменением параметра компенсации в процессе линейных измерений, использующих автоматическую компенсацию параметров окружающей среды. Обычно статическая ошибка пренебрежимо мала и возникает в процессе измерений только в том случае, если после определения точки отсчета происходит изменение параметров окружающей среды.



Статическая ошибка, возникающая при измерении перемещения  $L_2$ , зависит от расстояния между оптическими элементами системы  $L_1$ , соответствующего точке отсчета системы (см. рис. 2). Предположим, линейный интерферометр и рефлектор не движутся, а изменение параметров окружающей среды приводит к изменению длины волны лазерного излучения в воздухе. Это изменение происходит на всем расстоянии  $L_1 + L_2$ , однако компенсация будет учитываться только на протяжении  $L_2$ . Таким образом, статическая ошибка будет связана с отсутствием компенсации на длине  $L_1$ .

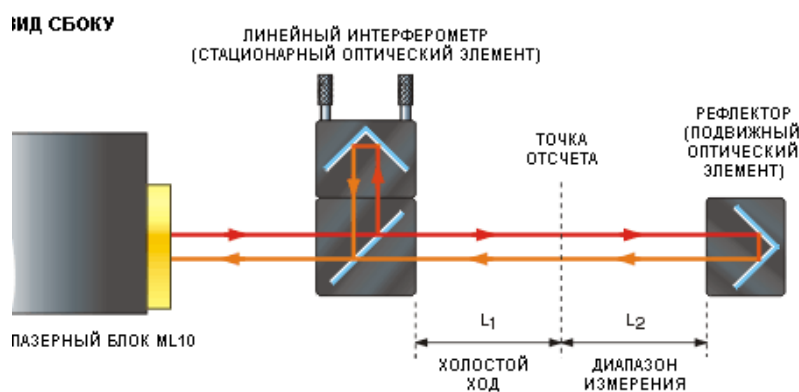


Рис. 2. Статическая ошибка

Тем не менее, если стационарный и подвижный оптические элементы в момент определения нулевой точки соприкасаются (см. рис. 3), статическая ошибка пренебрежимо мала.

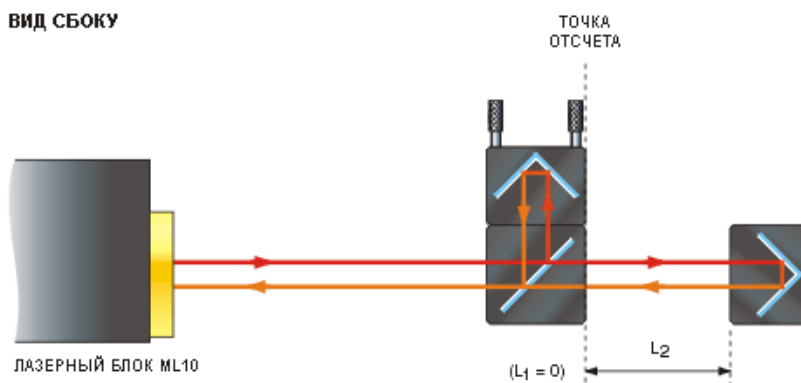


Рис. 3. Минимизация статической ошибки

Следовательно, если это возможно, оптические элементы при определении нулевой точки лазерной интерферометрической системы нужно располагать вплотную друг к другу. Если расстояние между ними в пределах 10 мм, статическая ошибка обычно пренебрежимо мала;



в) ошибка смещения Аббе. Если лазерный луч параллелен, но смещен относительно оси калибровки, угловые ошибки направляющих компаратора (в том числе, по углам рысканья и тангажа) могут привести к возникновению при измерениях ошибки смещения Аббе (см. рис. 4).

Для того, чтобы минимизировать влияние ошибки смещения Аббе, измерительный лазерный луч должен располагаться в непосредственной близости от оси, вдоль которой осуществляются измерения (в идеале совпадать с ней). Например, для того, чтобы измерить точность линейного позиционирования вдоль оси Z направляющих, выполненных в виде двух параллельных труб, измерительный луч лазерного интерферометра должен совпадать с осью симметрии трубы.

Это позволит минимизировать влияние угловых ошибок при перемещении каретки интерференционного компаратора по углу рысканья или тангажа на точность лазерных измерений. Угловое отклонение всего лишь на одну угловую секунду приводит к возникновению ошибки линейных измерений, которая составляет приблизительно 0,005 мкм/мм величины смещения. В табл. 2 приведены примерные величины ошибок, выраженные в микрометрах, которые соответствуют угловым отклонениям по углу рысканья или тангажа, для различных смещений, приведенных в табл. 2.

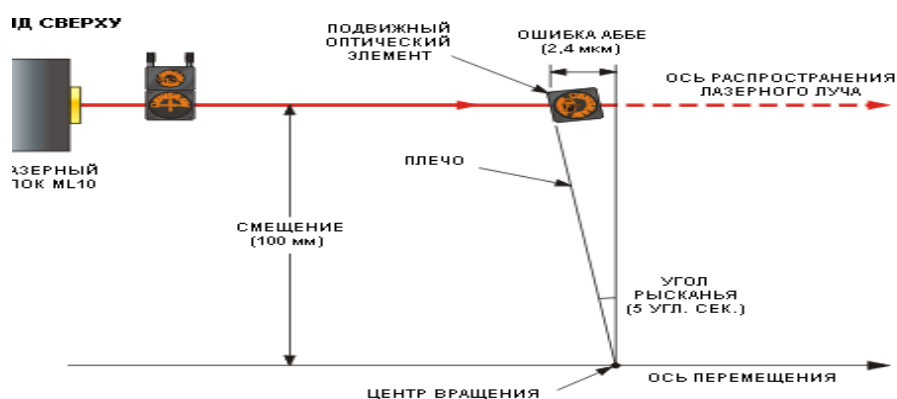


Рис. 4. Ошибка смещения Аббе

Таблица 2

Угловое отклонение (угловые секунды)	Величина смещения (мм)				
	5	10	50	100	500
1	0,024	0,048	0,24	0,48	2,40
2	0,048	0,097	0,48	0,97	4,80
5	0,120	0,240	1,20	* 2,40	12,00
10	0,240	0,480	2,40	4,80	24,00
20	0,480	0,970	4,80	9,70	48,00
60	1,450	2,900	14,50	29,00	145,00
120	2,900	5,800	29,00	58,00	290,00

\* Соответствует ситуации, показанной на рис. 3

Если угол смещения все время остается неизменным, ошибка смещения Аббе не возникает, поскольку подвижный оптический элемент будет все время отклоняться от 'точки вращения' вперед или назад на одно и то же расстояние, а лазерный интерферометр работает по принципу дифференциальных измерений (т. е. по отношению к точке отсчета).

Интерферометрическая установка Renishaw «ML10 Gold Standard» является идеальным техническим решением для выполнения полной калибровки любых позиционных систем, измерения широкого спектра геометрических и динамических характеристик. Система имеет гибкое модульное строение, а комплектация определяется в соответствии с конкретными метрологическими задачами и условиями применения.



Рис. 5. Измерительная система Renishaw «ML10 Gold Standard»

Лазерный блок «ML10» – основа измерительной системы в интерференционном компараторе СГГА. Он основан на применении гелий-неоновой (HeNe) лазерной трубки, производящей стабилизированный лазерный луч с длиной волны – 633 нм. Характеристики каждого лазера системы «ML10» проходят проверку на основе эталонов Сибирского научно-исследовательского института метрологии. Входящий в состав системы блок компенсации «EC10» постоянно следит за состоянием окружающей среды в рабочей зоне, получая данные с высокоточных датчиков температуры, давления и влажности воздуха. В конечном итоге система позволяет добиться высочайшей точности – 0,7 мкм/м в диапазоне рабочих температур от 0 С<sup>0</sup> до 40 С<sup>0</sup>.

Специальное программное обеспечение «Laser 10» полностью контролирует процесс подготовки системы и сами измерения. Анализ же результатов тестирования осуществляется в соответствии с международными стандартами ISO 9000.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Особенности построения интерференционного компаратора для исследования и поверки геодезических СИ / Л. Г. Куликова, В. Д. Лизунов, В. А. Середович, В. Т. Новоевский, А. В. Куликов // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 6. – С. 217–222.

2. Руководство по эксплуатации лазерной интерферометрической системы. Линейные измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http :RENISHOW / Help%20Files / Linear.chm/](http://RENISHOW/Help%20Files/Linear.chm/).

© А. В. Куликов, 2014

## **ОПЫТ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРАЦИОННОГО КОМПАРАТОРА СГГА**

*Александр Викторович Куликов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, заведующий метрологической лабораторией, тел. (383)343-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

*Владимир Адольфович Середович*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, проректор по научной работе и инновационной деятельности, тел. (383)343-39-57, e-mail: v.seredovich@list.ru

На основе лазерного интерферометра ML10 Gold Standard производства Renishaw планируется создать современную измерительную систему для обеспечения единства измерений в отрасли с целью повышения точности измерений, эффективности и качества выполнения геодезических работ.

**Ключевые слова:** интерференционный компаратор, лазерный интерферометр ML10 Gold Standard.

## **EXPERIENCE OF LASER INTERFERENCE COMPARATOR DEVELOPMENT AT SSGA**

*Alexander V. Kulikov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Head of Metrological Laboratory, tel. (383)343-44-71, e-mail: metrol@ssga.ru

*Vladimir A. Seredovich*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Vice-rector for Research and Innovations, tel. (383)343-39-57, e-mail: v.seredovich@list.ru

Renishaw laser interferometer ML10 Gold Standard is to be used as a basis for developing modern measuring system for ensuring measurements unity in the industry. The system is supposed to improve measurements accuracy and the quality of geodetic works.

**Key words:** interference comparator, laser interferometer ML10 Gold Standard.

Наиболее эффективным методом поверки штриховых мер длины, светодальномеров, лазерных сканеров, измерительной системы «цифрой нивелир – кодовая рейка» в настоящее время является интерференционный метод с непрерывным измерением перемещения регистрирующего устройства для определения расстояния между штрихами устройства. В разработанном компараторе будет предложен абсолютный интерференционный метод, в котором в качестве источника излучения используется стабилизированный двухчастотный He – Ne лазер. Учитывая, что Генеральной конференцией по мерам и весам решён вопрос о новом определении метра, при воспроизведении которого применяет-

ся стабилизированное излучение лазеров определённых длин волн, поэтому абсолютный интерференционный метод отвечает международным требованиям при передаче значений единицы длины. Планируется создать современную измерительную систему для обеспечения единства измерений в отрасли с целью повышения точности измерений, эффективности и качества выполнения геодезических работ.

Интерференционный компаратор СГГА для измерений штриховых мер длины абсолютным интерференционным методом строятся по двум типичным схемам.

В схеме типа 1 измеряемая мера установлена на перемещающейся каретке, к которой закреплён отражатель лазерного измерителя перемещений, а микроскоп для регистрации положения штриха меры и лазерный измеритель перемещений закреплены неподвижно на станине компаратора (рис. 1, а).

По схеме типа 2, измеряемая мера неподвижна. Расстояние между штрихами регистрируется подвижным микроскопом, который несёт на себе отражатель лазерного измерителя перемещений, закрепленного на неподвижной станине.

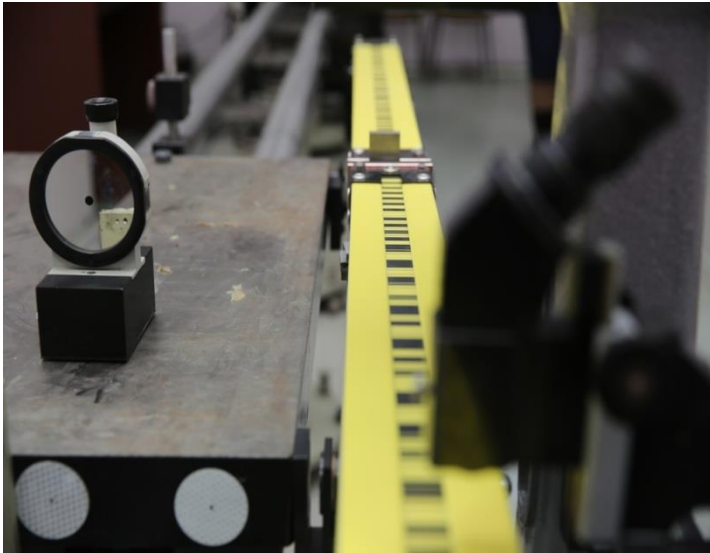
Исследования проводились с использованием эталонов штриховых мер 2 разряда и эталонных измерителей перемещений лазерных (ИПЛ) двух типов: LA-3002 производства Чехословакии и HP5529A фирмы Agilent США. При аттестации ИПЛ, которая проводилась на эталонах Сибирского научно-исследовательского института метрологии (СНИИМ), средняя квадратическая погрешность измерений (СКП) на длине 1 м не превышала 1 мкм. Сравнения результаты аттестации эталонов ИПЛ на компараторе института ядерной физики (ИЯФ) СО РАН на длине 24 м не превышали 3 мкм, а предельно допустимая погрешность измерений при вероятности 0,95 оценивалась и не превышала 8–9 мкм [1].

В ходе исследований выяснилось, что основные источники погрешности измерений существенно зависят от конструкции и от изменения положения каретки за счёт непрямолинейности направляющих и изменения температуры в процессе измерения.

Лазерная измерительная система ML10 Gold Standard<sup>г</sup> фирмы RENISHAW (Англия) является главной составляющей компаратора СГГА. Система предназначена для метрологического обеспечения геодезических работ.

При разработке проекта компаратора СГГА особое внимание было уделено:

- совершенствованию метода регистрации положения штриха меры (бесконтактный метод);
- коррекции результатов измерений от непрямолинейности перемещения.
- стабильность конструкции при рациональной технологичности изготовления;
- максимальный учёт возможных составляющих погрешностей измерений и возможность их регистрации или компенсации;
- автоматизацию измерений и обработки результатов измерений.



*a)*



*б)*

Рис. 1. Интерференционный компаратор СГГА:

*a)* измеряемая мера установлена на перемещающейся каретке, к которой закреплён отражатель лазерного измерителя перемещений; *б)* общий вид компаратора СГГА с программным обеспечением и блоком компенсации параметров окружающей среды

Для размещения компаратора используется специальное одноэтажное помещение (галерея) расположенная между двумя пяти этажными корпусами, удалённое от транспортных магистралей. Установлены требования к эксплуатации интерференционного эталонного компаратора:

- температура эксплуатации .....(20±5) °С с допустимым изменением в рабочем пространстве в процессе измерения не более 0,5 °С при скорости измерения 0,1 °С за 30 с;
- относительная влажность воздуха не должна превышать 80 %;
- скорость движения воздуха в рабочем пространстве не более 0,1 м/с;
- частота возмущающих вибраций не более 10 Гц при амплитуде не более 0,0002 мм в горизонтальной плоскости и 0.0005 мм в вертикальной;
- проверка изоляции электропроводящих цепей на пробой напряжением 1100 В сопротивление клемм 0,1 Ом;
- заземление электроприборов согласно требований безопасности.

Вся конструкция компаратора размещается на бетонной подушке глубиной не менее 1,5 м изолированной от пола.

Для технологичности и приемлемой стоимости изготовления направляющие секции крепятся с помощью специальных регулируемых стоек. Диаметры и прямолинейность направляющих имеют жесткие допуски для обеспечения плавности и прямолинейности перемещения каретки. Величина перемещения каретки регистрируется с помощью уголкового отражателя ИПЛ. В каретке предусматриваются посадочные места для возможности крепления отражателя светодальномера, тахеометра, сканера для их калибровки или поверки.

Лазерный интерферометр ML10 Gold Standard производства Renishaw представляет из себя модульную систему, позволяющую, в зависимости от комплектации, производить измерения перемещения, скорости, угловых перемещений (по углам рысканья и тангажа), плоскостности, параллельности и перпендикулярности.

Лазерная измерительная система ML10 является главной составляющей компаратора СГГА. Краткое описание и принцип действия (рис. 2). Лазерный измеритель перемещений подразумевает движение отражателя по механическим направляющим параллельно отражающему лучу лазера. Для этой цели создана дорога и каретка с отражателем.

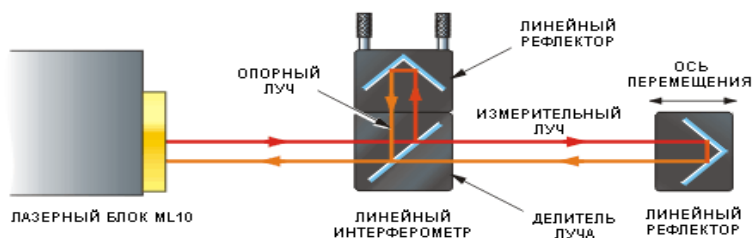


Рис. 2. Принцип действия системы ML10 Gold Standard в режиме линейных измерений



Луч, выходящий из лазера ML10, попадает внутрь линейного интерферометра, где расщепляется на два луча. Один из лучей (так называемый опорный луч) идет в направлении рефлектора, присоединенного к светоделителю, в то время как второй, измерительный луч проходит через полупрозрачное светоделительное зеркало и достигает второго рефлектора. Затем оба луча отражаются от рефлекторов и возвращаются в делитель лазерного луча, в котором они воссоединяются и снова попадают внутрь лазера, внутри которого встроенный детектор регистрирует сигнал, полученный в результате интерференции этих лучей. При выполнении линейных измерений один оптический элемент системы остается неподвижным, в то время как второй элемент движется вдоль оси линейных перемещений каретки. Измерение позиционирования осуществляется посредством определения оптической разности хода между опорным и измерительным лучами, в данном случае речь идет о дифференциальном измерении между двумя оптическими элементами системы, поэтому получаемые результаты не зависят от положения лазера ML10. В качестве подвижных элементов системы обычно используется рефлектор, в то время как линейный интерферометр остается неподвижным (см. рис. 2).

Основные технические характеристики данной системы следующие:

- предел измерения длины S, м 60
- дискретность отсчета, мкм 0,01
- относительная погрешность измерения, 0,025 мкм ± 0,7 мкм/мм

Комплектация

Лазерный излучатель ML10 Gold Standard – двухчастотный HeNe лазерная трубка (класс II) со стабилизацией частоты, максимальной мощностью 1 мВт (рис. 3), комплект для линейных измерений (рис. 4), блок компенсации параметров окружающей среды EC 10 (рис. 5) [2].

Интерференционный компаратор СГГА предназначается для метрологического обеспечения геодезических работ.



Рис. 3. Лазерный излучатель ML10 Gold Standard





Рис. 4. Линейный комплект



Рис. 5. Блок компенсации параметров окружающей среды ЕС 10

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Особенности построения интерференционного компаратора для исследования и поверки геодезических СИ / Л. Г. Куликова, В. Д. Лизунов, В. А. Середович, В. Т. Новоевский, А. В. Куликов // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 6. – С. 217–222.

2. Руководство по эксплуатации лазерной интерферометрической системы. Линейные измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: RENISHOW/Help%20Files/Linear.chm/](http://RENISHOW/Help%20Files/Linear.chm/).

© А. В. Куликов, В. А. Середович, 2014

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

*Александр Владимирович Трифанов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент, тел. +7-923-257-37-48, e-mail: trifanov.alexh@mail.ru

*Владимир Яковлевич Костюченко*

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики, тел. +7-913-731-72-29, e-mail: v.y.kostuk@ssga.ru

*Дмитрий Юрьевич Протасов*

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, e-mail: protasov@isp.nsc.ru

В работе описан программный комплекс, позволяющий снизить погрешности определения концентраций и подвижностей носителей заряда путём применения к измеренным данным цифровой фильтрации.

**Ключевые слова:** цифровая фильтрация, автоматическая коррекция погрешностей, холловские измерения, кадмий-ртуть-теллур.

## ERROR REDUCTION PARAMETERS DETERMINATION OF CHARGE CARRIERS BY DIGITAL FILTERING

*Alexander V. Trifanov*

Academia Estatal de Geodesia de Siberia, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, estudiante, tel. +7-923-257-37-48, e-mail: trifanov.alexh @ mail.ru

*Vladimir Y. Kostjuchenko*

Universidad Técnica Estatal de Novosibirsk, 630073, Russia, Novosibirsk, ave. Karl Marx, 20, Doctor en Ciencias Físicas y Matemáticas, Profesor Asociado, Departamento de Física, tel. +7-913-731-72-29, e-mail: v.y.kostuk @ ssga.ru

*Dmitry Y. Protasov*

Instituto de Física de Semiconductores A. V. Rzhanova SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Ave. Ak. Lavpenteva, 13, candidato de las ciencias físicas y matemáticas, Investigador Asociado, e-mail: protasov@isp.nsc.ru

This paper provides a software package that allows reducing the error in determining the concentration and mobility of charge carriers through the use of digital filtering to measured data.

**Key words:** digital filtering, automatic error correction, Hall measurements, mercury-cadmium-tellurium.

Технические характеристики фотоприемников инфракрасной области спектра на основе CdHgTe (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) сильно зависят от концен-

трации и подвижности носителей заряда. Для определения значений этих параметров широко применяются измерения холловского напряжения и магнетосопротивления [1]. Определение указанных параметров в образце КРТ р-типасопряжено со сложностями, так как в интервале температур от 77 К до 300 К в образце существует несколько типов носителей заряда [2]. В связи с этим при одной величине магнитного поля определение значений концентрации и подвижности носителей заряда для р-КРТ приводит к заметным ошибкам [3]. Для определения значений концентрации и подвижности носителей заряда при наличии нескольких типов носителей используют методы «спектр подвижности» [4] в сочетании с многозонной подгонкой [5], «количественный спектр подвижности» [6], «спектр подвижности на основе принципа максимума энтропии» [7].

Однако все эти методы определяют параметры с некоторой погрешностью, на величину которой сильно влияют посторонние шумы. Для снижения влияния шума используются различные методы, например метод наименьших квадратов [8, 9] или цифровая фильтрация [10-12]. В нашем случае более эффективны цифровые фильтры, они позволяют существенно снизить погрешность определения концентраций и подвижностей всех типов носителей заряда.

Программный комплекс использует двухэтапную систему фильтрации. Изначально к блокам данных, полученных с аналого-цифрового преобразователя (АЦП), применяется медианный фильтр. Этот фильтр позволяет избавиться от случайных выбросов, связанных с работой АЦП. Второй этап состоит в применении цифрового фильтра нижних частот ко всей измеренной зависимости, и восстановления потерянной части сигнала с помощью экстраполяции. Часть сигнала теряется из-за временной задержки, вносимой данным фильтром [12]. Данная система позволяет существенно снизить шумовую составляющую в сигнале (рис. 1 и 2).

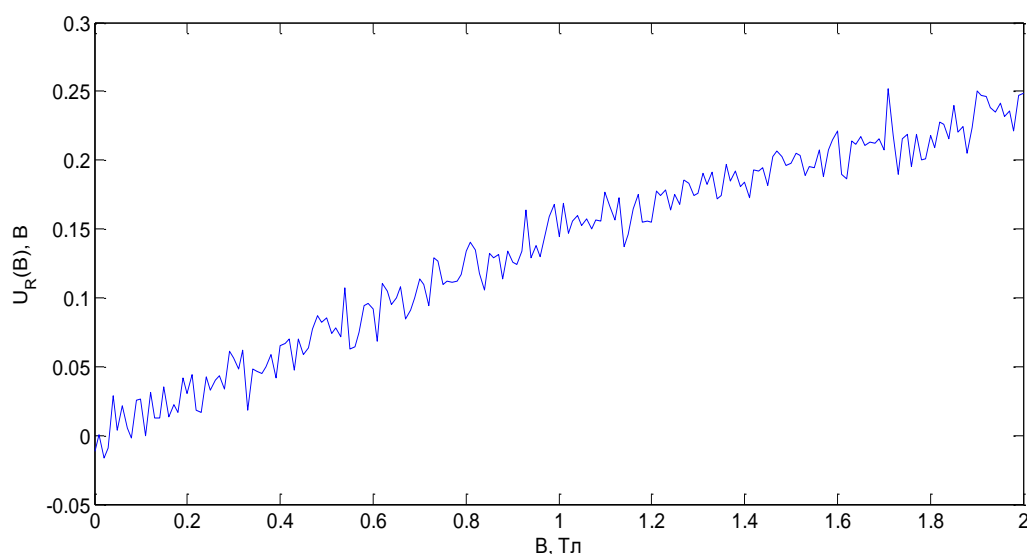


Рис. 1. Зашумленные магнитополевые зависимости напряжения Холла  $U_R(B)$

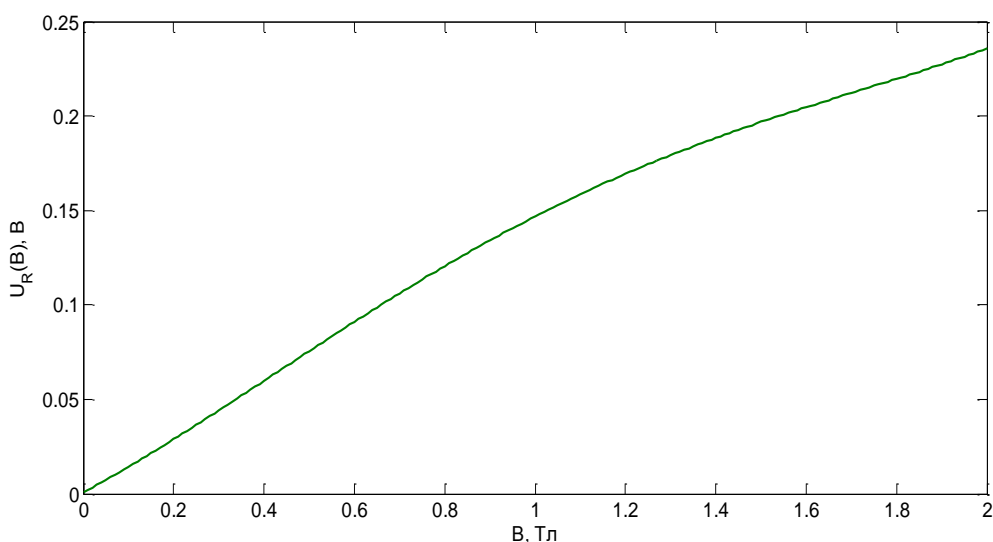


Рис. 2. Магнитополевые зависимости напряжения Холла  $U_R(B)$  после фильтрации и экстраполяции

Благодаря такой обработке измеренных зависимостей метод спектра подвижности и многозонной подгонки определяют параметры с меньшей погрешностью.

Для теоретического исследования влияния цифровой фильтрации на погрешность определения параметров была разработана модель, позволяющая на основе параметров плёнки и условий окружающей среды рассчитывать тензоры проводимости и измеряемые зависимости для зашумленных, фильтрованных и экстраполированных данных и сравнивать их с теоретическими.

В данной работе приводятся результаты полученные для температуры 80 К, при которой электронов в образце меньше, чем тяжелых дырок на 6 порядков, поэтому определить параметры электронов крайне сложно.

В табл. 1 приведены значения концентрации и подвижности носителей заряда, определенные методами спектра подвижности в сочетании с многозонной подгонкой для рассчитанных данных до добавления шума, для данных с шумом и после применения цифрового фильтра и экстраполяции. Погрешность приведенных данных была оценена статистически по результатам многократных (300 раз) подгонок [3].

Приведенные в табл. 1 результаты в целом согласуются с результатами спектра подвижности. Применение цифрового фильтра хорошо восстанавливает параметры основных носителей – тяжелых дырок, для легких дырок действие фильтра немного хуже, а электроны являются следствием остаточного шума в данных и не имеют физического смысла [13].

В результате применения данной системы фильтрации удалось существенно снизить погрешность определения параметров тяжелых и легких дырок, но определить параметры электронов при температуре 80 К не удалось. На данный момент для подтверждения эффективности работы комплекса готовятся экспериментальные исследования.

## Влияние цифровой фильтрации на результаты многозонной подгонки

	Концентрация, м <sup>-3</sup>			Подвижность, м <sup>2</sup> /(В×с)		
	До шума	После шума	После обработки	До шума	После шума	После обработки
Тяжелые дырки	$1.0 \times 10^{22}$	$(5.2 \pm 0.4) \times 10^{21}$	$(1 \pm 0.1) \times 10^{22}$	0.024	$0.042 \pm 0.002$	$0.022 \pm 0.004$
Легкие дырки	$5.4 \times 10^{19}$	$(2.2 \pm 0.5) \times 10^{18}$	$(9 \pm 1) \times 10^{19}$	0.48	$0.76 \pm 0.3$	$0.51 \pm 0.02$
Электроны	$2.3 \times 10^{16}$	$(5.5 \pm 2) \times 10^{17}$	$(2 \pm 1) \times 10^{17}$	4.5	$4 \pm 1$	$0.9 \pm 0.2$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
2. Chu J. Physics and properties of narrow gap semiconductors // New York: Springer, 2008. – 605 p.
3. Protasov D. Yu., Trifanov A. V., Kostyuchenko V. Ya. The set of photoelectromagnetic methods for determination of recombination and dif-fusion parameters of p-MCT thin films // Eur. Phys. J. Appl. Phys. – 2013. – V. 62. – 30104 (DOI 10.1051/epjap/2013130165).
4. Beck W.A., Anderson J.R. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent Hall technique // J. Appl. Phys. – 1987. – V. 62. – P. 541–554.
5. Meyer J.R., Hoffman C.A., Bartoli F.J., Arnold D.A., Sivananthan S., Faurie J.P. Method for characterization of IR detector materials // Sem. Sci, Technol. – 1993. – V. 8. – P. 805–823.
6. Meyer J.R., Hoffman C.A., Antoszewski J., Faraone L. Antoszewski J. and Faraone L. Quantitative mobility spectrum analysis of multicarrier conduction in semiconductors // J. Appl. Phys. – 1997. – V. 81. – № 2. – P. 709–713.
7. Kiatgamolchai S., Myronov M., Mironov O.A., Kantser V.G., Parker E.H.C., Whall T.E. Mobility spectrum computational analysis using a maximum entropy approach // Phys. Rev. E. – 2002. – V. 66. – 036705.
8. Худсон Д. Статистика для физиков: пер с англ. – М.: Мир. – 1970. – 296 с.
9. Сквайрс Дж. Практическая физика: пер с англ. – М.: Мир. – 1971. – 246 с.
10. Рабинер Л.Р., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер с англ. – М.: Мир. – 1975. – 848с.
11. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: пер с англ. – М.: Мир. – 1989. – 448с.
12. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход: пер с англ. – М: Издательский дом “Вильямс”. – 2004. – 989с.
13. Achard J., Varenne-Guillot C., Barbarin F., Dugay M. Comments on the appearance of "mirror" peaks in mobility spectrum analysis of semiconducting devices // Appl. Surf. Sci. – 2000. – V. 158. – P. 345–352.

© А. В. Трифанов, В. Я. Костюченко, Д. Ю. Протасов, 2014

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### ***Татьяна Вячеславовна Ларина***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: larina\_t\_v@mail.ru

### ***Елена Юрьевна Кутенкова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

### ***Василий Михайлович Тымкул***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

В статье рассмотрена математическая модель анализа состояния поверхностей конструктивных материалов. Модель представлена на основе теории отражения Френеля поверхности конструктивных материалов. Рассматриваются формирование цвета поверхности материалов с использованием отраженного излучения в областях спектра RGB.

**Ключевые слова:** математическая модель, усталость материала, формулы Френеля.

## **MATHEMATICAL MODEL ANALYSIS OF SURFACE CONDITION CONSTRUKTSIONNYH MATERIALS**

### ***Tatiana V. Larina***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, a senior lecturer in metrology and optical engineering technologies, tel. (383)361-07-45, e-mail: larina\_t\_v@mail.ru

### ***Elena Y. Kutenkova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, a senior lecturer in metrology and optical engineering technologies, tel. (383)361-07-45, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

**Vasily M. Tymkul**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, candidate of technical sciences, professor, professor of Nio, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

**Oleg V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plakhotnogo 10, doctor of technical sciences, professor, head of metrology and optical engineering technologies, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

**Igor V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plakhotnogo 10, Ph. D., professor of technology and metrology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metro@ssga.ru

The article describes a mathematical model analysis of surface - intercept ruktsionnyh materials. The model is presented based on the theory of Fresnel reflection on the surface of structural materials. The formation of surface color materials using the reflected radiation in spectral regions RGB.

**Key words:** mathematical model, material fatigue, the Fresnel formulas.

В данной работе предлагается математическая модель оптоэлектронного неразрушающего метода контроля усталости металлических конструкций, который представляется перспективным в отношении простоты и удобства. В данном методе применяется метод парного сравнения согласно ГОСТ Р 53161-2008 (ИСО 5495:2005) [1] в роли которого могут применяться образцовые стандартизованные меры зернистости, шероховатости и дефектности. Теоретические и экспериментальные исследования для зеркальной составляющей отраженного потока для шероховатой поверхности со случайным распределением элементов профиля показывают, что возможно применение этого метода для определения шероховатости металлических поверхностей с  $R_z$  до 0,2 мкм.

Основной измеряемой оптической характеристикой при данном методе выступает интенсивность отраженного светового потока от поверхности контролируемого объекта, которая сравнивается с величиной аналогичной характеристики эталона.

При исследовании цветности определяющим выступает спектр коэффициента отражения излучения светоизлучающего диода и монохроматическая чувствительность приемника оптического излучения.

К настоящему времени разработан ряд оптоэлектронных приборов для неразрушающего контроля различных веществ и материалов [2-8].

Эти устройства позволяют заменить визуальный контроль технологических параметров исследуемой поверхности по ГОСТ 9378-93 сравниваемой с эталонными образцами. При этом объективность, оперативность и точность контроля данным устройством намного выше, чем при визуальном контроле. Также устройства можно встраивать и в автоматизированное оборудование для одновременного контроля нескольких технологических параметров металлических поверхностей.

Усталость материала — процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных (часто циклических) напряжений, приводящий к изменению его свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению материала за определенное время.

Механизм усталостного разрушения связан с неоднородностью материала: различными размерами и конфигурациями отдельных зерен, направлением их кристаллографических плоскостей, наличием неоднородных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки (вакансий, дислокаций), остаточных напряжений.

Предлагаемая математическая модель анализа состояния поверхностей конструкционных материалов построена с использованием свойств отражения от поверхности.

В основу расчетов отражательной способности электромагнитных волн веществом лежат известные из физической оптики формулы Френеля.

Энергетические коэффициенты френелевского отражения  $R_{\parallel}$  и  $R_{\perp}$  равны отношению потоков энергии соответствующих волн.

Отражение света от поверхности металла, как и его распространение в нем, может быть рассмотрено на основе материальных уравнений, в которых диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon(\omega)$  комплексна. При этом показатель преломления также комплексный и представляется в виде:

$$\tilde{n} = n - i \kappa, \quad (1)$$

где  $n$  - действительная часть комплексного показателя преломления;  $\kappa$  - показатель поглощения;  $i$  - мнимая единица.

Проанализируем теперь поведение отраженной от поверхности металла волны. Воспользуемся формулами Френеля для угла падения  $\beta$  [10]:

$$R_S = \frac{(a - \sin\beta \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + b^2}{(a + \sin\beta \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + b^2} \cdot R_p, \quad (2)$$

$$R_p = \frac{(a - \cos\beta)^2 + b^2}{(a + \cos\beta)^2 + b^2}, \quad (3)$$

где  $R_S$  и  $R_p$  - перпендикулярная и параллельная компоненты коэффициента отражения.

$$a^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2\beta)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot k^2} + n^2 - k^2 + \sin^2\beta \right], \quad (A)$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2\beta)^2 + 4 \cdot n^2 \cdot k^2} - n^2 + k^2 + \sin^2\beta \right]. \quad (B)$$

Математическую модель анализа состояния поверхности конструкционных материалов рассмотрим на основании следующего соотношения:



$$R_{(\lambda)} = \frac{1}{2} (R_{S(\lambda)} + R_{P(\lambda)}) \cdot k_{\zeta}, \quad (4)$$

где  $k_{\zeta}$  – коэффициент, зависящий от шероховатости поверхности конструктивных материалов;  $\lambda$  – длина волны.

Рассмотрим соотношение (4), применительно к анализу цвета поверхности материала.

Цвет — качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов.

Согласно этому, цветовой параметр математически выражается вектором в трехмерном цветовом пространстве, причем начало этого вектора совпадает с началом цветовой координатной системы.

Представим модель цвета с использованием колориметрической системы RGB, в виде:

$$Ц = A \cdot R(\Delta\lambda_1) + G \cdot R(\Delta\lambda_2) + B \cdot R(\Delta\lambda_3), \quad (5)$$

где A, G, B – вклад соответствующих трех цветовых координат;

$\Delta\lambda_1$ ,  $\Delta\lambda_2$  и  $\Delta\lambda_3$  – область длин волн излучения соответственно красного, зеленого и синего цветов;

$$R_{(\Delta\lambda)} = \frac{\int_{(\Delta\lambda)} R(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

где  $S(\lambda)$  – площадь анализируемой поверхности материала.

В фотоколориметрии цвет является одним из основных показателей качества поверхности продукции. В системе RGB кривые красного  $r_n$ , зеленого  $g_n$  и синего  $b_n$  построены так, что для каждого из трех основных цветов отличаются от нуля лишь ординатой одной кривой. Принципиальный недостаток этих кривых сложения заключается в наличии отрицательного участка у кривой (см. рис. а). При измерении цветовых координат вычитание цвета реализовать невозможно, поэтому в колориметрии эта система не применяется.

Задача же контроля цветовых параметров на основе XYZ системы осуществляется путем непосредственного измерения координат X, Y, Z при использовании трех эталонных приемников оптического излучения, спектральные чувствительности которых соответствуют кривым  $Y_x$   $Y_y$   $Y_z$  (рис. б).

Таким образом, на основе представления коэффициентов отражения с использованием формул Френеля, задавая коэффициент  $k_{\zeta}$ , зависящий от степени шероховатости поверхности конструктивных материалов, по формулам (1) - (4) возможно проводить цветовой анализ показателей качества поверхности продукции.

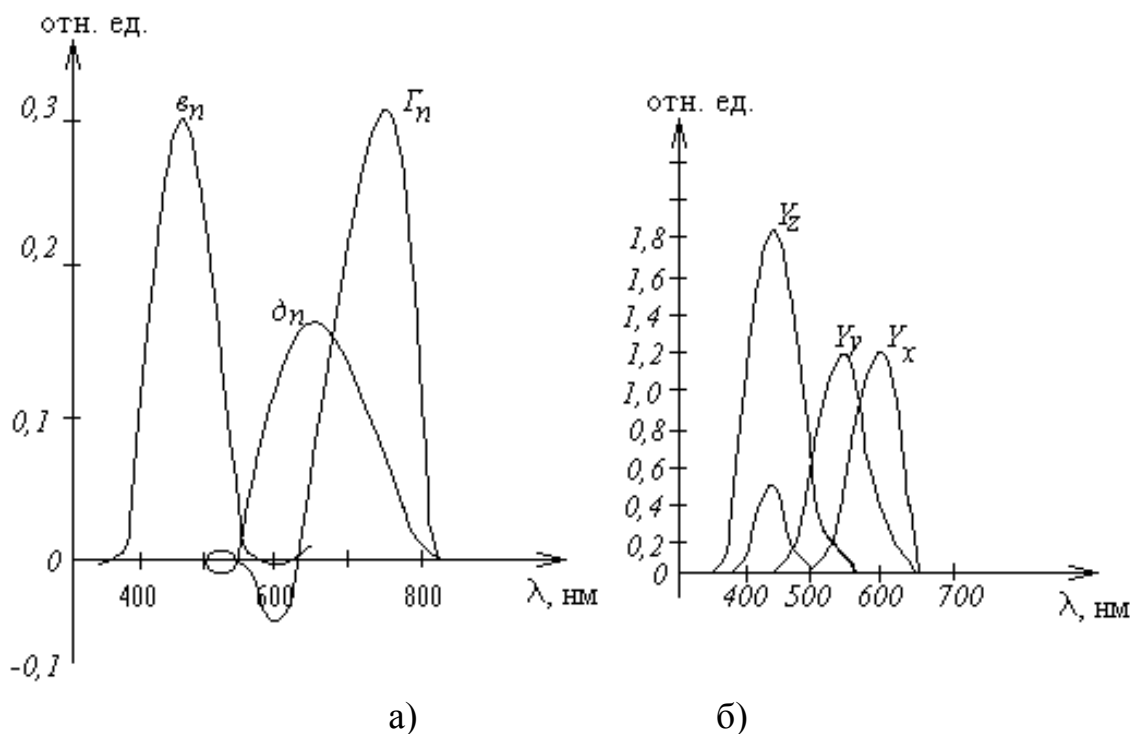


Рис. Кривые сложения цветов систем RGB (а) и XYZ (б)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 53161-2008 (ИСО 5495:2005). ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. МЕТОДОЛОГИЯ. МЕТОД ПАРНОГО СРАВНЕНИЯ [Текст]: нац. стандарт РФ. - Введ. 01.01.2010. - М.: Стандартиформ, 2010. - 25 с.
2. Пат. №2485457 Российская Федерация, МПК 51 G01 J 3/46, G01B 11/30. Оптоэлектронное устройство для определения усталости твердых материалов // Т.В. Ларина, О.К. Ушаков, Н.Р. Рахимов, М.П. Исаев, заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - № 2012101558/28 (068170); заявл. 17.01.2012; опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17. - 9 с.: 2 ил.
3. Устройство и способ для определения мест предразрушения конструкций / Б. Н. Рахимов, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, М.Ф. Носков// Приборы и техника эксперимента. - 2013. - № 4. - С. 138 – 139.
4. Оптоэлектронная система для контроля усталости машиностроительных конструкций // Н. Р. Рахимов, Т. В. Ларина, О. К. Ушаков, В. А. Жмудь, П. В. Петров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 229–238.
5. Рахимов Б. Н., Ларина Т. В., Шамирзаев С. Х. Молекулярно-кинетические процессы и принципы создания оптоэлектронных датчиков для регистрации усталости // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 239–245.
6. Ларина Т. В. Оптоэлектронный неразрушающий метод контроля усталости металлических конструкций // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микро-

техника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 111–115.

7. Рахимов Н. Р., Ларина Т. В., Сатволдиев И. А. Расчет основных параметров приемников оптического излучения для создания оптрона открытого канала // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 132–137.

8. Оптоэлектронный метод анализа физико-химических параметров нефти и нефтепродуктов / Н. Р. Рахимов, Е. Ю. Кутенкова, Т. В. Ларина, П. В. Петров, Ш. И. Мадумаров // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск: СГГА, 2010. Т. 5, ч. 1. – С. 173–179.

9. Анализатор цвета поверхности твердых материалов / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 3. – С. 131–132.

10. Справочник по инфракрасной технике./ Ред. У. Волф, Г. Цисис. В 4-х тт. Проектирование инфракрасных систем. Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 472 с.

© Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, В. М. Тымкул, О. В. Минин, И. В. Минин, 2014

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКИХ СРЕД**

### ***Елена Юрьевна Кутенкова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

### ***Татьяна Вячеславовна Ларина***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: larina\_t\_v@mail.ru

### ***Василий Михайлович Тымкул***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

### ***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

### ***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

В статье рассматривается математическая модель работы устройства измерения оптических параметров жидких сред. Модель основывается на анализе многократного отражения и пропускания света исследуемой поверхности и объема среды.

**Ключевые слова:** математическая модель, коэффициенты отражения и пропускания, многократное отражение и пропускание.

## **MATHEMATICAL MODEL OF MEASURING DEVICE, OPTICAL PARAMETERS LIQUIDS**

### ***Elena Yu. Kutenkova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, a senior lecturer in MiTOP, tel. (383)361-07-79, e-mail: kutenkova.elena@yandex.ru

### ***Tatiana V. Larina***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, a senior lecturer in MiTOP, tel. (383)361-07-79, e-mail: larina\_t\_v@mail.ru

### ***Vasily M. Tymkul***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plakhotnogo 10, Ph. D., Professor of Nanosystems and optical engineering, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

**Oleg V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plakhotnogo 10, Ph. D., professor of MiTOP, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

**Igor V. Minin**

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plakhotnogo 10, Ph. D., professor of MiTOP, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin @ gmail.com

The article deals with the mathematical model of the device for measuring optical parameters of liquid media . The model is based on the analysis of multiple reflections of light transmittance and the surface under study and the volume of the medium.

**Key words:** mathematical model, reflection and transmission coefficients, multiple reflection and transmission.

В настоящее время актуален вопрос мониторинга полупрозрачных жидких сред в различных отраслях промышленности, таких как нефтеперерабатывающая, медицинская, пищевая и т.д.

При этом необходимо, чтобы используемые методы обеспечивали высокую чувствительность, надежность и производительность мониторинга в автоматическом режиме. Решению этих задач для ряда технологических процессов способствует использование фотоэлектрических методов и устройств контроля. Фотоэлектрические методы контроля качественных параметров полупрозрачных жидкостей позволяют сократить до минимума время анализа при обеспечении необходимой точности измерения. Контроль технологических процессов с помощью фотоэлектрических методов также позволяет значительно улучшить качество выпускаемой продукции. Поэтому разработка и применение неконтактных оптоэлектронных систем для решения этих задач также является актуальной задачей.

В предлагаемых в работах [1-8] фотокolorиметрах осуществляется контроль полупрозрачных жидкостей при прохождении светового потока через контролируемую среду. При этом световой поток делится на отраженный, поглощенный, рассеянный и проходящий, а структура световых потоков, которые участвуют в анализе, выражается следующим образом:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_{T1} + \Phi_{R1}, \quad (1)$$

где  $\Phi_0$  - величина падающего светового потока;

$\Phi_1$  - составляющая потока света, прошедшего границу раздела «воздух – жидкость»;

$\Phi_2$  - составляющая светового потока, который поглощается контролируемым образцом;

$\Phi_3$  - часть светового потока, отраженного от зеркального стержня, установленного в кювете;

$\Phi_{T1}$  – часть светового потока, прошедшего через среду;

$\Phi_{R1}$  - составляющая светового потока, отраженного от поверхности кюветы, в которую заливается контролируемая жидкость [8].

Рассмотрим подробнее процесс пропускания и отражения света в слабопоглощающих материалах, в частности, в полупрозрачных жидкостях [9]. Если падающий поток равен  $\Phi_0$ , то одна часть  $\Phi_{R1}$  отражается от поверхности 1, другая часть  $\Phi_1$  попадает в полупрозрачную жидкость 2, а часть потока  $\Phi_2$  падает на поверхность зеркала 3, отраженный при этом поток равен  $\Phi_3$ , а на выходе из кюветы поток имеет значение  $\Phi_4$ . Далее световой поток многократно отражается от границы двух сред и от зеркала 3 (рис. 1).

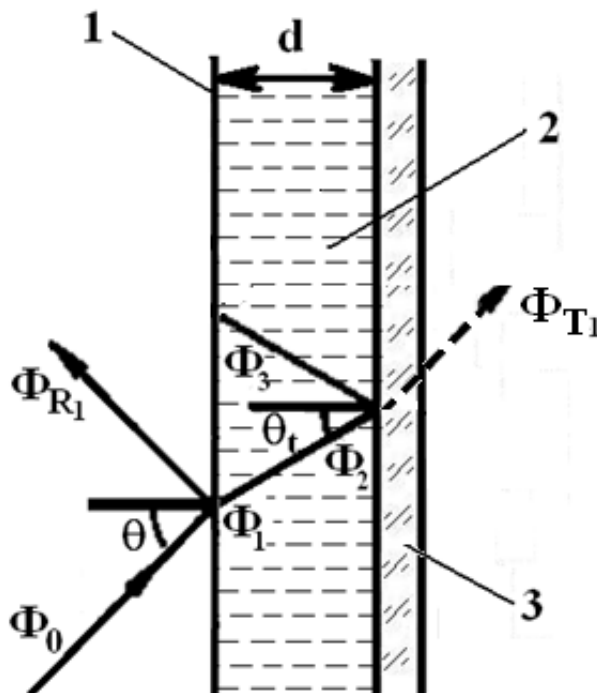


Рис. 1. Геометрия распространения потока излучения, падающего на контролируемую жидкость

При этом для однократного прохождения или отражения от поверхности коэффициенты отражения и пропускания определяются следующим образом:

- коэффициент отражения от одной поверхности:

$$\rho_1 = \Phi_{R1} / \Phi_0, \quad (2)$$

- коэффициент пропускания при однократном прохождении:

$$\tau_1 = \Phi_{T1} / \Phi_0, \quad (3)$$

- коэффициент внутреннего пропускания:

$$\tau_i = \Phi_2 / \Phi_1 = e^{-kd / \cos \theta_i}, \quad (4)$$

где  $k$  – показатель ослабления среды;

$d$  – ширина кюветы;

$\theta_i$  – угол преломления света в среде.

Для бесконечного числа прохождений данные выражения имеют вид [9]:

$$\tau_\infty = \frac{(1 - \rho_1)^2 \tau_i}{(1 - \rho_1^2) \tau_i^2}, \quad (5)$$

$$\rho_\infty = \rho_1 + \frac{\rho_1 \tau_1 \tau_i (1 - \rho_1)^2}{1 - \rho_1^2 \tau_i^2}, \quad (6)$$

$$\alpha_\infty = \rho_1 + \frac{\tau_1 \tau_i}{1 - \rho_1^2 \tau_i^2}. \quad (7)$$

Если отсутствует поглощение, то коэффициент пропускания равен:

$$\tau_\infty = \frac{(1 - \rho_1)^2 \tau_i}{1 - \rho_1^2 \tau_i^2}. \quad (8)$$

Если падающий луч расположен нормально и отсутствует поглощение в исследуемом материале, то коэффициенты отражения и пропускания с использованием показателя преломления представляются в виде:

$$\rho_1 = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (9)$$

$$\tau_1 = \frac{4n}{(n+1)^2}, \quad (10)$$

$$\tau_\infty = \frac{n}{n^2 + 1}. \quad (11)$$

Преобразуя данные выражения, с использованием значений измеряемых потоков, были получены следующие результаты:

- коэффициент отражения для бесконечного числа прохождений пучка лучей равен:

$$\rho_{\infty} = \frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0} + \frac{\frac{\Phi_{R_1} \Phi_{T_1} \Phi_2}{\Phi_0^2 \Phi_1} (1 - \frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0})^2}{1 - (\frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0})^2 (\frac{\Phi_2}{\Phi_1})^2}, \quad (12)$$

- коэффициенты пропускания и поглощения для таких же условий:

$$\tau_{\infty} = \frac{(1 - \frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0})^2 \frac{\Phi_2}{\Phi_1}}{(1 - (\frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0})^2) (\frac{\Phi_2}{\Phi_1})^2}, \quad (13)$$

$$\alpha_{\infty} = \frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0} + \frac{\frac{\Phi_{T_1} \Phi_2}{\Phi_0 \Phi_1}}{1 - (\frac{\Phi_{R_1}}{\Phi_0})^2 (\frac{\Phi_2}{\Phi_1})^2}. \quad (14)$$

Таким образом, в работе получены простые аналитические оценки, позволяющие измерить и оценить коэффициенты пропускания, отражения и поглощения при многократном отражении и пропускании света исследуемой поверхности и объема среды. Так, зная величину падающего светового потока, например, от источника излучения  $\Phi_0$ , регистрируя с помощью фотоприемной системы отраженные световые потоки  $\Phi_{R_1}, \Phi_1, \Phi_2$ , и  $\Phi_{T_1}$ , можно определить такие основные оптические характеристики контролируемого материала, как коэффициенты пропускания, отражения и поглощения. Полученные результаты могут быть использованы как для практических целей в оптической колориметрии, так и для создания учебной программы для обучения студентов соответствующих специальностей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2413201 Российская Федерация, МПК51 G01N 21/03. Оптоэлектронный фотоколориметр / Рахимов Б.Н., Ушаков О.К., Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия». - №2009146659/28; заявл. 15.12.2009; опубл. 27.02.11, Бюл. №6. – 4 с. : ил.
2. Оптоэлектронный автоматический колориметр / Б. Н. Рахимов, О. К. Ушаков, Е. Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина // Приборы и техника эксперимента, 2011. – № 5. – С. 161–162.
3. Заявка № 2011153209 Российская федерация. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр / Б.Н. Рахимов и др.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия».
4. Кутенкова Е. Ю. Оптоэлектронный многопараметровый автоматический колориметр // Датчики и системы. – 2012. – № 4 (155). – С. 37–39.



5. Математическая модель оптоэлектронного преобразователя для мониторинга жидких сред / Рахимов Н.Р., Кутенкова Е.Ю., Исломов Д.Д. и др. // Автоматика и программная инженерия. – 2012. – № 2 (2). – С. 36 – 41.

6. Кутенкова Е. Ю. Разработка оптоэлектронного фотокolorиметра для автоматического анализа жидких сред // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. – С. 191–195.

7. Ушаков О. К., Кутенкова Е. Ю., Серьезнов А. Н. Автоматический colorиметр на основе оптоэлектронных преобразователей // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 146–151.

8. Рахимов Н. Р., Кутенкова Е. Ю., Серьезнов А. Н. Принципы построения оптоэлектронных устройств для контроля параметров жидких сред // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 296 – 301.

9. Справочник по инфракрасной технике. / Ред. У.Волф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т.2 Проектирование оптических систем: Пер. с англ. – М., Мир, 1998. 337с., ил.

© Е. Ю. Кутенкова, Т. В. Ларина, В. М. Тымкул, О. В. Минин, И. В. Минин, 2014

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ АТОМНЫХ ЧАСОВ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Виктор Мартынович Тиссен*

Сибирский НИИ метрологии, 630004, Россия, г. Новосибирск, ул. Димитрова, 4, начальник сектора службы времени, тел. 8983-134-86-09, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

*Екатерина Андреевна Ханыкова*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирантка кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: hanikovak@mail.ru

В статье представлен алгоритм формирования случайного временного процесса, с заданными характеристиками нестабильности атомных часов. Выполнена оценка границ применимости предлагаемого алгоритма и классической «шумовой» модели нестабильности к моделированию различных типов атомных часов. Рассмотрена целесообразность применения предлагаемого алгоритма.

**Ключевые слова:** нестабильность, белый шум, частота, эталон времени, атомные часы.

## STUDY HOURS UNSTABLE ATOMIC SIMULATION METHODS

*Victor M. Tissen*

Siberian Research Institute of Metrology, 630004, Russia, Novosibirsk, 4 Dimitrova str., Head of the Time Service, tel. 8-983-134-86-09, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

*Ekaterina A. Hanikova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Graduate of Department Metrology and Optical Production Technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: hanikovak@mail.ru

The paper presents an algorithm generating a random time process, with specified characteristics instability of atomic clocks. The evaluation of the limits of applicability of the proposed algorithm and the classical "noise" model of instability to modeling various types of atomic clocks. The expediency of the proposed algorithm.

**Key words:** instability, white noise, frequency and time standard, atomic clocks.

Лучшие образцы современных атомных часов, используемые в службах времени и частоты в качестве эталонных средств имеют относительную долговременную нестабильность менее  $1 \times 10^{-15}$ . Наиболее точными атомными часами в мире на сегодняшний день по данным, приведенным на сайте: NanoNewsNet.ru, являются фонтанные цезиевые часы NPL-CsF2, находящиеся в Национальной физической лаборатории близ Лондона (National Physical Laboratory, NPL). За счет применения новых алгоритмов обработки сигналов и физико-математических моделей нестабильностей частоты генератора относительная погрешность шкалы времени, формируемая данными часами, составля-

ет  $2.3 \times 10^{-16}$ . В настоящее время часы NPL-CsF2 используются в качестве эталона для работы систем Международного атомного времени (International Atomic Time) и Универсального скоординированного времени (Universal Coordinated Time). Столь высокие метрологические характеристики часов наиболее остро востребованы, в беззапросных методах космической навигации при учете поправок за рассогласование шкал часов на беззапросных измерительных станциях (БИС) и часов космических аппаратов (КА). Очевидно, что совершенствование методов исследования нестабильности атомных часов играет существенную роль для дальнейшего повышения их метрологических характеристик.

Общепринято представлять комплексную модель нестабильности часов в виде суммы кратковременной и долговременной составляющих. Кратковременная составляющая в силу своей случайной природы в конечном итоге накладывает ограничения на точность воспроизведения и синхронизации шкал часов. В задачах синхронизации часов БИС и КА необходимо вводить поправки за расхождение их шкал. Для определения значений этих поправок по данным наблюдений за ходом процесса  $x(t)$  вычисляются параметры "долговременной" составляющей. Учет "долговременной" составляющей позволяет снизить расхождение шкал сравниваемых часов до значения порядка "кратковременной". Однако, на практике достигнуть расхождение шкал до значений, определяемых дисперсиями шумов крайне затруднительно. Из-за большого числа физических и радиотехнических факторов, влияющих на стабильность работы генератора атомных часов, приходится ограничиваться некоторой обобщенной физико-математической моделью нестабильности в виде степенного ряда [1]:

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha}, \quad (1)$$

где  $h_{\alpha}$  - коэффициенты, определяющие плотность мощности отдельных составляющих шумов с частотами  $f^{\alpha}$ .

При изменении  $\alpha$  от -2 до +2 с шагом равным единицы выражение описывает соответственно: белый фазовый шум; фликкерный фазовый шум; белый частотный шум и шум случайного блуждания частоты.

Средняя квадратическая двухвыборочная дисперсия (вариации Алана) связана с мощностью шума  $S_y(f)$  соотношением [1]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \int_0^{\infty} |H_A(f)|^2 |H_f(f)|^2 S_y(f) df, \quad (2)$$

где  $|H_A(f)|^2 = 2 \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$  - модуль квадрата передаточной функции частотного цифрового фильтра в расходящемся интеграле (2);

$$|H_f(f)|^2 = \begin{cases} 1 & \text{для } f < f_h \\ 0 & \text{для } f \geq f_h \end{cases} - \text{модуль квадрата передаточной функции}$$

низкочастотного фильтра с частотой среза  $f_h$ .

Формулу для вычисления дисперсии Алана получают интегрированием формулы (2) с учетом формулы (1) при выполнении условия:  $2\pi f_h \tau \gg 1$ ,

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3h_2 f_h}{4\pi^2 \tau^2} + \frac{h_1}{4\pi^2 \tau^2} [1,04 + 3 \ln(2\pi f_h \tau)] + \frac{h_0}{2\tau} + 2h_{-1} \ln 2 + \frac{2}{3} \pi^2 h_{-2} \tau. \quad (3)$$

Входящие в (3) коэффициенты  $h_\alpha$  определяются по заданным значениям вариаций Алана  $\sigma_y^2(\tau_i)$ , стоящих левой части уравнения. Для однозначного определения всех пяти коэффициентов  $h_\alpha$ , стоящих в правой части уравнения (3), необходимо составить систему из пяти уравнений. Пять значений вариаций Алана можно получить путем статистической обработки результатов измерений хода атомных часов на пяти интервалах  $\tau_i$  различной длительности. Стандартно выбирают интервалы продолжительностью в 1, 10, 100 сек, 1 час и 1 сутки. В результате решения определенной, таким образом системы уравнений можно найти пять значений коэффициентов  $h_\alpha$ . Подставляя найденные значения  $h_\alpha$  в уравнение (3) получим модель нестабильности исследуемых часов.

Приведенная шумовая модель применима только для описания часов с ограниченным белым шумом, так как в других случаях решение системы уравнений приводит к отрицательным значениям коэффициентов в уравнении (3).

В СНИИМе разработана имитационная модель нестабильности атомных часов на представлении хода часов от номинала в виде случайного рекуррентного процесса.

$$x_i = x_{i-1} + f_0 \tau + \delta x_i, \quad (4)$$

где  $x_i$  - вариация хода часов в момент времени  $t_i$ ;  $f_0$  - номинальная частота генератора;  $\tau$  - интервал дискретизации;  $\delta x_i$  - случайная величина, определяющая СКО ухода часов.

Величина  $\delta x_i$  на каждом шаге рассчитывается по формуле:

$$\delta x_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} y_i dt, \quad (5)$$

где  $y_i = (f_0 - f_i(t))/f_0$  - относительная вариация частоты генератора на заданном интервале. Более подробное описание алгоритма и результатов имитационной модели приведено в [2].

На рис. 1 приведен график реализации на ЭВМ случайного процесса ухода шкалы квантовых часов от равномерного времени на 8 - часовом интервале при отсутствии долговременной составляющей ухода часов.

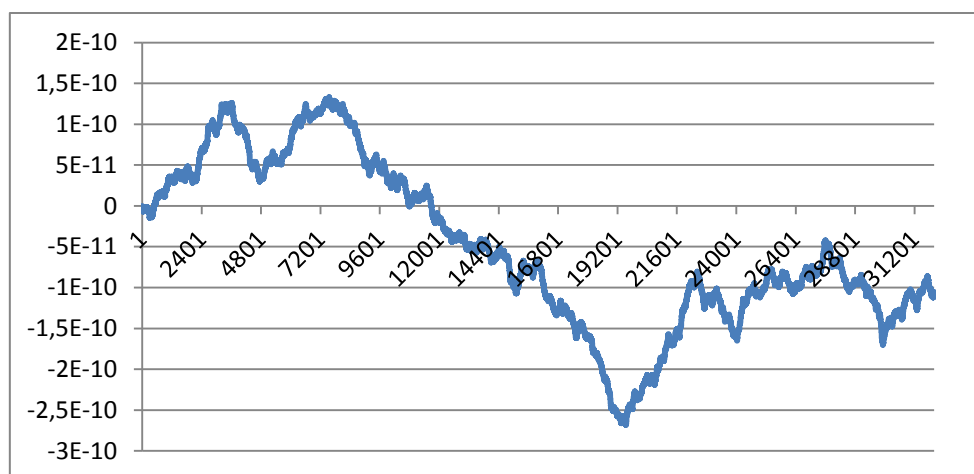


Рис. 1. График случайного рекурсивного процесса нестабильности квантовых часов на 8-часовом интервале

Приведенный на рисунке 1 график построен по данным программного имитатора. Входными данными для моделирования выбраны относительные вариации Алана:  $3 \cdot 10^{-12}$ ;  $1 \cdot 10^{-12}$ ;  $3 \cdot 10^{-13}$ ;  $1 \cdot 10^{-13}$ ;  $3 \cdot 10^{-14}$ ;  $1 \cdot 10^{-14}$  соответствующие интервалам: 1; 10; 100; 1000; 10 000 и 100 000 с. Анализируя поведение графика на рис. 1 следует отметить, что наблюдаемый уход шкалы на интервале от 7 000 до 19 000 с. вызван чисто случайными флуктуациями белого шума. Эти вариации ни в коем случае нельзя принимать за уход, вызванный несоответствием частоты генератора номиналу или ее дрейфом. Многократные реализации на ЭВМ случайного процесса имеют аналогичный характер. Вариации Алана, вычисленные из более, чем 30 реализаций показывают хорошую сходимость по отношению к заданным значениям, что подтверждает адекватность и применимость имитационной модели к решению различных задач синхронизации и навигации. На рис. 2 приведен график расхождения шкал между двумя активными водородными генераторами (ВГ-75) службы времени СНИИМ за полугодовой период 2012 г. Для построения графика использованы данные измерений с компаратора с относительной погрешностью  $10^{-17}$  за вычетом трендовой составляющей, коэффициент которой, вычисленный с помощью МНК оказался равным:  $1,3 \cdot 10^{-13}$ . Также были убраны периодические скачки, связанные с периодической коррекцией частоты генератора к номиналу.

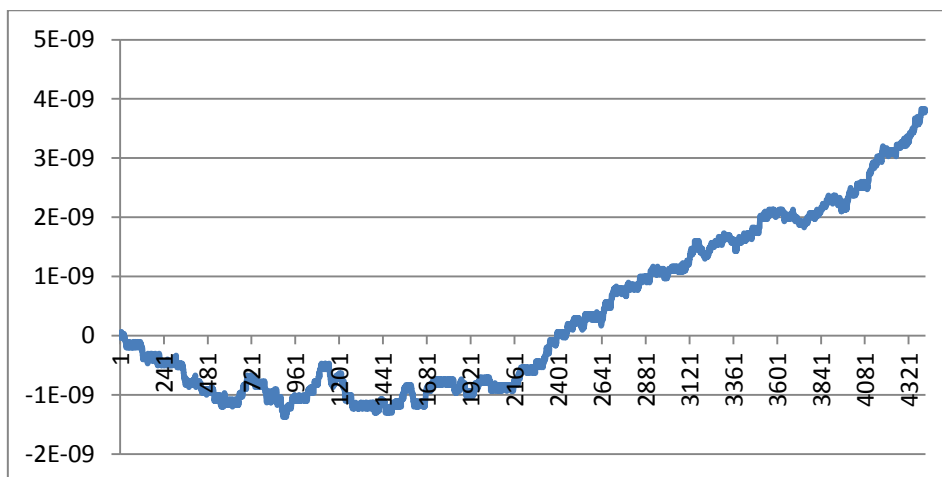


Рис. 2. Расхождения шкал между двумя активными водородными генераторами

Полученные результаты показывают целесообразность применения предлагаемого метода исследования для целей повышения точности определений метрологических характеристик часов БИС и НКА при проведении навигационных измерений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одуан, К., Гино, Б. Измерение времени. Основы GPS / перевод с английского Домнина, Ю.С. / под редакцией Татаренкова, В. М. – М.: Техносфера, 2002. – 400 с.
2. Тиссен В. М. Имитационная модель нестабильности атомных часов // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 107–112.

© В. М. Тиссен, Е. А. Ханькова, 2014

## **ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА МАГНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ФОРСТЕРИТОВОЙ КЕРАМИКИ**

### ***Людмила Борисовна Воробьёва***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат химических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

### ***Анна Дмитриевна Зонова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

### ***Светлана Арсеньевна Степанова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-79

В статье исследована микроструктура оксида магния, используемого для изготовления функциональной керамики на основе форстерита. Исследован оксид магния, изготовленный по двум разным технологиям, из различного исходного материала. Показано, что большей активностью обладает оксид магния, изготовленный из карналлита методом осаждения из раствора соды с последующей прокалкой при температуре 600 °С – 700 °С.

**Ключевые слова:** оксид магния, размер частиц, дефектность частиц, активность оксида магния, форстеритовая керамика, спаиваемость с металлами.

## **INFLUENCE OF MAGNESIUM OXIDE METHOD FOR PRODUCING MICROSTRUCTURE FORSTERITE CERAMICS**

### ***Ludmila B. Vorobyeva***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the chemical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, 630108, Novosibirsk, Plachotnogo 10, tel. (383)361-07-79, e-mail: lbvorobyeva@gmail.com

### ***Anna D. Zonova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, senior teacher, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

### ***Svetlana A. Stepanova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., candidate of the technical sciences, docent, department of metrology and technology of the optical production, tel. (383)361-07-79

In article investigated the microstructure of the magnesium oxide used to form the functional ceramic based forsterite. Investigated magnesium oxide produced according to two different technologies, from various starting materials. Shown that greater activity has magnesium oxide pro-

duced from carnallite by precipitation from a solution of baking soda followed by calcinations at 600 °C – 700 °C.

**Key words:** magnesium oxide, particle size, particle defects, active magnesium oxide, forsterite ceramics, junction of metals.

Функциональный керамический материал на основе форстерита известен давно, но до сих пор применяется для подложек, интегральных схем, плёночных резисторов, в качестве деталей металло-керамической оболочки. Форстеритовая керамика является одним из важных классов керамических материалов для электротехнической и электронной техники. К данному типу керамики предъявляются высокие требования как по качеству функциональных свойств и их стабильности, так и по выходу готовой качественной продукции: диэлектрические характеристики, коэффициент термического расширения, механическая прочность, способность к спаиванию с металлами [1].

Форстерит – ортосиликат магния ( $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ), не имеющий полиморфных форм и модификационных превращений. Он является конечным членом оливнинового ряда твёрдых растворов.

Основными сырьевыми материалами при изготовлении форстеритовых керамических материалов являются тальк и оксид магния [2]. Кроме того, в шихтовой состав форстеритовых материалов входят бентонит и карбонат бария. Сырьевыми материалами обуславливается химический состав керамики (массовая доля, %):  $\text{SiO}_2$  – 40,1 %;  $\text{MgO}$  – 52,2 %;  $\text{BaO}$  – 5,95 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,71 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,33 %. Керамика имеет единственную кристаллическую фазу – форстерит и стеклофазу следующего состава (массовая доля, %):  $\text{SiO}_2$  – 21,0 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 8,0 %;  $\text{BaO}$  – 63,3 %;  $\text{CaO}$  – 5,0 %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 3,0 %. Химический состав и чистота исходных материалов, а также количество и состав расплава, образующийся при обжиге, влияют на качество керамики, её свойства, способность образовывать надёжные спаи с металлами, а также на технологические особенности её изготовления.

В данной работе исследован один из основных исходных материалов – оксид магния ( $\text{MgO}$ ), который по химическим свойствам является типичным основным оксидом. Он плохо растворяется в воде, но легко гидратируется с образованием  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Температура плавления чистого оксида магния 2800 °C. Кристаллическая модификация у него одна – периклаз. Кристаллы периклаза имеют кубическую гранцентрированную решётку (постоянная решётки равна 0,42 нм). Решётка оксида магния отличается высокой плотностью упаковки.

Оксид магния, используемый для изготовления форстеритовой керамики, должен обладать высокой реакционной способностью, которая обуславливается, в первую очередь, мелкими кристаллами и высокой дефектностью кристаллической решётки. Эти свойства оксида магния зависят от исходного материала, из которого получают  $\text{MgO}$ , а также от способа получения и температуры прокаливания. Высокой реакционной способностью отличается оксид магния, полученный из основного карбоната путём его прокаливания при относительно



низкой температуре (550 °С). Повышение температуры прокаливания значительно ускоряет рост кристаллов оксида магния, что приводит к снижению его активности.

Таким образом, основными факторами, обуславливающими активность MgO, являются дисперсность порошка и дефектность структуры частиц, характеризующаяся искажениями кристаллической решётки, плотностью дислокаций и микродеформациями. Активность MgO, используемого при производстве форстеритовой керамики, очень важна, так как влияет на условия синтеза и спекания керамики, на её структуру и качество спаев керамических деталей с металлом [3].

В данной работе проведён анализ оксида магния разными технологиями и из различного сырья. По одной технологии MgO изготавливается из природных карбонатов методом осаждения основного карбоната магния из азотнокислого раствора с последующей прокалкой его при температуре 700 °С [4]. Зёрна этого оксида магния имеют вытянуто-столбчатую или таблитчатую форму с явно выраженной спайностью (рис. 1).

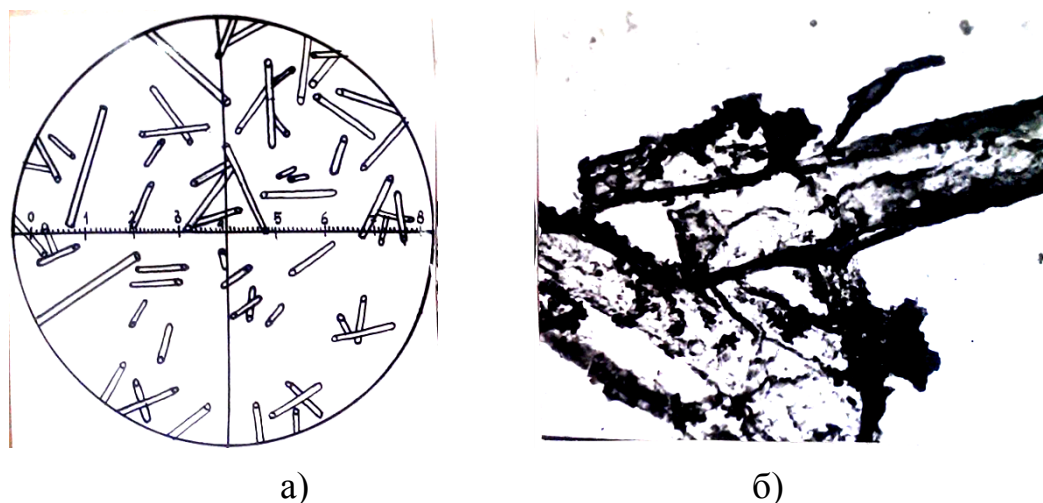


Рис. 1. Получение оксида магния из природных карбонатов методом осаждения карбоната магния из азотнокислого раствора:

- а) изображение с помощью поляризационного микроскопа (увел. 720<sup>×</sup>);
- б) изображение с помощью электронного микроскопа (увел. 8300<sup>×</sup>)

Размер наибольшей стороны зёрен составляет от 6 до 16 мкм. Очевидно, что зёрна оксида магния, изготовленного по данной технологии, имеют форму, не характерную для периклаза. Данный MgO сохраняет псевдоструктуру исходного материала и является псевдоморфозой периклаза по углекислому магнию, получаемому осаждением из азотнокислого раствора магния. Показатель преломления зёрен данного оксида магния несколько ниже, чем у периклаза. Сохранение оксидом магния структуры исходного материала может являться причиной высокой активности, обеспечивающей хорошую возможность спекания форстеритовой керамики на его основе [3].

По другой технологии MgO получают из карналлита ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) методом осаждения карбоната магния из раствора соды с последующей прокалкой при температуре  $600\text{ }^\circ\text{C} - 700\text{ }^\circ\text{C}$  [4].

При увеличении поляризационного микроскопа в  $480^\times$  зёрна данного оксида выглядят частицами неправильной формы, размером от 20 до 150 мкм. Увеличение поляризационного микроскопа, равное  $720^\times$ , и электронного позволяют увидеть, что это не отдельные монокристаллические зёрна, а образования, состоящие из множества мелких частиц – агломераты (рис. 2).

Склонность зёрен оксида магния, полученного по данной технологии, к агломерации, очевидно, вызвана их малыми размерами. Для установления истинных форм и размеров частиц оксида магния было применено диспергирование порошка MgO при приготовлении препаратов для исследований с помощью поляризационного и электронного микроскопов (рис. 3).

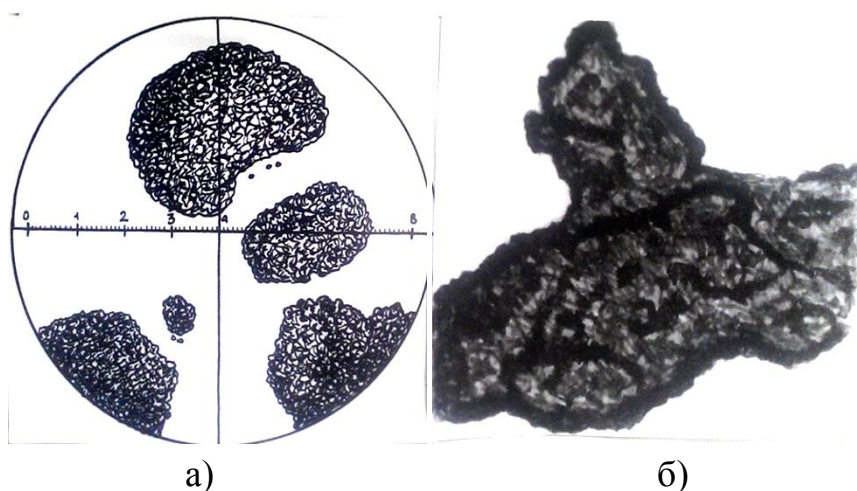


Рис. 2. Получение оксида магния из карналлита методом осаждения карбоната магния из раствора соды:

- а) изображение с помощью поляризационного микроскопа (увел.  $720^\times$ );
- б) изображение с помощью электронного микроскопа (увел.  $8300^\times$ )

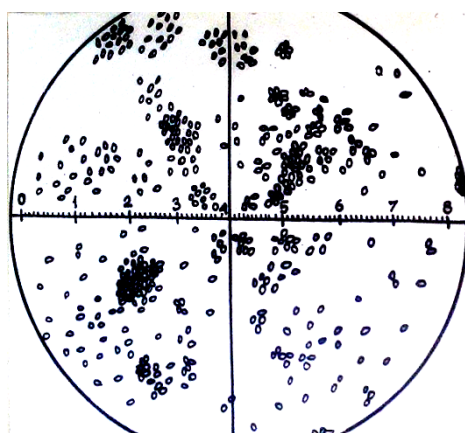


Рис. 3. Определение формы и размеров частиц MgO диспергированием его порошка (поляризационный микроскоп; увел.  $720^\times$ )

Размер зёрен по данным электронной микроскопии составляет 0,1 – 0,3 мкм; форма зёрен – округлая, что характерно для периклаза. Показатель преломления зёрен MgO равен 1,736, что соответствует показателю преломления периклаза.

Рентгенофазовый анализ показал соответствие оксида магния, изготовленного по обеим технологиям, структурной решётке MgO, отличных от периклаза кристаллических фаз не обнаружено. Оксид магния, изготовленный из карналлита, характеризуется менее острыми и более «размытыми» пиками (рис. 4), что свидетельствует о более мелких размерах зёрен порошка и их большей дефектности, чем у оксида магния, изготовленного из природных карбонатов.

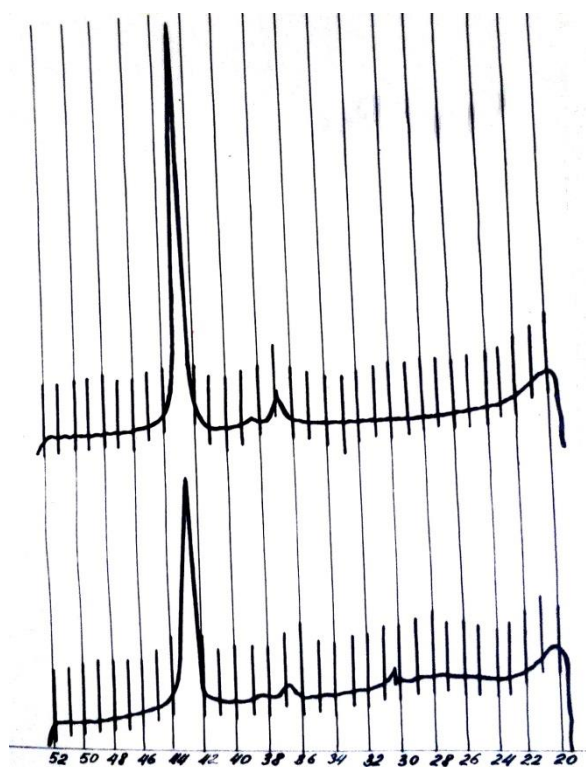


Рис. 4. Рентгенограмма оксида магния, изготовленного по разным технологиям:  
а) из природных карбонатов; б) из карналлита

На основании данных проведённого исследования оксида магния, изготовленного по двум разным технологиям, следует сделать вывод, что MgO, полученный из карналлита, обладает большей реакционной способностью, чем MgO, полученный из природных карбонатов, так как в первом случае зёрна имеют малые размеры, большую дефектность структуры и большее соответствие периклазу. И, следовательно, более пригоден для изготовления форстеритовой керамики.

Активность оксида магния способствует понижению температуры обжига изделий из форстеритовой керамики, что очень важно в серийном производстве. Аморфная фаза керамики – «стеклофаза», образующаяся при использова-

нии активного оксида магния, способствует спаиванию керамических деталей с металлом.

Таким образом, использование более мелкокристаллического и более дефектного оксида магния, полученного из карналлита, позволяет спекать изделия из форстеритовой керамики при более низкой температуре и получать надёжные спаи с металлом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Длительная прочность плотной поликристаллической керамики на основе оксида магния при температурах до 1600 °С / В. С. Бакунов, Е. С. Лукин, Э. П. Сысоев // Стекло и керамика. – 2013. – С. 16–19.
2. Стеатитовая керамика на основе талька верхнего Приамурья / В. М. Демчук и др. // Стекло и керамика. – 2010. – С. 13–16.
3. Бакунов В. С. Лукин Е. С. Особенности спекания оксидной керамики // Стекло и керамика. – 2011. – С. 9–13.
4. Особенности ползучести поликристаллической оксидной керамики при температурах до 1600 °С / В. С. Бакунов, Е. С. Лукин, Э. П. Сысоев // Стекло и керамика. – 2012. – С. 25–28.

© Л. Б. Воробьёва, А. Д. Зонова, С. А. Степанова, 2014

## **ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ БУДУЩЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГОВ**

*Анна Дмитриевна Зонова*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

*Галина Вячеславна Симонова*

Сибирская геодезическая государственная академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и технологии оптического приборостроения, тел. 8913-724-67-47, e-mail: SimGal@list.ru

*Надежда Константиновна Шмакова*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

В статье показана роль и значение метрологического обеспечения для решения важнейших задач народного хозяйства России. Отражена необходимость преемственности изучения других дисциплин.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, единство измерений, качество измерений, бакалавр-метролог.

## **PROBLEMS OF THE STUDY OF DISCIPLINE «METROLOGICAL PROVISION» FOR FUTURE PROFESSIONAL ACTIVITY METROLOGES**

*Anna D. Zonova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. tech., senior teacher Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: annet-anutka@yandex.ru

*Galina V. Simonova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D. tech., assistant professor Department of metrology and optical instrumentation technology, tel. 8913-724-67-47, e-mail: SimGal@list.ru

*Nadegda K. Shmakova*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher Department of Metrology and Optical instrumentation technology, tel. (383)361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

In article is show the role and importance of metrology software for solving the major problems of the Russian economy. Reflected the need for continuity of studying other disciplines.

**Key words:** metrological assurance, traceability, quality measurement, bachelor Metrology.

Не секрет, что уровень развития любого современного государства в значительной степени определяется состоянием метрологического обеспечения промышленности, науки и техники, обороноспособности и безопасности государства, медицины, развития торговли и других важнейших задач народного хозяйства. А поэтому знание основ метрологического обеспечения – научных, организационных, нормативных и технических являются важными вехами в образовательном процессе будущих бакалавров.

Под метрологическим обеспечением (согласно РМГ 29-99 [1]) понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Для России повышение точности измерения многих товаров, которые поставляются в количественном выражении, является актуальным (нефти, газа, леса и других энергоресурсов). Так, увеличение точности измерений в сфере учета энергоносителей лишь на 0,5 % соответствует вовлечению в оборот товаров на сумму в несколько миллиардов долларов. Исследования показывают, что точность измерения, например, количества газа в магистральных трубопроводах не превышает 3 %, а в распределительных сетях 10 %.

Сегодня в России эксплуатируется 1 млрд. средств измерений (только в торговле используется 170 млн. средств измерений: счетчиков, весов, расходомеров...), в работу вовлечены миллионы людей, занятые измерениями профессионально.

Повседневная жизнь страны немыслима без эффективного функционирования Государственной системы обеспечения единства измерений. Так обеспечение обороны и безопасности государства невозможно осуществить без высокоточных средств измерений. Современные образцы военной техники являются высокоэффективными информационно-измерительными системами, которые обладают способностью получения и возможностью в достаточно короткие сроки обрабатывать большие объёмы высокоточной измерительной информации.

Важна роль метрологии в системе технического регулирования Российской Федерации, так как формирование требований к характеристикам продукции (как обязательных, так и добровольных к применению), а также оценка соответствия данным требованиям должны основываться на результатах измерений и испытаний продукции.

Проникаясь важностью изучения метрологического обеспечения (МО), студенты должны знать, что основной тенденцией в развитии МО является переход от существовавшей ранее сравнительно узкой задачи обеспечения единства и требуемой точности измерений к принципиально новой задаче *обеспечения качества измерений*. Качество измерений характеризует совокупность свойств средств измерений, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерений с требуемой точностью (размером допускаемых погрешностей, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводи-

стью). И вот здесь начинаются трудности в изучении, связанные с отсутствием производственной базы в обучении.

Изучение дисциплины «Метрологическое обеспечение» начинается в четвертом семестре после знакомства с курсом «Метрология, стандартизация и сертификация». Уже с первых лекционных и практических занятий становится понятен тот факт, что студенты рассматривают преподаваемую дисциплину как что-то новое, почти не связанное с предшествующим материалом, воспринимают почти оторванным от ранее рассмотренных вопросов, а потому приходится более детально повторять научную основу метрологического обеспечения – метрологию.

Понятие МО применяется, как правило, по отношению к измерениям (испытанию, контролю) в целом. В то же время допускают использование термина МО технологического процесса (производства, организации), подразумевая при этом МО измерений (испытаний или контроля) в данном процессе. Студенты-бакалавры далеки от этого технологического процесса, даже все стадии жизненного цикла изделия или процесса, которые тоже являются объектами МО, они, в лучшем случае, видят из презентации.

Современные требования к бакалаврам–метрологам предполагают формирование различных компетенций: производственно-технологических, организационно-управленческих и других. Так ФГОС 221700 – Стандартизация и метрология ставит задачи [2]:

- практического освоения современных методов контроля, измерений, испытаний и управления качеством, эксплуатацию контрольно-измерительных средств; разработку локальных поверочных схем по видам и средствам измерений; проведения поверки, калибровки, ремонта и юстировки средств измерений;

- определения номенклатуры измеряемых и контролируемых параметров продукции и технологических процессов; установление оптимальных норм точности измерений и достоверности контроля; выбора средств измерений, испытаний и контроля, а без достаточной производственно-технической базы невозможно подготовить хорошего специалиста.

Необходимо обеспечить производственную практику студентов на предприятиях для того, чтобы они знали продукцию, материалы, процессы производства продукции, организационные основы размещения этих процессов на производстве и др. Без практической базы и без научно-исследовательских институтов с их эталонной базой подготовка бакалавров-метрологов, а тем более специалистов (резолуция п. 3 Круглого стола по теме «Проблемы метрологического образования в России» [3]), бессмысленна.

Необходимо обеспечить учебный процесс современной инструментальной базой и создать условия для практического взаимодействия учреждений (ФГБОУ ВПО «СГГА») и предприятий с точки зрения будущего трудоустройства выпускников (материалы Круглого стола [3]). Также обеспечить доступ к лабораториям и производственному процессу профильных предприятий, например, ФГУП «СНИИМ». Проводить мастер-классы по поверке оптико-

электронных и геодезических приборов, рекламировать метрологическую службу ФГБОУ ВПО «СГГА», так как только в ней имеется эталонный геодезический полигон для комплексной поверки геодезических средств измерений: рулеток, кодовых и цифровых нивелиров и теодолитов, светодальномеров, тахеометров, кипрегелей, буссолей, трассоискателей, а также спутниковой аппаратуры. И тогда выпускники кафедры МиТОП наряду с полученными теоретическими знаниями в области метрологического обеспечения и практическими навыками смогут достойно работать метрологами в любой сфере народного хозяйства России.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения // Введ. 2001–01–01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 146 с.
2. ФГОС ВПО по направлению подготовки 221700 – Стандартизация и метрология (квалификация (степень) «бакалавр») // Приказ Минобрнауки РФ от 18.05.2011 № 1657. - Режим доступа: КонсультантПлюс.
3. Круглый стол по теме «Проблемы метрологического образования в России» // Матер. Круглого стола (Резолюция, п. 3). – 21.11.2013. – Организатор – журнал «Мир измерений». – М.: Торгово-промышленная палата РФ, 2013. – С. 44-51.

© А. Д. Зонова, Г. В. Симонова, Н. К. Шмакова, 2014



## ЛИНЕЙНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

*Виктор Николаевич Матуско*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)36-107-31

Для управления скоростью линейного пьезоэлектрического двигателя предложено менять скважность импульсных пачек в цепи питания двигателя. Разработана соответствующая управляющая электрическая схема.

**Ключевые слова:** линейные пьезоэлектрические двигатели, управление скоростью, скважность, управляющая схема.

## LINEAR PIEZOELECTRIC MOTOR

*Victor N. Matysko*

Siberian state geodetic academy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plahotnogo 10, Ph. D., docent of the department of special devise and technologies, tel. (383)36-107-31

To control the speed of the linear piezoelectric motor proposed to change the duty cycle pulse bursts in the supply circuit of the motor. Develop appropriate control circuitry.

**Key words:** linear piezoelectric motors, speed control, duty cycle, the control circuit.

В этих электродвигателях осуществляется преобразование продольных механических колебаний пьезоэлемента в поступательное перемещение подвижной части.

Макет исследуемого двигателя изображен на рис. 1.

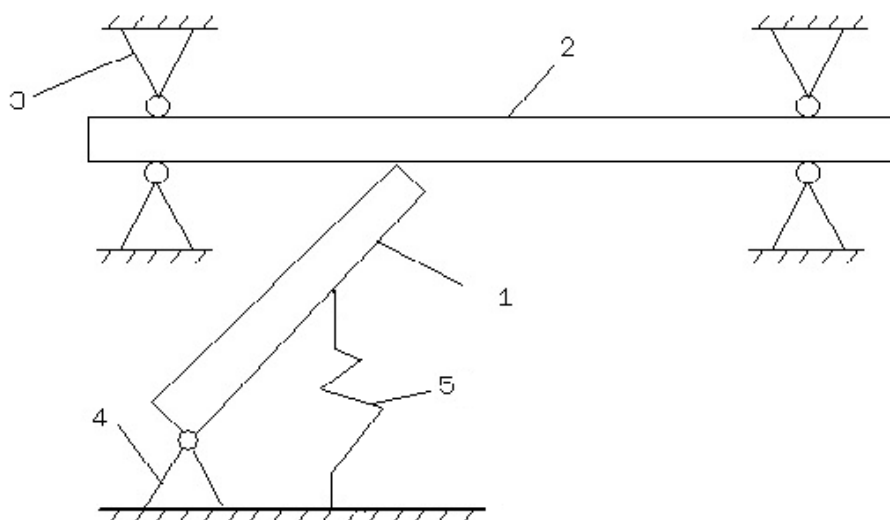


Рис. 1. Макет исследуемого двигателя

Двигатель содержит пьезоэлектрическую пластину 1. Пьезоэлектрическая пластина установлена под некоторым углом к подвижной части 2 двигателя. Подвижная часть, представляющая собой стальную пластину, установлена в подшипниках 3. Нижняя часть пьезоэлектрической пластины закреплена в опоре 4 винтами. Пружина 5 прижимает верхнюю часть пьезоэлектрической пластины к подвижной части. К пластине подводится переменное напряжение резонансной частоты продольной моды колебаний от генератора. Пластина оказывает микроударное воздействие на контактирующую с ней подвижную часть, приводя её в поступательное движение. Меняя скважность импульсных пачек в цепи питания двигателя, можно регулировать скорость его в широком диапазоне, вплоть до 1,2 мм/с. Исследовалась зависимость скорости перемещения двигателя от скважности импульсных пачек питающего напряжения.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2, где по оси абсцисс отложена скважность импульсных пачек  $q$  питающего напряжения, а по оси ординат - скорость перемещения подвижной части двигателя  $V$  в мм/с. Скважность - это отношение периода повторения импульсных пачек к длительности импульсной пачки.

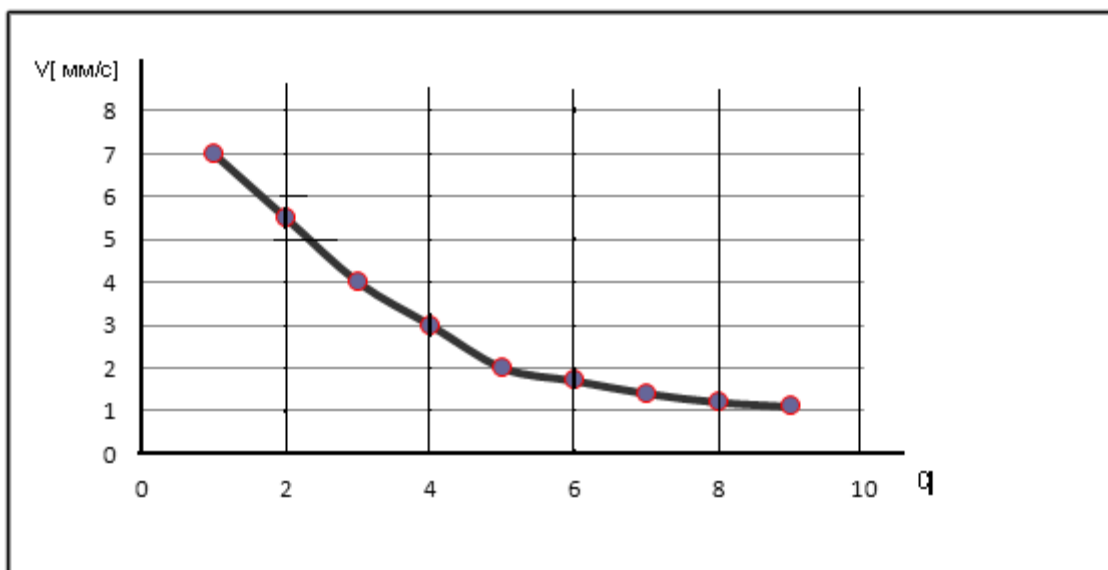


Рис. 2. Зависимость скорости перемещения двигателя от скважности импульсов

Для управления скоростью перемещения подвижной части пьезоэлектродвигателя предлагается следующая электрическая схема (рис. 3).

От генератора 1 переменное напряжение с частотой от 20 Гц до 100 Гц поступает на обмотку реле 2. Контакт реле периодически замыкается, коммутируя цепь питания двигателя 3. Двигатель запитан от генератора переменного напряжения 4. В цепи питания обмотки реле 2 последовательно с генератором 1 включены диод 5 и источник постоянного напряжения 6. Регулируя это напря-

жение и напряжение источника 1, можно менять скважность импульсов в цепи питания реле 2.

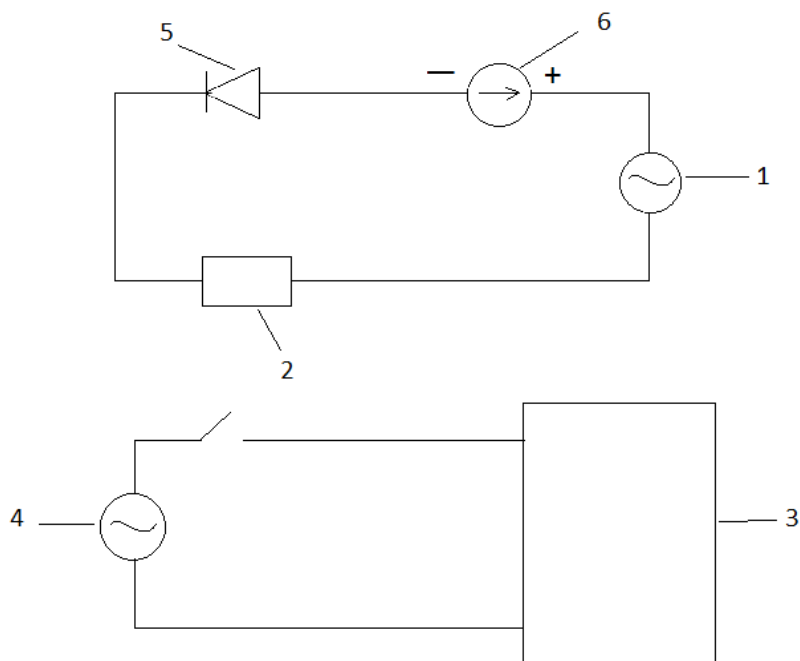


Рис. 3. Управляющая электрическая схема

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимов А.И., Евмененко В.В. Линейный пьезоэлектрический микродвигатель. Информационный листок №90-80, Томск, ЦНТИ, 1980.

© В. Н. Матуско, 2014

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

*Георгий Алексеевич Куриленко*

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов, тел. (383)346-17-77, e-mail: teormech@ngs.ru

*Галина Витальевна Григорьева*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: sgga\_55@mail.ru

В работе используется термографический подход для оценки процесса накопления повреждаемости в металлах при их циклическом деформировании. Процесс макроупругого деформирования рассмотрен совместно с термодинамикой микропластических деформаций. Получены формулы для практического расчета потока удельной энтропии, производимой при циклическом деформировании в очаге накопления и развития повреждаемости. Этот поток энтропии разложен на функциональные части, которые удобно использовать при прогнозировании циклической долговечности. Приведены результаты практического использования проведенных исследований.

Работа является обобщающей разработанного автором термографического подхода исследования повреждаемости металлов.

**Ключевые слова:** циклическая прочность, температура, энтропия, повреждаемость.

## **THE MORE ACCURATE FORECASTING CYCLIC STRENGTH OF METALS**

*Georgiy A. Kurilenko*

Novosibirsk state technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, etc. K. Marksa 20, building 5, doctor of technical Sciences, Professor of Department of strength of aircrafts, tel. (383)346-17-77, e-mail: teormech@ngs.ru

*Galina V. Grigorieva*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: sgga\_55@mail.ru

The paper uses the thermal approach to assess the process of accumulation of damage in metals under repeated deformation. The process макроупругого deformation discussed in conjunction with the thermodynamics микропластических deformations. Formulas are obtained for the practical calculation of flow of the specific entropy produced under cyclic deformation in the hearth of accumulation and development of damage. This entropy flow divided into functional parts that can be useful in predicting the cyclic durability. Results of practical use of the research.

Work is a generalizing developed by the author of thermographic approach research damaging metals.

**Key words:** cyclic strength, temperature, entropy, damageability.

**Получение расчетных формул.** Работа большинства конструктивных элементов протекает номинально в пределах упругого деформирования. При этом пластические деформации в макрообъеме работающих деталей отсутствуют, но происходит микроскопическое деформирование отдельных зерен металла, связанное с выделением тепла. Поэтому процесс макроупругого деформирования необходимо рассматривать в тесном единстве с термодинамикой микропластических деформаций.

Это удобно сделать с помощью уравнения энергии, которое для квазистатических необратимых процессов можно записать в виде

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \left( \frac{dq}{dt} + \sigma_{ij}^{(D)} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} \right) .$$

Здесь  $\frac{dS}{dt}$  и  $\frac{dq}{dt}$  соответственно скорости изменения удельной энтропии и количества тепла;  $T$ -температура в рассматриваемый момент времени;  $\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}$  - скорость изменения тензора деформаций;  $\sigma_{ij}^{(D)}$ -тензор диссипативных напряжений.

Для адиабатических процессов  $dq = 0$  и скорость производства энтропии полностью определяется диссипативной функцией

$$dS = \frac{1}{T} \sigma_{ij}^{(D)} d\varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

Следует заметить, что понятие энтропии, строго говоря, относится только к медленно протекающим равновесным процессам. Но такие процессы являются идеализированными и в действительности точно никогда не реализуются. Но к ним можно подойти сколь угодно близко. Очень многие реальные процессы, идущие с конечными скоростями, можно считать приблизительно квазистатическими (квазиравновесными). Именно такими являются процессы медленного накопления и развития повреждаемости при многоциклового усталости, которой и посвящена данная работа.

Известно, что даже при весьма малых амплитудах колебаний зависимость между напряжениями  $\sigma$  и деформациями  $\varepsilon$  в металлах не остается линейной и при представлении ее в координатах  $\sigma$ - $\varepsilon$  наблюдается замкнутая петля механического гистерезиса, площадь которой представляет диссипированную за цикл колебаний энергию, через которую и рассчитывается приращение всей произведенной за цикл удельной энтропии  $\Delta S^{(1u)}$  по формуле (1).

Рассмотрим колебательный процесс, связанный с реализацией одноосного напряженного состояния. Выражения, описывающие изменение напряжений и деформаций во времени, имеют вид

$$\sigma = \sigma_a \sin(\omega t), \quad \varepsilon = \varepsilon_a \sin(\omega t - \varphi). \quad (2)$$

Из (1) с учетом (2) получаем:

$$|\Delta S^{(1u)}| = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} dS = \frac{1}{T} \pi E \varepsilon_a^2 \sin\varphi. \quad (3)$$

С учетом связи между коэффициентом поглощения энергии  $\psi$  и  $\sin\varphi$  [1]  $\psi = 4\kappa_\phi |\sin\varphi|$  выражение (3) принимает вид

$$\Delta S^{(1u)} = \frac{\psi \pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}. \quad (4)$$

Здесь  $\kappa_\phi$  - коэффициент формы петли гистерезиса.

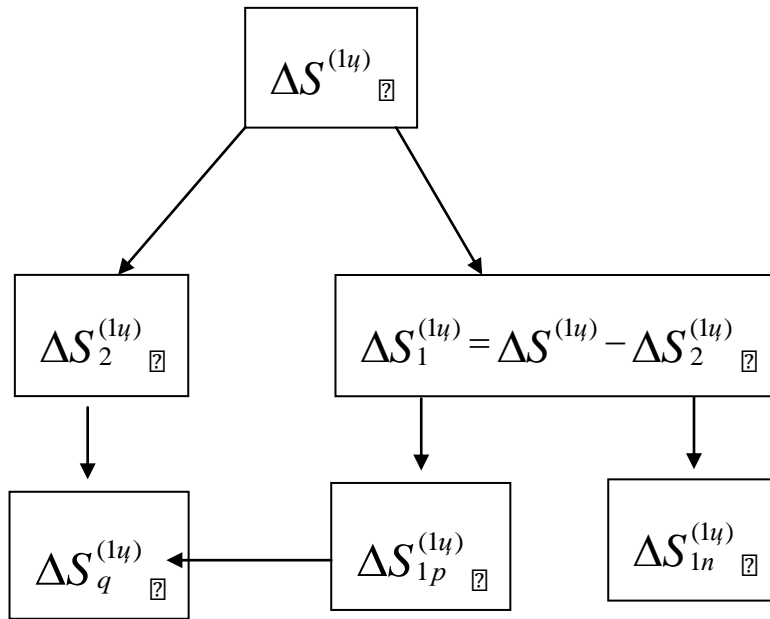


Рис. Разложение потока энтропии на функциональные части

Разложим  $\Delta S^{(1u)}$  по формуле (4) на функциональные части в соответствии со схемой, изображенной на рисунке. На схеме приняты обозначения:

$\Delta S_2^{(1u)}$  -приращение за цикл колебаний той части производимой энтропии, которая вызывает непосредственный нагрев очага повреждаемости;

$\Delta S_{1n}^{(1u)}$  -поток энтропии, идущий на накопление повреждаемости, т.е. на зарождение и развитие микротрещины;

$\Delta S_{1p}^{(1u)}$  -часть производимой энтропии, связанной с неопасными деформациями в очаге;

$\Delta S_q^{(1u)}$  -поток энтропии, рассеиваемой в окружающую среду в виде тепла.

Формула для расчета  $\Delta S_2^{(1u)}$  известна в литературе:

$$\Delta S_2^{(1u)} = c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \approx c_v \frac{T_2 - T_1}{T_1}. \quad (5)$$

Здесь  $c_v$ -удельная теплоемкость;

$T_1$  и  $T_2$  -температуры очага повреждаемости соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла колебаний.

Оставшаяся часть приращения энтропии

$$\Delta S_1^{(1u)} = \Delta S^{(1u)} - \Delta S_2^{(1u)} = \Delta S_{1p}^{(1u)} + \Delta S_{1n}^{(1u)}.$$

При разложении потока энтропии  $\Delta S_1^{(1u)}$  на  $\Delta S_{1p}^{(1u)}$  и  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$  будем опираться на идеи, заложенные в деформационных критериях усталостного разрушения, а именно, исходить из того, что при работе до предела выносливости (т.е. при  $\Delta \varepsilon_n \leq \Delta \varepsilon_R$ ), где  $\Delta \varepsilon_n$ -неупругая часть деформации, а  $\Delta \varepsilon_R$ -неупругая часть деформации, соответствующая нагружению с амплитудными напряжениями, находящимися на уровне предела выносливости) производится только “неопасная энтропия”. При работе за пределом выносливости ( $\Delta \varepsilon_n > \Delta \varepsilon_R$ ) часть энтропии, которая соответствует неупругой деформации  $\Delta \varepsilon_{nn} = \Delta \varepsilon_n - \Delta \varepsilon_R$ , расходуется на необратимые процессы накопления усталостных повреждений, а оставшаяся часть является неопасной. Выражения для подсчета соответствующих приращений удельной энтропии (выраженных через  $\psi$ ) будут иметь вид:

$$\Delta S_{1p}^{(1u)} = \frac{\psi \pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi}, \quad \Delta S_{1n}^{(1u)} = 0. \quad (\text{при } \sigma_a \leq \sigma_R)$$

$$\Delta S_{1p}^{(1u)} = \frac{\psi_R \pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi} - c_v \frac{\psi_R}{\psi} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right),$$

$$\Delta S_{1n}^{(1u)} = \frac{(\psi - \psi_R) \pi E \varepsilon_a^2}{4TK_\phi} - c_v \frac{\psi - \psi_R}{\psi} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (\text{при } \sigma_a > \sigma_R)$$

В этих формулах,  $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ,  $\psi_R$ -коэффициент поглощения энергии, соответствующий работе при амплитудных напряжениях  $\sigma_a$ , равных пределу выносливости  $\sigma_R$ . Формула (6) для подсчета  $\Delta S_2^{(1u)}$  остается без изменений.

**Обсуждение результатов.** Энтропия как функция состояния является наиболее полной диссипативной функцией, поскольку она учитывает интегральным образом буквально все, что происходит в очаге развития повреждаемости, включая температуру. Поэтому использование приращения энтропии в качестве индикатора развития повреждаемости позволило повысить точность прогнозирования усталостной прочности.

Следует заметить, что использование других параметров повреждаемости (обычно это диссипированная энергия) не позволяет разложить их на функциональные части с достаточной для прогнозирования точностью.

Так в работе [2] рассеянная за цикл колебаний энергия  $\Delta W^{(1u)}$  разложена на тепловую  $\Delta W_m^{(1u)}$  и повреждающую  $\Delta W_n^{(1u)}$  части:

$$\Delta W^{(1u)} = \Delta W_m^{(1u)} + \Delta W_n^{(1u)}.$$

Но при этом не выделена скрытая энергия деформации  $\Delta W_p^{(1u)}$ , вызывающая неопасное движение дислокаций, поэтому при расчете  $\Delta W_n^{(1u)}$  в области малых амплитудных напряжений, когда доля  $\Delta W_p^{(1u)}$  особенно возрастает, получается большая погрешность, отмечаемая самими авторами.

В схеме разложения [3] из  $\Delta W^{(1u)}$  не выделена повреждающая энергия. Это связано, на наш взгляд, с большой погрешностью расчета  $\Delta W_n^{(1u)}$  при энергетическом подходе.

Введение диссипативной функции  $\Delta S^{(1u)}$  и ее разложение по схеме на рисунке позволило использовать различные части этого разложения, которые довольно легко рассчитываются, для решения ряда конкретных задач.

**Практическое использование результатов работы.** Результатом проведенных исследований явилось решение ряда актуальных задач прикладного характера в области прогнозирования усталостной прочности, которые можно сформулировать следующим образом.

1. Разработан метод ускоренного прогнозирования индивидуального предела выносливости деталей по кинетике приращения удельной энтропии  $\Delta S_2^{(1u)}$  в очаге накопления повреждаемости [5]. Кривая  $\Delta S_2^{(1u)} = f(\sigma_a)$  в районе физического предела выносливости имеет резкий излом, абсцисса которого и соответствует индивидуальному пределу выносливости испытываемой детали.

2. Разработан метод прогнозирования циклической долговечности как “бездефектных” (без начальных трещин) деталей по кинетике  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$ , так и деталей, имеющих исходные надрезы. При расчете долговечности бездефектных деталей предварительно определяется ее истинный предел выносливости и коэффициент поглощения энергии на уровне предела выносливости. Эти параметры по разработанной методике определяются с высокой точностью и достоверностью. Затем рассчитывается удельная повреждающая энергия за цикл  $\Delta W_n^{(1u)}$  через поток удельной повреждающей энтропии  $\Delta S_{1n}^{(1u)}$ , по которой и прогнозируется циклическая долговечность [6]. Прогнозирование циклической долговечности деталей с трещинами опирается на кинетику приращения  $\Delta S_2^{(1u)}$  в кончике трещины, которая также рассчитывается достаточно точно с помощью современной аппаратуры для неконтактного измерения температуры. Строится график скорости роста трещины в зависимости от  $\Delta S_2^{(1u)}$ , который можно рассматривать как термодинамическую интерпретацию традиционной формулы Пэриса. По этому графику рассчитывается циклическая долговечность испытываемой детали с начальной макротрещиной [7].

Погрешность прогнозирования при этом не превышала 30%, что в разы меньше погрешности прогнозирования по стандартной методике.

3. Предложен более точный термографический метод определения  $P_Q$ , при котором происходит страгивание трещины при вязком и упруго-вязком разрушении, по которому можно рассчитывать характеристики статиче-



ской трещиностойкости металлов. График зависимости растягивающей образец силы  $P$  от  $\Delta S_2$ , подсчитываемой в кончике развивающейся трещины, в районе усилия  $P_0$  имеет характерную площадку [8]. По предложенному методу разброс определяемых характеристик трещиностойкости уменьшается на 10% - 20% и также уменьшается на 40% - 50% время испытания [9].

4. Разработаны практические методы неразрушающего контроля циклической прочности серийно выпускаемых деталей в производственных условиях и испытательные стенды для их реализации [10].

**Выводы.** Разработаны новые методы прогнозирования циклической прочности металлов и неразрушающего контроля циклической прочности деталей машин, основанные на использовании термодинамического индикатора накопления и развития повреждаемости - приращения удельной энтропии  $\Delta S^{(1u)}$  в очаге повреждаемости.

Эти методы имеют определенные преимущества в области точности и трудоемкости по сравнению с известными методами:

-приращение энтропии  $\Delta S^{(1u)}$  является наиболее полной диссипативной функцией;

-  $\Delta S^{(1u)}$  разложено на функциональные части, что позволяет в каждой конкретной задаче использовать адекватную этой задаче часть  $\Delta S^{(1u)}$ ;

- использование современной ИК техники позволяет вести непрерывное наблюдение за очагом повреждаемости и оперативно выдавать необходимую для расчета информацию;

- информацию о развитии повреждаемости выдает сам испытываемый объект.

Предложенные термографические методы неразрушающего контроля прочности показали свою эффективность в промышленности. Результаты работы внедрены на ряде крупных предприятий нашей страны в виде действующих испытательных стендов, вписанных в технологические цепочки контроля качества материалов и деталей машин (завод «Сибтекстильмаш» (Новосибирск), Московский машиностроительный завод «Опыт»).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трощенко. Киев: Наукова думка, 1981.

2. Гуревич С.Е., Гаевой А.П. Методика экспериментального определения разрушающей энергии при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. 1973. №9. С.1110-1114.

3. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел // В.В. Федоров. Ташкент: Фан, 1979.

4. Куриленко Г.А. Способ определения предела выносливости. Авт. свид. №1499167. – Бюл. изобр., №29, 1989, с.154.

5. Куриленко Г.А. Использование термодинамического подхода при циклических испытаниях материалов // ПМТФ. 1989. №5. С.158 – 163.

6. Kurilenko G.A. Quantitative infrared investigations through the intensity of thermal source in the domain of damaging // Proc. of the 4th Intern. Workshop “Advanced Infrared Technology and Applications”, Firenze (Italy), 1997. P.177-188.

7. Куриленко Г.А., Пшеничный А.Б., Труфанова Т.В. Оценка повреждаемости циклически деформируемых деталей с макротрещинами // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 1992. №3. С. 46-49.
8. Куриленко Г.А., Пшеничный А.Б. Способ определения трещиностойкости материалов. Авт. свид. № 1820278. – Бюл. изобр., №21, 1992, с. 73.
9. Куриленко Г.А. Исследование трещиностойкости металлов термографическим методом//Обработка металлов. 2010. №3. С. 41 – 44.
10. Куриленко Г.А. и др. Установка для высокочастотных резонансных испытаний деталей v-образной формы на усталость при изгибе. Авт. свид. № 1633336. - Бюл. изобр., №9, 1991, с.98.

© Г. А. Куриленко, Г. В. Григорьева, 2014

## **К ВОПРОСУ О ПРОЦЕССАХ, ВЫЗЫВАЮЩИХ СНИЖЕНИЕ КПД В МАШИНАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ РАЗГОНОМ УДАРНИКА ПРОДУКТАМИ СГОРАНИЯ**

*Василий Николаевич Белобородов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31

В статье рассмотрены причины снижения КПД в ударных машинах внутреннего сгорания. Намечены пути повышения их эффективности.

**Ключевые слова:** мощность тепловых потерь, коэффициент теплоотдачи, полезная мощность, время разгона поршня-ударника, коэффициент полезного действия.

## **ON THE QUESTION OF THE PROCESSES, DECREASING THE EFFICIENCY OF INTERNAL COMBUSTION PERCUSSION MACHINES, USING DIRECT ACCEL- ERATION OF THE STRIKE BY COMBUSTION GAS**

*Vasily N. Beloborodov*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., associate Professor of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31

The article contains the analysis of the processes decreasing the efficiency of internal combustion percussion machines. The ways of increasing the efficiency of that kind of machines outlined.

**Key words:** heat loss power, heat loss factor, useful power, strike plunger speed up time, coefficient of efficiency.

Рассмотрены вопросы влияния тепловых потерь на КПД ударных машин внутреннего сгорания с непосредственным разгоном поршня-ударника продуктами сгорания. Выявлены причины, мешающие достичь высокого КПД. Намечены пути повышения эффективности машин данного типа.

*Мощность тепловых потерь, коэффициент теплоотдачи, отбираемая полезная мощность, время разгона поршня-ударника, коэффициента полезного действия*

При разработке новых моделей ударных машин для разнообразных применений в строительстве и горном деле (например, для разрушения отслуживших свой срок бетонных конструкций, бурения и малоглубинной сейсморазведки) периодически возникает интерес к автономным, не требующим мощного компрессора машинам внутреннего сгорания.

Речь идет не о крупных молотах, а об ударных машинах средней (200-1000Дж) энергии единичного удара. Подобного рода машины обеспечивают короткий и мощный ударный импульс, а также могут использоваться в труднодоступных местах строительных объектов и при геологоразведке.

В указанной работе [1] приведены результаты испытаний опытного образца такого рода машины. Из приведенных данных о расходе топлива можно сде-

лать вывод о низком, не более 5%, КПД экспериментальной машины. Полезная работа при этом оценивалась как произведение энергии единичного удара на частоту ударов.

Как ни парадоксально это звучит, но среди выпускаемых в настоящее время практически зарекомендовавших себя машин нет ни одной машины прямого действия с непосредственным разгоном поршня-ударника продуктами сгорания в указанном диапазоне энергии единичного удара и, соответственно, с небольшими габаритами и весом.

Во всех используемых ныне машинах малой и средней мощности используется стандартный бензиновый, либо дизельный двигатель с передачей мощности на ударник через вспомогательный пневмо- или гидро-привод (например, перфоратор YN-30 фирмы JSI Rocktools). Резонно возникает вопрос: почему?

В данной статье предпринята попытка выявить причины, мешающие созданию ударных машин внутреннего сгорания прямого действия с приемлемым значением КПД, а также наметить возможные пути улучшения КПД ударных машин с непосредственным разгоном ударника продуктами сгорания.

Известно, что в классическом ДВС при номинальной его мощности и оборотах коленчатого вала порядка 3000 об/мин, КПД достигает значения 35%. Это касается современных автомобильных двигателей. В то же время, при скорости вращения коленчатого вала ниже 200 об/мин, КПД существенно падает [2]. Связь КПД с оборотами и, следовательно, с временем разгона поршня становится понятной, если принять во внимание физический механизм тепловых потерь. Мощность таких потерь зависит от температуры продуктом сгорания, площади поверхности деталей, непосредственно соприкасающихся с горячими газами, а также скорости циркуляции газовых потоков.

А относительная величина самих потерь безусловно связана с временем контакта горячих газов со стенками цилиндра и поршнем, которое, в свою очередь, обратно пропорционально частоте вращения двигателя.

На перечисленные факторы технически сложно оказать существенное влияние. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в некотором приближении дается формулой Нуссельта:

$$\alpha = 1.16(1 + 1.24 \cdot \langle V \rangle) T_{\infty}^{1/3} P^{2/3} + 0.421 \frac{(T_{\infty}/100)^4 - (T_K/100)}{T_{\infty} - T_K}$$

где  $T_{\infty}$ ,  $P$  – текущая температура (K) и текущее давление (бар) рабочего тела в цилиндре,  $T_K$  – температура (K) поверхности камеры сгорания,  $\langle V \rangle$  – средняя скорость поршня (м/с).

По данным справочника [3], коэффициент теплоотдачи показывает количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единицу площади поверхности при разности температур газа и поверхности в 1К, что видно из формулы:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot S \cdot \Delta T}$$

где  $\Delta Q$  - количество теплоты, переданной за интервал времени  $\Delta t$ ;  $S$  – площадь поверхности теплообмена;  $\Delta T$  - разность температур между горячим газом и стенкой.

Фактически,  $\alpha$  - мощность теплотерь через единицу поверхности при разности температур в 1К.

С другой стороны, при заданной мощности тепловых потерь, итоговое количество потерянной энергии растет с увеличением времени разгона поршня. Замедление разгона поршня, и, следовательно, снижение его скорости, снижает непосредственно отбираемую полезную мощность. Это совершенно ясно видно из формулы для отбираемой мощности:

$$N = PSV,$$

где  $P$ – давление;  $S$  – площадь поршня;  $V$  – скорость поршня.

В результате оказывается, что значение КПД неизбежно должно падать, если в процессе рабочего цикла снижается средняя скорость поршня. Рабочее тело остывает, еще не успев передать поршню свою энергию.

Из формулы для  $\alpha$  видно, что тепловые потери можно было бы уменьшить снижением начальной температуры продуктов сгорания, так как при этом снижается  $\Delta T$ . Однако, с другой стороны, согласно формуле Карно предельно достижимым КПД при этом неизбежно снизится

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

где  $T_1$  - начальная, а  $T_2$  - конечная температура в процессе, хотя в данном случае речь идет об открытом, а не замкнутом цикле, и строго говоря, формула Карно выведена для других условий. Здесь конечная температура – это температура в конце расширения, т.е. на выхлопе. Но повышение степени расширения неизбежно приводит к снижению удельной мощности. Понятно также, что из соображений повышения удельной мощности, двухтактный цикл оказывается предпочтительнее четырехтактного.

В настоящей статье приведены лишь аналитические формулы, позволяющие сделать простейшие оценки. Между тем, в нынешних условиях имеются достаточно надежные разработанные численные компьютерные программы для расчета теплотерь в цикле ДВС. Но при этом, результаты численных расчетов всегда согласуются с ранее полученными аналитическими формулами.

Как пример численных исследований в данной области привести статью [4].

Из приведенных выше соображений следует, что для машин с поршнем-ударником и его непосредственным разгоном продуктами сгорания весьма желательно использовать конструктивные решения, обеспечивающие как можно более высокую среднюю скорость поршня в процессе расширения продуктов сгорания. К сожалению, для поршня-ударника ударной машины максимальная

скорость ограничена значением 5-7 м/сек. При более высоких скоростях удар по инструменту или наковальне приводит к быстрому выходу ударника их строя. Таким образом, в ударных машинах с прямым разгоном поршня-ударника продуктами сгорания невозможно достичь КПД, типичного для наиболее распространения ДВС.

Для крупных молотов с высокой энергией удара ситуация с теплотерями несколько улучшается, так как полная энергия сгорания топлива зависит от объема топливоздушная смеси, а теплоотдача – от площади поверхности поршня и стенок камеры. С увеличением размера камеры сгорания, объем растет пропорционально  $r^3$ , а поверхность лишь пропорционально  $r^2$ .

Неверно, тем не менее, было бы думать, что ситуация с КПД для ударных машин прямого действия с более малой, чем у дизель-молотов энергией совершенно безнадежна. По мнению автора, есть возможность путем модификации цикла и внесения конструктивных изменений ослабить негативное влияние теплотерей и создать простые по конструкции ударные машины средней мощности ударного действия по циклу ДВС. Прежде всего, был бы полезен предварительный начальный разгон ударника ещё до момента воспламенения топливоздушной смеси при сохранении приемлемой степени расширения продуктов сгорания, а также утилизация остаточной энергии выхлопных газов. Но наиболее радикальным решением проблемы явилась бы разработка импульсного газосгорания внутреннего сгорания с температурой газа на выходе не более 800К.

Такие соображения подтверждаются опытом эксплуатации паровоздушных молотов одинарного и двойного действия, до сих пор применяемых в ковочных цехах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костылев А. Д., Червов В. В. Экспериментальное исследование устройства ударного действия внутреннего сгорания // ФТПРПИ. – № 6. – 1987.
2. Злотин Г. Н., Дульгер М. В., Тихонов С. С. Анализ тепловых потерь в цикле роторно-поршневого двигателя // Двигателестроение. – 1986. – № 9.
3. Прохоров А. М. Физический Энциклопедический словарь. – М.: Большая российская энциклопедия, 1995.
4. Рудой И. Б., Юдаев М. М. Имитационное моделирование рабочего процесса штангового дизель-молота // Ползуновский вестник. – 2006. – № 4. – С. 157–160.

© В. Н. Белобородов, 2014

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИЦЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ХОДЕ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

*Иван Сергеевич Бутримов*

Сибирский филиал федерального казенного учреждения «Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России, 630055, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 3, старший научный сотрудник, тел. (383)361-07-31

*Валерик Сергеевич Айрапетян*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31

В статье рассматриваются вопросы контроля параметров прицельных устройств в ходе полигонных испытаний. Кратко рассмотрены основные задачи, возлагаемые на прицельную технику, основные составляющие точности наведения оружия в цель.

Предложен способ определения положения линии визирования прицелов на основе оптико-электронной системы, использующей лазер совместно с позиционно-чувствительным фотоприёмником.

**Ключевые слова:** прицел, прицельная техника, полигонные испытания, стрелковое оружие, контроль параметров, линия визирования, оптико-электронное устройство, лазер, позиционно-чувствительный фотоприёмник.

## **OPTICAL-ELECTRONIC DEVICE FOR CONTROL OF PARAMETERS OF SIGHTING DEVICES DURING FIELD TESTS**

*Ivan S. Butrimov*

Siberian branch of the Federal state institution «Scientific production Association «Special equipment and communication» of the Ministry of interior of Russia, 630055, Russia, Novosibirsk, ul. Kutateladze, D. 3, senior researcher, tel. (383)361-07-31

*Valerik S. Hayrapetyan*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of the Department of Special devices and technologies, doctor of technical Sciences, tel. (383)361-07-31

The article considers the issues of control parameters sighting devices during field tests. Briefly describes the main tasks entrusted to the sighting equipment, basic components precision weapon guidance systems in goal.

A method is proposed for determining the position of the line of sight sights on the basis of optical-electronic systems, using laser together with a position-sensitive photodetector.

**Key words:** sight sighting equipment, ground test, small arms, control of parameters, line-of-sight, opto-electronic device, the laser, the position-sensitive photodetector.

Основной задачей, возлагаемой на прицельную технику, является наведение стрелкового оружия в цель, с заданными показателями точности. Техниче-

ская невозможность выполнения данного условия соответствует переходу рассматриваемого образца из категории прицельных устройств в категорию наблюдательных приборов, что для прицельной техники равносильно критерию отказа.

Процесс наведения оружия заключается в совмещении проекции линии визирования, сформированной прицельным устройством, с точкой прицеливания в плоскости цели. Следовательно, точность наведения оружия определяется главным образом точностью совмещения прицельного знака с точкой на цели и точностью углового положения самой линии визирования относительно оси канала ствола оружия.

Точность совмещения прицельного знака с целью определяется погрешностью визирования, которая в свою очередь зависит от видимого увеличения визирной системы прицельного устройства, её разрешающей способности, от светопропускания оптической системы, от формы и угловых размеров прицельного знака, его яркости, от параллакса прицельного знака относительно изображения цели и т.д. Погрешность визирования определяется в основном конструктивными параметрами прицельного устройства, а также качеством его сборки и в процессе эксплуатации, при постоянных внешних условиях (освещённости, прозрачности атмосферы), изменяется мало.

Угловое положение линии визирования определяется, как правило, следующими элементами прицельного устройства:

- прицельной сеткой, задающей положение линии визирования в пространстве предметов;
- объективом прицела, определяющим положение изображения цели относительно прицельной сетки;
- устройством ввода углов прицеливания, обеспечивающим заданное положение линии визирования в соответствии с дальностью до цели, фактическими метеоусловиями и другими условиями стрельбы;
- устройством выверки, обеспечивающим заданное положение линии визирования в соответствии с начальными установками устройства ввода углов прицеливания;
- посадочным (крепёжным) кронштейном, обеспечивающим установку прицела на посадочном месте оружия.

Любые нештатные изменения в работе какого-либо из перечисленных выше элементов прицельного устройства приведут к изменению углового положения линии визирования, что в свою очередь приведёт к снижению точности выполнения основной функции прицела – наведения оружия в цель.

К показателям качества прицельной техники, связанным с определением положения линии визирования относятся [1]:

- стабильность (сбиваемость) положения линии прицеливания относительно первоначального положения в ходе стрельбовых и стендовых проверок;
- погрешность ввода углов прицеливания относительно табличных значений;
- фактическая дискретность механизмов выверки;



- уводы линии прицеливания в направлениях, отличных от истинного направления при выверке прицела и вводе углов прицеливания;
- погрешность положения линии визирования при повторной установке прицела на штатное посадочное место.

Все приведённые выше показатели включены в перечень многих типов проверок и испытаний прицельной техники, являющихся важнейшими этапами практического определения действительных тактико-технических характеристик объектов испытания.

Из перечисленных выше показателей качества прицельной техники одним из важных является стабильность положения линии визирования при воздействии ударных нагрузок, которая служит залогом для достижения максимально высоких значений таких важнейших показателей стрельбы, как точность, кучность и эффективность.

В [2] было показано, что при проведении стрельбовых испытаний прицельной техники, существующие способы контроля положения линии визирования не позволяют сделать однозначные выводы о показателях качества контролируемых прицелов, т.к. ошибки, допущенные в ходе выполнения контроля, могут заметно превышать установленные допуски на стабильность положения линии визирования. В особенности это относится к современным высокоточным прицелам, в которых суммарные погрешности установки линии визирования составляют единицы угловых секунд.

Ниже рассмотрен способ контроля положения линии визирования на основе оптико-электронной системы, использующей лазер совместно с позиционно-чувствительным фотоприёмником [3].

Сущность способа заключается в определении координат линии визирования контролируемого прицельного устройства относительно лазерного луча, однозначно связанного с базовыми элементами стрелкового оружия. Алгебраическая разность координат проекций линии визирования и оси лазерного луча до этапа стрельбовых испытаний и после, определит величину отклонения линии визирования контролируемого прицельного устройства в соответствующем направлении после очередного этапа стрельбовых испытаний.

Схема оптико-электронного устройства, предназначенного для контроля положения линии визирования прицелов, представлена на рис. 1.

Оптико-электронная установка состоит из следующих элементов:

- лазера, формирующего пучок параллельных лучей;
- устройства для установки и однозначного базирования лазера на оружии [4];
- коллимационно-измерительного блока, состоящего из коллимационного канала, формирующего бесконечно удаленное изображение сетки для наведения контролируемого прицела, и измерительного канала с позиционно-чувствительным фотоприёмным устройством, фиксирующим положение лазерного пятна;
- устройства вычисления координат лазерного пятна, связанного с выходом позиционно-чувствительного фотоприёмного устройства;

- жесткого основания, на котором закреплены: опора коллимационно-измерительного блока и опора для установки оружия с контролируемым прицелом;
- механизма угловой и линейной регулировки одной из опор по вертикали и горизонту для оптического сопряжения контролируемого прицела и лазера с коллимационно-измерительным блоком;
- окулярной телевизионной камеры, предназначенной для фиксации и передачи изображения прицельного знака и сетки, формируемой коллимационным каналом.

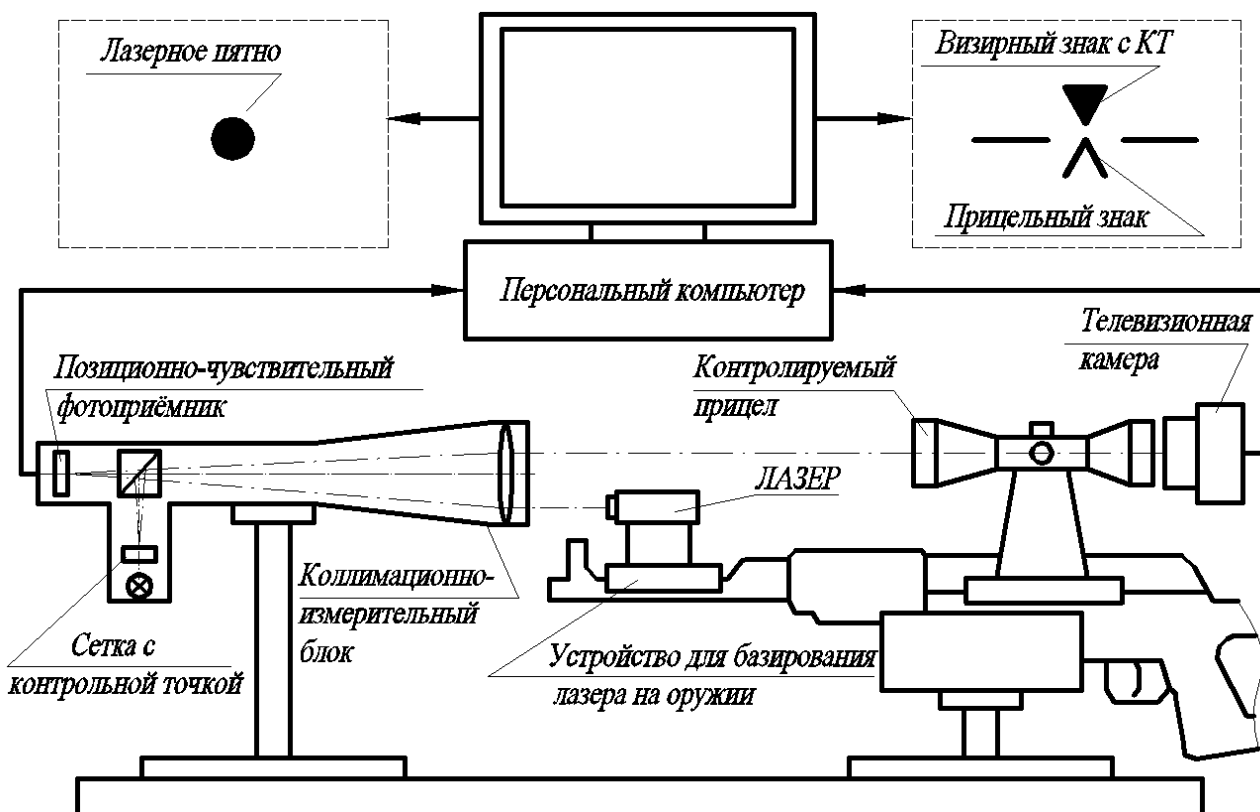


Рис. 1. Схема оптико-электронной установки на основе лазерной системы

На оптической оси объектива коллимационно-измерительного блока установлен светоделительный элемент. В фокальной плоскости объектива в коллимационном канале размещена сетка с визирным знаком, содержащим контрольную точку (КТ), а в измерительном канале – позиционно-чувствительное фотоприёмное устройство.

В виду того, что в ходе контроля положения линии визирования нет необходимости знать абсолютное значение угла между линией визирования прицела и осью канала ствола оружия, то лазер может базироваться на любой части оружия, обладающей достаточной стабильностью углового положения относительно посадочного места прицела, например, на внутренней или внешней поверхности канала ствола. Однако, при установке лазера в канал ствола точ-

ность измерений может быть снижена из-за неизбежного наличия нагара, образующегося в ходе стрельбы и теплового расширения ствола, приводящих к изменению углового положения лазерного излучателя относительно первоначального положения, зафиксированного до стрельбы.

В качестве приёмника лазерного излучения используется позиционно-чувствительное фотоприёмное устройство, например, телевизионная камера на основе ПЗС- или КМОП-матрицы.

В качестве устройства вычисления координат лазерного пятна на позиционно-чувствительном фотоприёмном устройстве используется персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением.

Для повышения точности наведения прицела в контрольную точку сетки используется телевизионная камера, обеспечивающая формирование и передачу изображения на внешнее видеоконтрольное устройство – дисплей персонального компьютера.

Лазер имеет длину волны в той области спектра, в которой обеспечивается работа позиционно-чувствительного фотоприёмника. Для ослабления лазерного излучения устанавливаются один или несколько светофильтров или диафрагма с точечным отверстием.

Коллимационно-измерительный блок имеет различные исполнения: с совмещёнными (вышеописанный вариант) или разобъединёнными каналами. Вариант с совмещёнными каналами обладает компактностью, а также повышает надёжность устройства из-за отсутствия смещения одного канала относительно другого, например, при случайных механических воздействиях, при изменении температуры и т.д.

Вариант с разобъединёнными каналами наиболее применим для контроля телевизионных прицелов, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн. В этом случае измерительный канал идентичен рассмотренному варианту на рисунке 1, но без сетки с контрольной точкой. Для формирования изображения контрольной точки используется дополнительный коллимационный канал, рассчитанный на работу в соответствующей области спектра.

С макетным образцом рассмотренной оптико-электронной установки были проведены лабораторные исследования, которые показали принципиальную возможность контроля параметров прицельной техники, связанных с определением положения линии визирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Министерство внутренних дел Российской Федерации. Правила стандартизации. Прицелы оптические и электронно-оптические для стрелкового оружия. ПР78.01.0020-2009.
2. Айрапетян В. С., Бутримов И. С., Комбаров М. С. Основные аспекты контроля параметров прицельной техники в ходе полигонных испытаний // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 178–183.
3. Патент на полезную модель № 135107 Рос. Федерация. Устройство для контроля положения линии визирования прицелов на стрелковом оружии / Бутримов И. С., Аксе-

нов В. А.; ФКУ НПО «СТиС» МВД России; дата публикации: 27 ноября, 2013; начало действия патента: 24 июня, 2013.

4. Патент на полезную модель № 130380 Рос. Федерация. Устройство для установки контрольно - выверочного приспособления на оружии / Аксенов В. А., Айрапетян В. С, Бутримов И. С.; ФКУ НПО «СТиС» МВД России; дата публикации: 20 июля, 2013; начало действия патента: 7 декабря, 2012.

© И. С. Бутримов, В. С. Айрапетян, 2014

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ**

### ***Евгений Витальевич Манжос***

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, ведущий инженер, тел. (383)333-22-96, e-mail: eugen.manzhos@kinetics.nsc.ru

### ***Наталья Александровна Какуткина***

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь, тел. (383)333-22-96, e-mail: kktk@kinetics.nsc.ru

### ***Алексей Анатольевич Коржавин***

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией физики и химии горения газов, тел. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

### ***Александр Васильевич Вьюн***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31

Проведено экспериментальное исследование зажигания волн фильтрационного горения газа в пористой среде пламенем, стабилизированным на ее поверхности. Показано наличие верхнего и нижнего пределов зажигания по скорости газа для конкретной газовой смеси и пористой среды. Установлено соответствие теоретической модели процессу зажигания и горения газа в пористой среде.

**Ключевые слова:** фильтрационное горение, горение газа, зажигание.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF IGNITION OF FILTRATION COMBUSTION WAVES WITH OPEN FLAME**

### ***Evgeny V. Manzhos***

Institute of Chemical Kinetics & Combustion, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, principal engineer, tel. (383)333-22-96, e-mail: eugen.manzhos @kinetics.nsc.ru

### ***Nataliya A. Kakutkina***

Institute of Chemical Kinetics & Combustion, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, Dr. of Sci., academic secretary, tel. (383)333-22-96, e-mail: kktk@kinetics.nsc.ru

### ***Alexei A. Korzhavin***

Institute of Chemical Kinetics & Combustion, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Institutskaya, Dr. of Sci., head of laboratory of gas combustion chemistry and physics, tel. (383)333-22-96, e-mail: korzh@kinetics.nsc.ru

### ***Alexandr V. V'yun***

Siberian State Geodesic Academy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo, Ph. D., docent of Special devices and technologies, tel. (383)361-07-31

An experimental investigation was carried out for ignition of filtration combustion waves in a porous medium by gas flame stabilized on the surface of the porous medium. It was shown the presence of the upper and lower limit of ignition against the gas velocity for a specific gas mixture and a porous medium. It is established accordance of the theoretical model to the processes of ignition and combustion of gas in a porous medium.

**Key word:** filtration combustion, gas combustion, ignition.

Фильтрационное горение газов (ФГГ) - горение газа, движущегося в химически инертной пористой среде, обладающее целым рядом полезных с точки зрения практики свойств. Тепло, накапливаемое пористой средой и его участие в процессе горения, позволяет сжигать низкокалорийные газовые смеси [1], которые не горят в обычных условиях. Тепловая инерционность пористой среды обуславливает устойчивость горения, а зависимость характеристик горения от параметров пористой среды и скорости течения газа предоставляет широкие возможности для управления процессом горения.

Отмеченные свойства вызывают необходимость практических разработок устройств на основе ФГГ. Горелочные устройства на основе ФГГ могут быть выполнены в варианте стабилизированной зоны горения [2, 3] или в варианте бегущей волны [4]. Стабилизация зоны горения может быть достигнута при использовании сферических или цилиндрических волн горения, обладающих свойством автостабилизации [5-7]. Дополнительно может быть предложен способ стабилизации, заключающийся в использовании нескольких слоев пористых сред с различными физико-химическими свойствами [2]. Реализация этого способа требует исследования поведения волн ФГГ в слоистых системах. Исследование фильтрационного горения интересно с точки зрения инициирования волн ФГГ и наряду с работами [8-9], описывающими процессы горения и принципы проектирования, играет роль при конструировании огнепреградителей.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование зажигания волн ФГГ и сопоставление данных эксперимента с теоретическими зависимостями, представленными в работе [10]. В этой работе было проведено математическое моделирование зажигания волн ФГГ в пористой среде пламенем, стабилизированным на ее поверхности. Установлено наличие нижнего и верхнего пределов зажигания в зависимости от скорости фильтрации газа. Получены зависимости времени зажигания от параметров пористой среды и дана их интерпретация.

## Эксперимент

Опыты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Установка для исследования ФГГ состоит из горелки и системы регистрации характеристик волны горения. Горелка представляет собой вертикальную кварцевую трубу длиной 500 мм с толщиной стенки 2 мм и внешним диаметром 50 мм. Труба заполнялась пористой средой – зернистым электрокорундом. Использовалась засыпка с размером зерен 4 – 5 мм, теплофизические характеристики которой приведены в табл. 1.

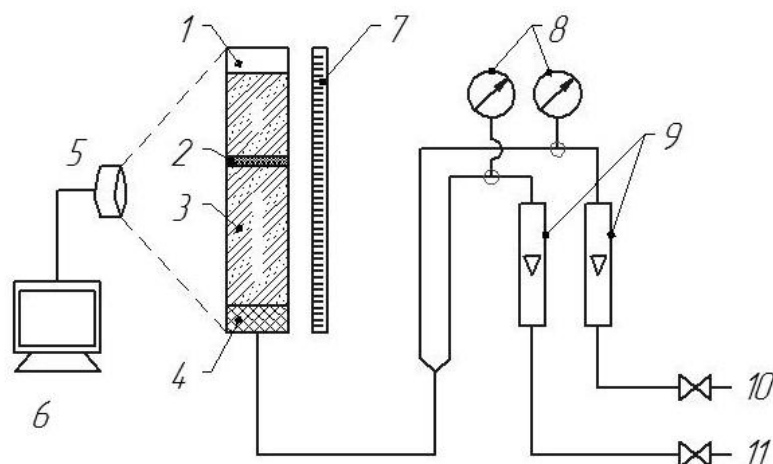


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – кварцевая труба; 2 – зона горения; 3 – пористая среда; 4 – огнепреградитель;  
 5 – web-камера; 6 – компьютер; 7 – линейка; 8 – манометры; 9 – расходомеры;  
 10, 11 – вход горючего газа и воздуха

Таблица 1

Теплофизические свойства пористой среды

Свойства	Пористая среда (электрокорунд)
Плотность гранул, кг/м <sup>3</sup>	3500
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	795 [11]
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2,1 [11]
Средний размер зерна, мм	4 – 5
Пористость	0,43

Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Расходы измерялись образцовыми ротаметрами. Газ с воздухом смешивался до входа в горелку в месте соединения подводов газа и воздуха и подавался в трубу снизу. Линейная скорость подачи газовой смеси определялась с учетом пористости инертной среды. Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой среды, формируя волну горения. Визуально волна горения наблюдалась как плоская, ярко светящаяся зона, перемещающаяся по пористой среде.

Распространение волны горения регистрировали с помощью цифровой Web-камеры, соединенной с компьютером. Горелка с распространяющейся в ней волной горения автоматически фотографировалась через равные промежутки времени (60 с) с сохранением изображений в памяти компьютера. Полученные снимки обрабатывались в прикладной программе, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась масштабная линейка. В ре-

зультате обработки получались зависимости координаты фронта волны горения от времени.

В качестве горючего газа использовался природный газ, содержащий 96% метана, 1,5% этана, 0,7% пропана, 0,3% бутана, 0,04% углекислого газа и 1,0% азота. Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Выдерживались стехиометрические смеси горючего газа и воздуха, наиболее близкие к данным расчетов [10].

### Результаты экспериментов

Исходной информацией для экспериментального исследования являлась зависимость времени зажигания волны ФГГ от линейной скорости подачи газовой смеси, показанная на рис. 2. Данная зависимость была получена в результате численного моделирования системы уравнений, указанных в работах [1] и [10]. Расчеты проводились для адиабатического случая горения газа, то есть без учета теплообмена с окружающей средой.

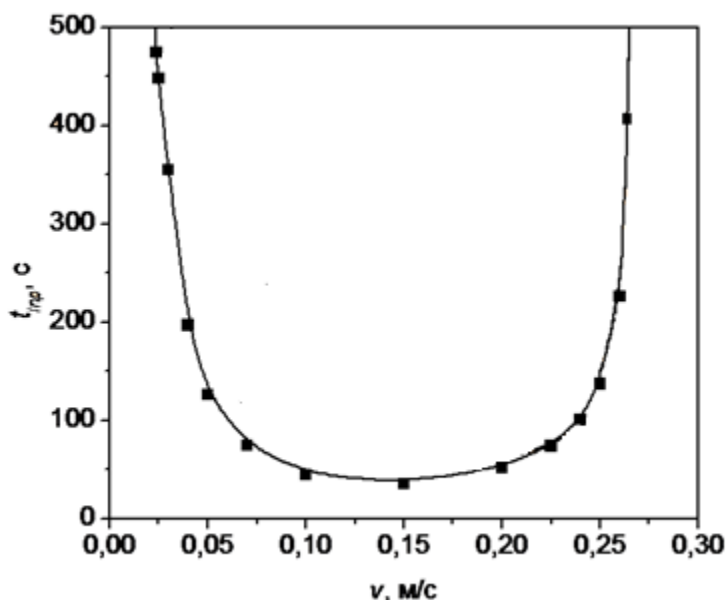


Рис. 2. Зависимость времени зажигания волны ФГГ ( $t_{ign}$ ) от скорости подачи газовой смеси ( $v$ , м/с). Адиабатический случай. Диаметр зерна 4,7 мм

Пример определения характеристик процесса горения во время проведения практического эксперимента показан на рис. 3. Как видно при анализе данных существует излом зависимости координаты фронта пламени от времени горения. Данные эксперимента были аппроксимированы прямыми, полученными интерполяцией по методу наименьших квадратов.

Было принято считать временем входа фронта пламени в пористую среду время, откладываемое до пересечения прямых, а скоростью – наклон второй прямой. Таким образом, на графике точками в виде треугольников показаны



координаты фронта пламени при входе в пористую среду и формирование волны горения ФГГ, круглыми точками – координаты фронта пламени в сформированной волне горения.

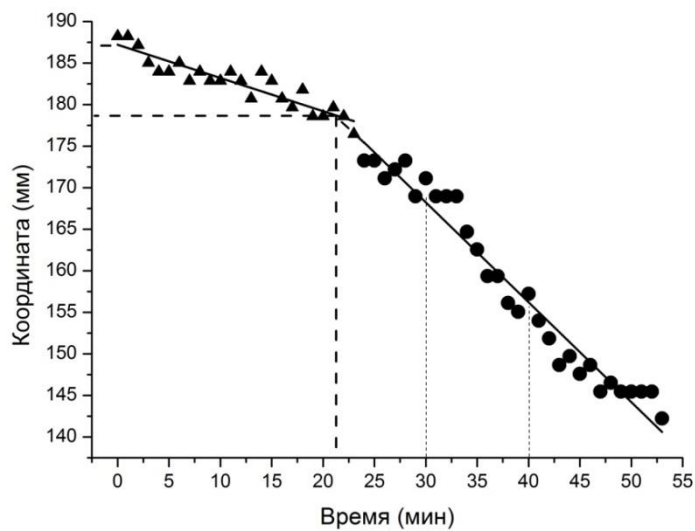


Рис. 3. Пример определения характеристик процесса горения.  
 Время зажигания – 21 мин; скорость волны горения –  $(168,2-156,2)/(40-30)=1,2$  мм/мин; скорость подачи смеси – 0,41 м/с

После обработки данных экспериментов, согласно приведенному выше примеру и обработки результатов были получены зависимости, показанные на рис. 4.

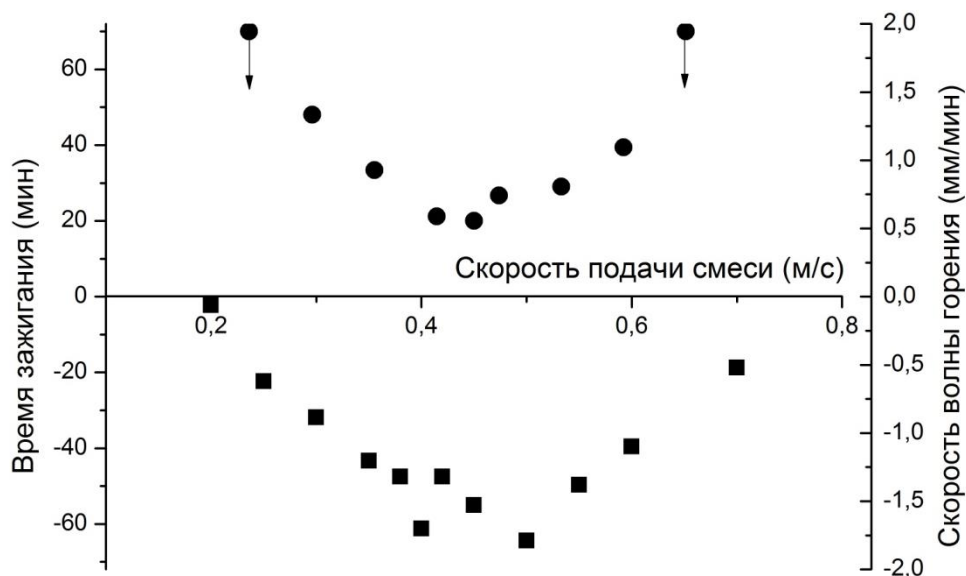


Рис. 4. Зависимости времени зажигания и скорости волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси.

• - время зажигания смеси (мин); ■ – скорость волны ФГГ (мм/мин)

Точками со стрелками показаны значения времени зажигания, которые не удалось установить точно, поскольку входа волны горения в пористую среду не произошло и эксперимент по прошествии 70 минут был остановлен. Данные значения в этих экспериментах могут быть интерпретированы как пределы зажигания волны горения по скорости газа для данного состава смеси и размера зерен пористой среды.

Как видим, экспериментально подтверждаются сопоставимые с теоретическими пределы распространения волн ФГГ в зависимости от скорости подачи газовой смеси - верхний и нижний по скорости подачи газовой смеси.

Зависимости времени входа пламени от расхода газовой смеси, а, следовательно, и скорости подачи газовой смеси имеют U-образную форму, что соответствует расчетным данным, но поскольку расчеты выполнены для случая адиабатического горения, наблюдается расхождение результатов по скоростям подачи газовой смеси и времени зажигания волны ФГГ. В связи с зависимостями процессов зажигания и распространения волн ФГГ от многих параметров для уточнения теоретической модели необходимы дальнейшие эксперименты.

### **Выводы**

1. Проведено экспериментальное исследование зажигания волн.
2. Экспериментально показано наличие верхнего и нижнего пределов зажигания по скорости газа для конкретной газовой смеси и пористой среды.
3. Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. Фильтрационное горение газа // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах // под ред. Ю. Ш. Матрос. – Новосибирск: Наука, 1988.
2. Takeno T., Sato K. A theoretical and experimental study of an excess enthalpy flame // Combustion in Reactive Systems. Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 76. 1981.
3. Какуткина Н. А., Боровых И. В., Бабкин В. С. Способ сжигания газовых и паровых смесей: Пат. 2100695, 1997.
4. Hoffman J. G., Echigo R., Yoshida H., Tada S. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system // Combust. Flame. 1997, V. 111. P. 32-46.
5. Какуткина Н. А., Бабкин В. С. Закономерности распространения сферических волн фильтрационного горения газа в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35, № 1. – С. 60–66.
6. Какуткина Н. А., Бабкин В. С. Характеристики стационарных сферических волн горения газа в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 2. – С. 9–19.
7. Futko S. I., Dobrego K. V., Zhdanok S. A. Flame localization inside axis-symmetric cylindrical and spherical porous media burners // Heat and Mass Transfer. – 1998. – V. 41, № 22. – P. 3647–3655.

8. Какуткина Н. А., Коржавин А. А., Намятов И. Г., Рычков А. Д. Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 23–38.
9. Стрижевский И. И., Заказнов В. Ф. Промышленные огнепреградители. – М.: Химия, 1974.
10. Инициирование горения газа в пористой среде внешним источником / Н. А. Какуткина и др. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 2. – С. 189–196.
11. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959.

© *Е. В. Манжос, Н. А. Какуткина, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн, 2014*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СНАРЯДОВ, СТАБИЛИЗИРУЕМЫХ ВРАЩЕНИЕМ**

***Игорь Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Олег Владиленович Минин***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы перспектив развития кумулятивных снарядов стабилизированных вращением.

**Ключевые слова:** кумулятивный заряд, кумулятивная струя.

## **PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF CUMULATIVE SHELLS STABILIZED BY ROTATION**

***Igor V. Minin***

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Russia, Plakhotny St., 10, Dr. Sci. Tech., professor of «Metrology and Technology of Optical Production» chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

***Oleg V. Minin***

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotny St., 10, Dr.Sci.Tech., professor of «Metrology and Technology of Optical Production» chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

In article questions of prospects of development of cumulative shells stabilized are considered by rotation.

**Key words:** a cumulative charge, a cumulative jet.

В области кумулятивных боеприпасов хорошо известны следующие два факта: практически все кумулятивные заряды при боевом применении в составе кумулятивных боеприпасов вращаются. В зависимости от конкретного боеприпаса частота траекторного вращения имеет порядок 10-1000 об/с. Верхняя граница это малокалиберные снаряды. Нижняя граница – это боеприпасы стабилизированные оперением; вращение кумулятивного боеприпаса – это сильный фактор влияющий на его пробивное действие, которое может снижаться в разы [1]. Проблема «вращения» в кумулятивных зарядах – эффект существенного снижения пробития при вращении заряда в боеприпасах стабилизированных в полете вращением.

Для стабилизации вращением боеприпаса необходима очень высокая скорость вращения, увеличивающаяся с уменьшением диаметра изделия, табл. 1.

Таблица 1

Диаметр заряда, мм	Скорость вращения, об/мин
120	15 000
60	30 000
30	60 000

При таких скоростях вращения формируемая кумулятивная струя разрушается центробежными силами – радиальным разлетом материала струи, начинающегося с определенного момента и приводящий к разуплотнению струи с уменьшением ее пробивной способности.

На сегодняшний день величина пробития для изделий стабилизированных вращением в полете не превышает двух-трех их диаметров, что явно недостаточно для их эффективного применения [2-6]. В настоящее время применяются нарезные орудия в малокалиберных автоматических пушках калибра 30 мм и гранатометам калибра 30 мм и 40 мм [7-9]. За все время исследований на вооружение в США было принято пять кумулятивных боеприпасов с облицовками обеспечивающими спин компенсацию. В Советском Союзе и в Российской Федерации подобных боеприпасов на вооружение не принималось, но необходимость разработки и применения таких боеприпасов очевидна [3, 5-6].

Пробивное действие кумулятивных зарядов в условиях вращательной динамики сильно зависит от свойств материала облицовки, характеризуемых значением критической скорости струи:

$$\Delta V_{кр} = 0.65(Y_0/\rho)^{0.5},$$

где  $Y_0$  – динамический предел текучести,  $\rho$  – плотность [2]. Чем больше динамическая прочность, тем выше противодействие центробежному разрушению струи, но меньше коэффициент предельного растяжения кумулятивной струи.

Экспериментально это утверждение, о роли прочности кумулятивной струи, было представлено М. Хельдом в работе [10].

Действительно, исследование величины пробития вращающихся зарядов, в зависимости от их угловой скорости, проведенные различными авторами, показали, что при малых оборотах вращение не влияет, или мало влияет на величину пробития мишени, но начиная с некоторых оборотов, оно начинает быстро уменьшаться. Существенное влияние вращения заряда на пробиваемость мишени кумулятивной струи, естественно определяется так же максимальным диаметром кумулятивной облицовки. Учитывая, что в кумулятивную струю уходит тонкий внутренний слой материала облицовки, уместно учитывать диаметр облицовки через максимальную линейную скорость её внутренней части.

Тогда этот параметр будет характеризовать критическую линейную скорость вращения, выше которой величина пробития мишени будет существенно уменьшаться. Этот параметр зависит от типа материала, его свойств, текстуры, изотропности и анизотропии, но главным параметром все же является максимальная линейная скорость внутренней части облицовки [11]. Эта область малого влияния вращения на пробивание преграды, существует при линейной скорости не более 15 – 17 м/с (определенной экспериментальным путем), для наиболее применяемых в кумуляции материалов, таких, как хорошо очищенной меди и рафинированного очищенного железа [12]. Для других материалов её придется устанавливать экспериментальным путем. Для практической деятельности такая скорость очень мала. Например, для стабилизации в полете изделия диаметром 60 мм требуется угловая скорость порядка 30000 об/мин или 500 об/с. Это даст линейную скорость более 94 м/с, что в 6 раз превышает допустимую линейную скорость.

Таким образом, для борьбы с вращением классических кумулятивных зарядов есть два пути: снижение центробежных сил связанных с вращением и применением для облицовок обычных кумулятивных материалов, и увеличение прочности материала облицовки.

Необходимую линейную скорость без уменьшения эффективности пробивания преграды классическим кумулятивных зарядов, можно осуществить только зарядом с внутренним диаметром облицовки всего 10 мм. Но такая облицовка не может решить поставленную перед ней цель: пробить более 250 мм твердой стали, зарядом диаметром 60 мм.

Используя результаты работы [13], можно создать заряд с дополнительными телами в виде параллельного тандема [13-17], но с удлиненными облицовками, работающими под углами меньшими  $180^0$ , когда заряд работает в области классической кумуляции, формируя тонкую и длинную кумулятивную струю.

Такого типа кумулятивный заряд, взорванный с вращением с угловой скоростью 30000 оборотов в минуту, пробивает твердую стальную преграду на глубину более 4 диаметров его корпуса. Характер пробойны не отличается от пробойны, обычного кумулятивного не вращающегося заряда [11].

Таким образом, можно заключить, что основная причина разрушения кумулятивной струи во вращающихся классических зарядах происходит, за счет разрушения кручением, и разбрасывания разрушенных её частей, центробежными силами. Причем, определяющим параметром является прочность КС, зависящая от её материала и диаметра. Перспективно применение очищенного железа [12], имеющего более высокие прочностные характеристики чем медь и высокую пластичность при растяжении струи.

Как хорошо известно, в классических зарядах с увеличением угла раствора облицовки растет диаметр кумулятивной струи, (но при этом уменьшается её максимальная скорость) и уменьшается масса песта. Увеличение диаметра струи существенно увеличивает прочность струи и она не разрушается при вращении. Увеличение угла раствора облицовки кумулятивного заряда уменьшает влияние вращения на эффективность пробития мишени.

Для эффективного решения проблемы вращения необходимо увеличить массу струи, общую или радиальную прочность, и для повышения пробития мишени увеличить длину её. Это можно реализовать в гиперкумулятивных зарядах [13-17].

На наш взгляд, выбор материалов для широкоугольных облицовок с малой максимальной скоростью сформированной кумулятивной струи и особенно для гиперкумулятивных зарядов, должны иметь несколько иной подход, чем тот, что мы имеем для классических зарядов с металлическими облицовками. В классических облицовках – это должно быть мелкое зерно в облицовке и высокая однородность и пластичность обеспечивающая растяжение струи. Но эти требования формировались для образования тонкой высокоскоростной струи при кумулятивном взрыве. Она образуется из тонкого внутреннего слоя облицовки толщиной в доли миллиметра, сравнимой с величиной кристаллов в материале, и чем меньше величина кристаллов, тем лучше для струеобразования. В процессе струеобразования происходит разворот потока вблизи центра высокого давления и вблизи свободной поверхности. Слои, в которых происходит формирование потока весьма тонкие. Наличие крупных кристаллов различной кристаллографической направленности эквивалентно наличию в потоке больших «бульжников» и увеличению вязкости потока и соответствующей диссипации энергии, что естественно не допустимо.

В гиперкумулятивных зарядах [13-17] нет разворота потока материала. Кумулятивная струя формируется из всего сечения облицовки, центр высокого давления, в силу взаимодействия с формирователем, находится вблизи его, давая пространство для потока вещества, формирующего массивную струю. Это снижает требование к материалу облицовки и дает возможность использования не только чистых мелкокристаллических изотропных веществ, но и сплавы, например, некоторые стали, а так же анизотропные вещества с упорядоченной кристаллической структурой. Для вращающихся зарядов это важно, так как это путь к применению сплавов, в том числе прочных и пластичных сталей.

Особые перспективы лежат в области анизотропных облицовок и особенно сплавов материалов. Предварительные опыты использования анизотропных сплавов, дающие право на проведение исследований в этой области, были проведены на классическом заряде – с анизотропной облицовкой из силумина, сплаве алюминия, имеющем необычайно высокую хрупкость. Он пробил мишень на глубину такую же, как чистый изотропный алюминий.

Создание гиперкумулятивного заряда с дополнительными телами [13-18], позволяет решить задачу увеличения пробития преграды вращающимися зарядами. Максимальную скорость струи такого вида зарядов и дополнительно её прочность при кручении можно существенно увеличить. Увеличение прочности и формирование толстых струй с большими максимальными скоростями применение анизотропных облицовок, позволяет решать «проблему вращения», причем имеется возможность выбирать на какие пробоины нужно проектировать заряд: либо тонкие и длинные, либо заданной длины, но большого диаметра. Приведем пример, кумулятивный заряд с конической облицовкой в калибре

30 мм при скорости вращения около 70 000 об/мин обеспечивал сквозное пробитие преграды, установленной под углом 60 градусов, толщиной 25 мм. При этом диаметр выходного отверстия в преграде составлял около 20 мм. О за преградным действием такого заряда можно судить по следующим данным: поле осколков на расстоянии около 600 мм за преградой располагалось в окружности диаметром около 200 мм, а фанерный лист, установленный за преградой на расстоянии 1 метр загорался [4].

**Заключение.** В работе рассмотрены и предложены основные пути повышения эффективности кумулятивных боеприпасов стабилизируемых вращением.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 656 с.
2. Рассоха С. С., Бабкин А. В., Ладов С. В., Одинцов В. А. Об использовании рифленых облицовок в кумулятивных снарядах к 30-мм нарезному оружию // Инженерный журнал: Наука и Инновации, 2013. – № 14. – С. 96–107.
3. Бабкин А. В., Рассоха С. С., Ладов С. В., Одинцов В. А. Рифленые кумулятивные облицовки и спин-компенсация // Вопросы оборонной техники, 2013. – № 3. – С. 3–15, 2013. – № 4. – С. 39–44.
4. Минин И. В., Минин О. В. Физические аспекты кумулятивных и осколочных боевых частей. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 84 с.
5. Минин И. В., Минин О. В. Кумулятивные заряды: монография. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 200 с.
6. Минин И. В., Минин О. В. Кумулятивные заряды. Palmarium Academic Publishing, 2013.
7. Оружие России. Каталог. Т. 7. Высокоточное оружие и боеприпасы. – М.: Изд-во «Военный парад», 1997. – 726 с.
8. Боеприпасы и средства поражения. Энциклопедия XXI век. Оружие России. Т. 12. – М.: издательский дом «Оружие и технологии», 2006.
9. Новейшая энциклопедия вооружения / Под ред. Р. Возняка // Пер. с пол. – в 2 т. – Минск: ООО «Попурри», 2004.
10. Held M. Spinning jets from shaped charges with flow turned liners /M. Held/ - Proc. of the 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics, San Antonio, Texas. – 1990. - v.3. - pp. 1-7.
11. Патент РФ 2491497, Способ и устройство формирования кумулятивных струй с устранением эффекта вращения кумулятивных зарядов / Минин В.Ф., Минин И.В., Минин О.В.
12. Патент РФ 2489671, Материал облицовки кумулятивного заряда на основе металла / Минин В. Ф., Минин И. В., Минин О. В.
13. Патент РФ 2412338, Способ и устройство (варианты) формирования высокоскоростных кумулятивных струй для перфорации скважин с глубокими незапестованными каналами и с большим диаметром / Минин В. Ф., Минин И. В., Минин О. В.
14. Минин В.Ф., Минин И.В., Минин О.В. Физика гиперкумуляции и комбинированных кумулятивных зарядов. – Новосибирск: ООО «Новополиграфцентр», 2013. – 272 с. ISBN 978-5-906610-010-0
15. Computational fluid dynamics. Technologies and applications / Ed. By Igor V. Minin and Oleg V. Minin. Croatia: INTECH- 2011. – 396 p. V. F. Minin, I.V. Minin, O.V. Minin Calculation experiment technology, pp. 3- 28.



16. Минин В. Ф. Физика гиперкумуляции и комбинированных кумулятивных зарядов / В. Ф. Минин, И. В. Минин, О. В. Минин // Газовая и волновая динамика - 2013. - Выпуск 5 - с. 281-316.

17. Minin V.F. Physics Hypercumulation and Combined Shaped Charges / V. F. Minin, O. V. Minin, I. V. Minin // 11<sup>th</sup> Int. Conf. on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 30057 Proc. 2<sup>nd</sup> – 4<sup>th</sup> October - 2012 - v.1, NSTU, Novosibirsk – 2012 - p. 32-54. IEEE Catalog Number: CFP12471-PRT ISBN: 978-1-4673-2839-5

18. Minin V. F. Physics of Hypercumulation: Review. / V.F. Minin, O.V. Minin, I.V. Minin // Proceedings of 2013 Int. forum on special equipments and engineering mechanics (IFSEEM) – Jule 10-12, 2013, Nanjing, China. ISBN: 978-1-933100-44-9.

© *И. В. Минин, О. В. Минин, 2014*

## РАСЧЕТ СМЕСЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

### *Николай Николаевич Бардачевский*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат географических наук, доцент кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383) 344-40-58, e-mail: Bardachevskiy@ngs.ru  
НВВКУ, 630117, Россия, Новосибирск, ул. Иванова 49, доцент кафедры, тел. (383)332-50-45

### *Евгений Владимирович Проскуряков*

НВВКУ, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова 49, кандидат технических наук, профессор кафедры, тел. (383)332-50-45, e-mail:saper67@mail.ru

### *Игорь Александрович Апарин*

НВВКУ, 630117, Новосибирск, ул. Иванова 49, курсант, тел. (383) 332-50-45.

В данной работе представлен инженерный расчет состава и энергии взрыва смесевых взрывчатых веществ (ВВ): метан-воздух и пропан-воздух. Расчетная энергия взрыва смеси сравнивается с энергией взрыва тротила и определяет тротиловый эквивалент взрыва.

**Ключевые слова:** взрывчатые вещества, тротиловый эквивалент, воздух, метан, пропан.

## CALCULATION OF MIXED EXPLOSIVES

### *Nikolai N. Bardachevsky*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, Candidate of geographical sciences, an assistant professor of special devices and technologies, tel. (383)344-40-58, e-mail: Bardachevskiy@ngs.ru  
NVVKU, 630117, Russia, Novosibirsk, ul. 49 Ivanova, Associate Professor, tel. (383)332-50-45

### *Evgeny V. Proskuriakov*

NVVKU, 630117, Novosibirsk, ul. 49 Ivanov, Ph.D., associate professor, tel. (383)332-50-45, e-mail: saper67@mail.ru

### *Igor A. Aparin*

NVVKU, 630117, Novosibirsk, ul. Ivanov, 49, student, tel. (383)332-50-45

This paper presents an engineering calculation of the explosion energy and mixed explosives (HE) methane-air and propane-air. Estimated energy explosion of a mixture compared to the energy of the explosion of TNT and TNT equivalent defines explosion.

**Key words:** explosives, TNT equivalent, air, methane, propane.

Для газовых смесей тротиловый эквивалент взрыва является условным: выполняется энергетическое подобие взрыва, но нет подобия по амплитуде давления на фронте ударной волны. Взрыв газовых облаков топливно-воздушной смеси используется в специальных фугасных боеприпасах (боеприпасах объемного взрыва).

## 1. Смесь метан-воздух

Постановка задачи: рассмотреть взрыв метана в замкнутом помещении размером  $3 \times 4 \times 3$  м. Определить количество метана для взаимодействия с кислородом воздуха. Определить количество выделившейся энергии и тротильный эквивалент взрыва.

### Справочные данные

Плотность воздуха  $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ; количество кислорода в воздухе 23 %; теплота сгорания горючего (метана)  $q_m = 44 \text{ Мдж/кг}$ ; энергия взрыва тротила  $q_m = 4,5 \text{ Мдж/кг}$ .

### Схема решения задачи

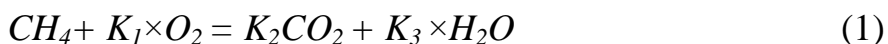
1. Определение количества кислорода в помещении.
2. Определение массового соотношения кислород/метан в реакции окисления.
3. Определение количества метана для реакции окисления.
4. Определение количества энергии, выделяемой метаном при окислении.
5. Определение тротильного эквивалента взрыва, т.е. определение массы тротила, выделяющей рассчитанную в пункте 4 энергию.

### Решение задачи

1.  $V$  – объём помещения;  $V = 3 \times 4 \times 3 = 36 \text{ м}^3$ .

$M_g$  – масса воздуха в помещении;  $M_g = \rho \times V = 1,3 \times 36 = 47 \text{ кг}$ ;  $M_k$  – масса кислорода в помещении;  $M_k = 0,23 \times M_g = 47 \times 0,23 = 11 \text{ кг}$ .

2. Уравнение реакции окисления



где  $K_1, K_2, K_3$ , – неизвестные величины.

Приравниваем количество атомов углерода ( $C$ ), водорода ( $H$ ), кислорода ( $O$ ) в левой и правой части уравнения:

$$\text{Баланс углерода } C: 1 = K_2 \quad (2)$$

$$\text{Баланс водорода } H: 4 = 2 \times K_3; \Rightarrow K_3 = 2 \quad (3)$$

$$\text{Баланс кислорода } O: 2 \times K_1 = 2 \times K_2 + K_3; \Rightarrow K_1 = K_2 + K_3/2 \quad (4)$$

$$\text{Подставим (2) и (3) в (4): } K_1 = 2 \quad (5)$$

Значения  $K_1 = 2, K_2 = 1, K_3 = 2$  подставим в уравнение (1):



Относительные молекулярные массы атомов (см. в таблице Д.И. Менделеева):

$$\mu(H) = 1; \mu(C) = 12; \mu(O) = 16.$$

Относительные массы молекул:

$$\mu(CH_4) = 12 + 4 = 16; \mu(O_2) = 16 \times 2 = 32.$$

Пусть  $K$  – массовое соотношение кислород/метан в реакции окисления. Из уравнения (6) следует:

$$K = \frac{2\mu(O_2)}{\mu(CH_4)} = \frac{2 \times 32}{16} = 4; K = 4.$$

1. Пусть  $M_z$  – масса горючего (метана) для реакции окисления

$$M_z = \frac{M_k}{K} = \frac{11}{4} = 2,8 \text{ кг}; M_z = 2,8 \text{ кг}.$$

2. Пусть  $E$  – количество энергии, выделяемой метаном при окислении

$$E = q_m \times M_z = 44 \text{ Мдж/кг} \times 2,8 \text{ кг} = 123 \text{ Мдж}.$$

3. Пусть  $M_m$  – масса тротила, выделяющая энергию метана  $E = 123 \text{ Мдж}$

$$M_m \times q_m = E; M_m = \frac{E}{q_m} = \frac{123 \text{ Мдж}}{4,5 \text{ Мдж/кг}} = 27,4 \text{ кг}$$

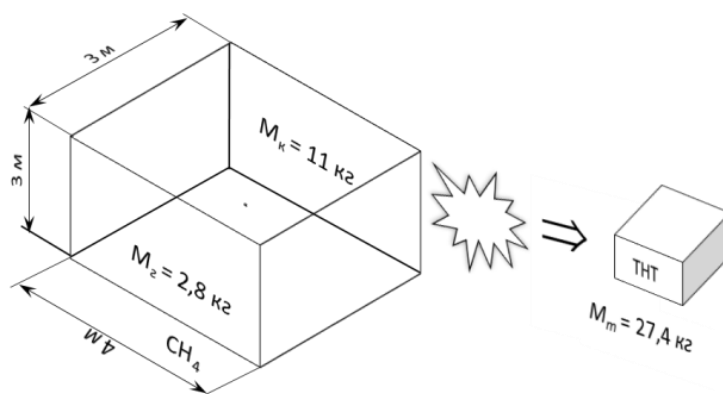


Рис. 1. Смесь метан-воздух:  
к – кислород; z – горючее; m – тротил

Вывод: Для сбалансированного взрыва в заданном помещении необходимо 2,8 кг метана. В этом случае тротиловый эквивалент взрыва (по выделенной энергии) составит 27,4 кг.

На практике возможен неполный взрыв метана из-за расслоения метана и воздуха: более легкий метан будет подниматься вверх. Перемешивание метана с воздухом может осуществляться за счет конвекции при наличии нагревательных приборов и др.

Особенности смешения метана с воздухом

Уравнение идеального газа  $\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{\mu}$ .

Если  $p = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ , то  $\frac{\mu}{\rho} = \text{const}$ .  $\frac{\mu_v}{\rho_v} = \frac{\mu_m}{\rho_m} \Rightarrow \frac{\rho_v}{\rho_m} = \frac{\mu_v}{\mu_m} = \frac{29}{16} > 1$

$\rho_v > \rho_m \Rightarrow$  метан поднимается вверх.

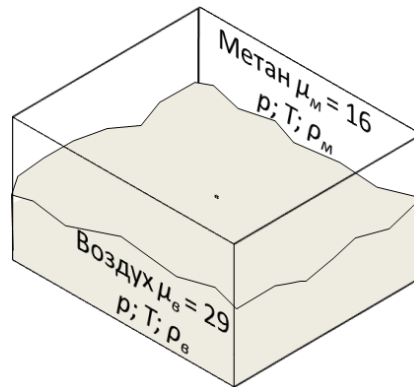


Рис. 2. Особенности смешения метана с воздухом:

*м* – метан; *в* – воздух

## 2. Смесь пропан-воздух

Постановка задачи: рассчитать количество пропана ( $C_3H_8$ ) для детонации в замкнутом помещении размером  $3 \times 4 \times 3$  м. Определить энергию, выделенную при взрыве и тротильный эквивалент взрыва.

Справочные данные

Плотность воздуха  $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ ; количество кислорода в воздухе 23%; теплота сгорания горючего (пропана)  $q_g = 44 \text{ Мдж/кг}$ ; энергия взрыва тротила  $q_m = 4,5 \text{ Мдж/кг}$ .

Схема решения задачи

1. Определение массы воздуха в помещении.
2. Определение количества кислорода в помещении.
3. Определение массового соотношения кислород/пропан при реакции окисления.
4. Определение массы пропана, необходимой для реакции с имеющимся кислородом.
5. Определение энергии, получаемой при окислении пропана.
6. Определение тротильного эквивалента, т.е. определение массы тротила, выделяющей энергию пропана.

Решение задачи

1. Пусть  $V$  – объём помещения;  $V = 3 \times 4 \times 3 = 36 \text{ м}^3$ .

Пусть  $M_v$  – масса воздуха в помещении;  $M_v = \rho \times V = 1,3 \times 36 = 47 \text{ кг}$ .

2. Пусть  $M_k$  – масса кислорода в помещении;  $M_k = 0,23 \times M_v = 47 \times 0,23 = 11 \text{ кг}$ .

3. Уравнение реакции окисления



Приравниваем количество атомов ( $C, H, O$ ) в левой и правой части уравнения (1):

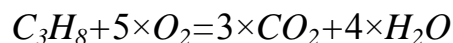
Баланс углерода  $C$ :  $3 = K_2$  (2)

Баланс водорода  $H$ :  $8 = K_3 \times 2$ ;  $K_3 = 4$  (3)

Баланс кислорода  $O$ :  $2 \times K_1 = 2 \times K_2 + K_3$  (4)

Подставим (2) и (3) в (4):  $K_1 = 5$  (5)

Выражения (2), (3), (5) подставим в (1):



Относительные массы атомов приведены в таблице Д.И.Менделеева:

$$\mu(H) = 1; \mu(C) = 12; \mu(O) = 16.$$

Относительные массы молекул:

$$\mu(O_2) = 16 \times 2 = 32; \mu(C_3H_8) = 12 \times 3 + 8 = 44.$$

Массовое соотношение окислитель/горючее при окислении:

$$K = \frac{5\mu(O_2)}{\mu(C_3H_8)} = \frac{160}{44} = 3,6.$$

4. Пусть  $M_z$  – масса горючего (пропана) для реакции с имеющимся кислородом

$$M_z = \frac{M_k}{K} = \frac{11}{3,6} = 3 \text{ кг.}$$

5. Пусть  $E$  – энергия, получаемая при окислении пропана

$$E = M_z q_z = 132 \text{ Мдж.}$$

6. Пусть  $M_m$  – масса тротила, выделяющая заданную энергию  $E$

$$M_m \times q_m = E; M_m = \frac{E}{q_m} = \frac{132}{4,5} = 29 \text{ кг.}$$

Вывод: При взрыве пропана в заданном помещении может выделиться 132 Мдж, что эквивалентно энергии выделяемой 29 кг тротила.

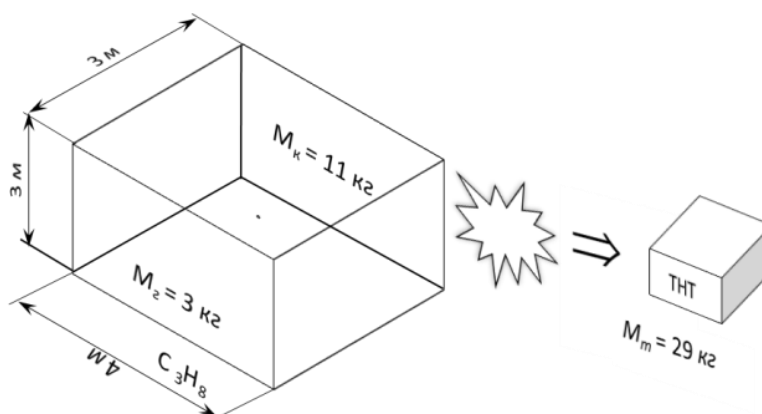


Рис. 3. Смесь пропан-воздух:  
к – кислород; z – горючее; в – воздух

На практике возможно расслоение пропана и воздуха: относительная масса молекулы пропана  $\mu(C_3H_8)=44$  превышает соответствующую величину для воздуха ( $\mu_в=29$ ) и пропан будет находиться в нижней части помещения. Перемешивание пропана с воздухом возможно из-за конвекции при наличии нагревательных приборов и др.

$$\text{Уравнение идеального газа } \frac{\mu}{\rho} = \frac{pT}{P} \Rightarrow \frac{\mu_z}{\rho_z} = \frac{\mu_в}{\rho_в}; \quad \frac{\rho_z}{\rho_в} = \frac{\mu_z}{\mu_в} > 1.$$

$\rho_z > \rho_в \Rightarrow$  пропан размещается в нижней части помещения.

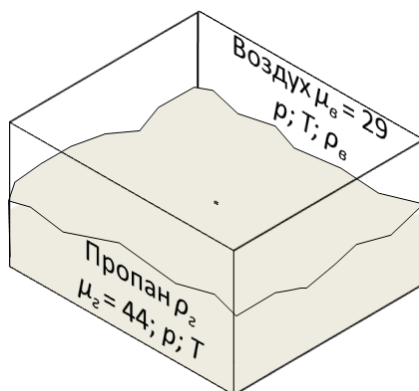


Рис. 4. Особенности смешения пропана с воздухом:  
z – горючее; в – воздух

Проведено информационное исследование в части расчета смесевых взрывчатых веществ. Отработана инженерная методика расчета смесей метан-воздух и пропан-воздух. Определены также энергия взрыва и тротильный эквивалент смесевых ВВ (для газовых смесей тротильный эквивалент носит условный характер).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физика взрыва: [монография : в 2 т.] / [С. Г. Андреев и др.] ; под ред. Л. П. Орленко // Изд. 3-е испр. – М.: Физматлит, 2004 (ППП Тип.Наука).
2. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. – М.: Машиностроение, 1972. – 208 с.
3. Шидловский А. А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
4. Дубнов Л. В. и др. Промышленные ВВ. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
5. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960. – 579 с.
6. Сорокин М. В. Взрывчатые вещества, пороха, пиротехнические составы.: методические рекомендации по химии. – Новосибирск: НВОКУ, 1996. – 48 с.
7. Сорокин М. В. Взрывчатые вещества, пороха, пиротехнические составы // Сборник научных трудов НВОКУ, вып. 5. – Новосибирск: НВОКУ, 1998. – С. 59-64.

© Н. Н. Бардачевский, Е. В. Проскуряков, И. А. Апарин, 2014

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА АВТОГЕНЕРАТОРА СВЧ В ПРОСТРАНСТВЕ S-ПАРАМЕТРОВ**

### ***Сергей Викторович Савелькаев***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

### ***Валерик Сергеевич Айрапетян***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств и технологий, тел. (383)361-04-82

### ***Владимир Анатольевич Литовченко***

НВВКУ, 630117, Россия, г. Новосибирск, ул. Иванова, 49, начальник лаборатории, тел. (383)332-50-45

В статье дано аналитическое определение методики расчета автогенератора СВЧ в пространстве  $S$ -параметров, без обратной связи его активного компонента. На основе условия самовозбуждения активного компонента определены его нагрузочные комплексные коэффициенты отражения и параметры обратной связи, обеспечивающие требуемую частоту генерации автогенератора и его максимальную выходную мощность.

**Ключевые слова:** автогенератор СВЧ,  $S$ -параметры и входные и нагрузочные комплексные коэффициенты отражения активного компонента, условие самовозбуждения, частота генерации, выходная мощность, электрическая схема, топология.

## **CALCULATION AUTOGENERATORS MICROWAVE IN SPACE S-PARAMETERS**

### ***Sergey V. Savelkaev***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Sciences, professor of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: kaf.osnov@ssga.ru

### ***Valerik S. Hayrapetyan***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., head of the Department of Special devices and technology GII, doctor of technical Sciences, tel. (383)361-04-82

### ***Vladimir A. Litovchenko***

NVVKU, 630117, Russia, Novosibirsk, ul. 49 Ivanov, Head of Laboratory, tel. (383)332-50-45

The article provides an analytical determination methods of calculating microwave oscillator in the space parameters, as without feedback, and parallel or sequential current-feedback its active ingredient. On the basis of self-excitation conditions of the active component defines its complex weighting coefficients of reflection and feedback parameters, providing the required oscillation frequency of the oscillator and its maximum power output.



**Key words:** microwave oscillator, and the input parameters and the load of complex reflection coefficients of the active component, self-excitation condition, frequency of generation, power output circuitry topology.

В настоящее время разработаны совершенные методы и прецизионные средства точного и адекватного измерения  $S$ -параметров активных компонентов (АК) усилителей и автогенераторов СВЧ (УСВЧ и АСВЧ) в реальном рабочем режиме эксплуатации их АК [1 - 4]. Точное и адекватное измерение  $S$ -параметров АК совместно с совершенными методиками расчета УСВЧ пространстве  $S$ -параметров повысило эффективность систем автоматизированного проектирования (САПР) этих устройств [5, 6].

Проблема эффективного проектирования АСВЧ до настоящего времени остается актуальной, что вызвано аналитической незавершенностью существующих методик расчета этих устройств в пространстве  $S$ -параметров. Так, например, в работах [7, 8] предложен общий подход к анализу условия самовозбуждения АК АСВЧ, на основе которого решена задача расчета нагрузочных комплексных коэффициентов отражения (ККО) АК без его обратной связи, включая расчет выходной мощности АСВЧ в целом по ее максимуму. Тем не менее, расчет АСВЧ с обратной связью АК до настоящего времени аналитически не завершен.

В статье дано аналитическое определение методики расчета АСВЧ в пространстве  $S$ -параметров без обратной связи АК. Приведен пример практической реализации АСВЧ, рассчитанного на основе рассмотренной методики.

Исходными данными для математического моделирования АСВЧ являются требуемая частота  $f$  генерации, ее относительная нестабильность  $\delta_f$  и требуемая выходная мощность  $P_{\text{вых}}$ , которую обычно задают как  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вых max}}$ .

Выбор АК осуществляется по его максимальной частоте  $f_{\text{max}}$  генерации, максимально допустимой рассеиваемой мощности  $P_{\text{max}}$  и коэффициенту полезного действия (КПД)  $\eta$ , известным из его паспортных данных, так, чтобы выполнялось  $f = f_{\text{max}} / (1,0 - 1,2)$  и  $P_{\text{вых}} = P_{\text{max}} / (1,0 - 1,2)$ . В случае если требуемая относительная нестабильность составляет  $\delta_f = 10^{-3} - 10^{-4}$  проектирование АСВЧ можно осуществить в микрополосковом исполнении без дополнительных мер стабилизации частоты  $f$  его генерации.

Сигнальный граф моделируемого АСВЧ показан на рис. 1.

Методика расчета АСВЧ зависит от коэффициента устойчивости [5, 6, 8, 9]

$$K = \frac{1 + |\Delta_S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 |S_{11} S_{22}|} \quad (1)$$

его АК,  $S$ -параметры которого должны быть измерены в его реальном рабочем режиме эксплуатации [2, 4], где  $\Delta_S = S_{11} S_{22} - S_{12} S_{21}$  - определитель.

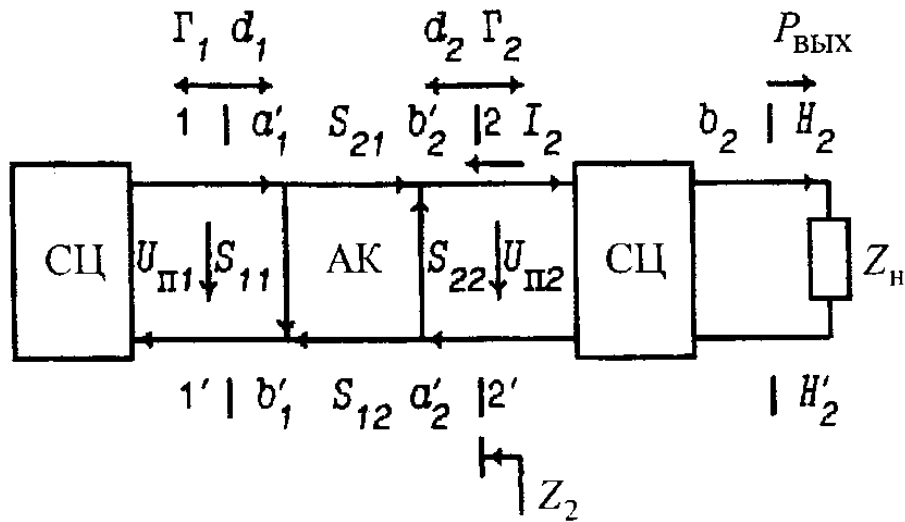


Рис. 1. Сигнальный граф АСВЧ

В случае потенциальной устойчивости  $K < 1$  (1) АК расчет АСВЧ можно осуществить без применения его внешней обратной связи. В этом случае условие самовозбуждения АК можно записать в виде

$$\Gamma_2 d_2 = 1, \quad (2)$$

где  $\Gamma_2$  - ККО в плоскости  $2-2'$  его выхода

$$\Gamma_2 = (S_{22} - \Delta_S d_1) / (1 - S_{11} d_1); \quad (3)$$

$d_j$  - комплексные коэффициенты отражения (ККО) нагрузок АК (нагрузочные ККО) на его входе  $1-1'$  и выходе  $2-2'$ , как показано на рис. 1.

Уравнение (2) совместно с выражением (3) устанавливает взаимосвязь нагрузочных ККО  $d_j$  АК на его входе  $1-1'$  и выходе  $2-2'$  через его  $S$ -параметры и эквивалентно условию баланса амплитуд и фаз, записанному в комплексной форме.

По своему физическому смыслу максимальное значение модуля

$$|\Gamma_2| = |\Gamma_2|_{\max} \quad (4)$$

ККО  $\Gamma_2$  (3) соответствует максимальному значению выходной мощности  $P_{\text{вых max}} = |b_{2\text{max}}|^2 / 2$  АСВЧ в плоскости его выхода  $H_2 - H_2'$ , как показано на рис. 1. Это следует из того, что при

$$|\Gamma_2| \geq 1 \quad (5)$$

значение этого модуля характеризует действие действительного отрицательного сопротивления  $\operatorname{Re} Z_2 = Z_0(1 + |\Gamma_2|) / (1 - |\Gamma_2|)$  в плоскости  $2-2'$  выхода АК, где  $Z_0$  - волновое сопротивление калибровочных мер измерительного средства, посредством которого измеряются  $S$ -параметры АК.

Согласно (2) условием согласования сопротивления  $Z_2$  с сопротивлением  $Z_H$  нагрузки является равенство

$$d_2 = \Gamma_2^{-1}. \quad (6)$$

Для расчета нагрузочного ККО  $d_1$  представим выражение (3) в виде дробно-линейного конформного преобразования

$$\Gamma_2^{-1} = \frac{ad_1 + b}{cd_1 + d}, \quad (7)$$

отображающего значения нагрузочного ККО  $d_1$  из его комплексной плоскости на комплексную плоскость ККО  $\Gamma_2^{-1}$ . Параметры  $a = -S_{11}$ ,  $b = 1$ ,  $c = -\Delta_S$  и  $d = S_{22}$  этого дробно-линейного преобразования позволяют определить центр

$$r_2 = (b^* d - a^* c |d_1|^2) / (|d|^2 - |c|^2 |d_1|^2) = (S_{22}^* - \Delta_S^* S_{11} |d_1|^2) / D_2$$

и радиус  
(8)

$$R_2 = |ad - bc| |d_1| / \left| |d|^2 - |c|^2 |d_1|^2 \right| = |S_{12} S_{21}| |d_1| / |D_2|$$

окружности  $O_2$  отображающей на комплексной плоскости ККО  $\Gamma_2^{-1}$  его значения для фиксированного значения модуля  $|d_1|$  нагрузочного ККО  $d_1$  как показано на рис. 2, где  $D_2$  - параметр

$$D_2 = |S_{22}|^2 - |\Delta_S|^2 |d_1|^2. \quad (9)$$

Анализируя условия физической реализуемости АСВЧ, нетрудно показать, что модуль  $|d_1|$  нагрузочного ККО  $d_1$  входящий в (8) и (9), должен быть равен  $|d_1| = 1$ , поскольку какое-либо его другое значение  $|d_1| < 1$  приводит к рассеянию мощности  $P_1^- = |b_1'|^2 / 2$  во входной согласующей цепи (СЦ) и, следовательно, к снижению КПД  $\eta_A$  моделируемого АСВЧ в целом.

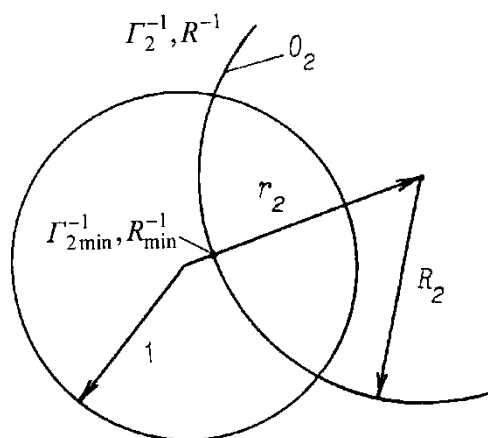


Рис. 2. К определению максимального значения ККО  $\Gamma_{2\max}$  и параметра  $R_{\max}$

Подстановка (10) в (3) позволяет определить значение нагрузочного ККО

$$d_1 = \frac{S_{22} \pm r_2(1 - R_2/|r_2|)}{\Delta_S \pm S_{11}r_2(1 - R_2/|r_2|)}, \quad (11)$$

по его фазе  $\varphi_{d1}$ , для которой значение модуля  $|\Gamma_2|$  ККО  $\Gamma_2$  (3) максимально  $|\Gamma_2| = |\Gamma_2|_{\max}$  (4). Соответствующее ему значение нагрузочного ККО  $d_2$  можно определить из (3) и (6) как  $d_2 = \Gamma_2^{-1}$ .

Для определения выходной мощности  $P_{\text{вых}}$  АСВЧ выразим из его сигнального графа, показанного на рис. 1, внутренний коэффициент усиления и коэффициент обратной связи АК:

$$K_y = b_2' / b_1' = S_{21}\Gamma_1 / (1 - S_{22}d_2); \quad (12)$$

$$K_{\text{ос}} = b_1' / b_2' = S_{12}d_2 / (1 - S_{11}\Gamma_1).$$

Используя выражения (12) классическое условие самовозбуждения АСВЧ, эквивалентное условию (2), можно записать в виде

$$K_y K_{\text{ос}} = 1. \quad (13)$$

Учитывая, что мощности  $P_i$  в плоскостях  $i-i$  входа и выхода АК можно определить как  $P_i = (|a_i'|^2 - |b_i'|^2) / 2$ , запишем:

$$\eta = (P_1 + P_2) / P_{\text{п}}; \quad P_2 = P_1 |K_y|^2 (1 - |K_{\text{ос}}|^2), \quad (14)$$

где  $P_{\Pi} = I_2 U_{\Pi 2}$  - мощность потребляемая АК от источника питания;  $I_2$  и  $U_{\Pi 2}$  - его ток стока и напряжение сток-исток, как показано на рис. 1.

Совместное решение (13) и (14) позволяет определить мощность  $P_2$  в плоскости  $2-2'$  выхода АК в виде

$$P_2 = P_{\Pi} \eta (1 - |K_y|^{-2}) = P_{\Pi} \eta (1 - |K_{oc}|^2). \quad (15)$$

С учетом (15) выходную мощность моделируемого АГ в плоскости  $H_2 - H_2$  его выхода определим как

$$P_{\text{вых}} = P_2 |S_{21}|^2, \quad (16)$$

где  $|S_{21}|^2$  - коэффициент передачи выходной согласующей цепи (СЦ).

Пренебрегая малыми потерями в выходной СЦ с учетом того, что для такого случая  $|S_{21}|^2 = 1 - |d_2|^2$  из (15) и (16) получим

$$P_{\text{вых}} = P_{\Pi} \eta_A, \quad (17)$$

где  $\eta_A$  - КПД моделируемого АСВЧ в целом:

$$\begin{aligned} \eta_A &= \eta (1 - |K_y|^{-2}) |S_{21}|^2 = \eta (1 - |K_y|^{-2}) (1 - |d_2|^2) = \eta (1 - |K_{oc}|^2) |S_{21}|^2 = \\ &= \eta (1 - |K_{oc}|^2) (1 - |d_2|^2). \end{aligned}$$

Центры  $r_{p2}$  и радиусы  $R_{p2}$  окружностей  $O_p$  постоянной выходной мощности  $P_{\text{вых}} = \text{const}$  АСВЧ на комплексной плоскости нагрузочного ККО  $d_2$  можно определить посредством сведения выражений (12), (13) и (15) к уравнению вида

$$(\text{Re} d_2 - \text{Re} r_{p2}) + (\text{Im} d_2 - \text{Im} r_{p2})^2 = R_{p2}^2, \quad (18)$$

где

$$r_{p2} = S_{11} / \Delta_S,$$

$$R_{p2} = \left[ \left[ |S_{11}|^2 |S_{21}|^2 (|\Delta_S|^2 - 1) (P_{\Pi} \eta - P_2) - |\Delta_S|^2 P_{\Pi} P_2 \right] / |\Delta_S|^2 |S_{21}| (P_{\Pi} \eta - P_2) \right]^{1/2}.$$

Из выше рассмотренного получены практические результаты. Для примера на рис. 3, а показана электрическая схема АСВЧ с последовательной обратной связью, рассчитанного по рассмотренной методике. Он выполнен в микрополосковом исполнении на поликоровой плате размером  $24 \times 30 \times 1$  мм, топология которой показана на рис. 3, б.

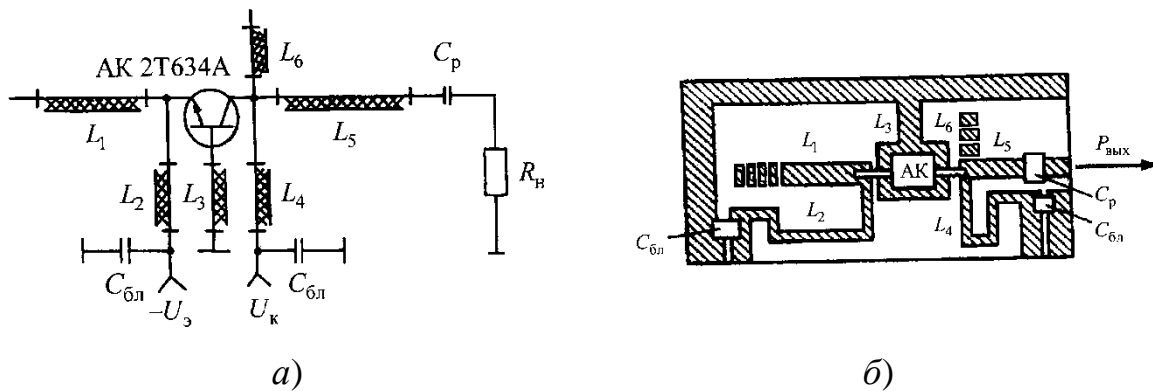


Рис. 5. Электрическая схема и топология АСВЧ:  
 а) - электрическая схема; б) - топология

Относительные электрические длины  $L_i = \lambda / l_i$  и волновое сопротивление  $Z_i$ , Ом шлейфов топологии составляют  $(L_i; Z_i) = (0,1 - 0,25; 50)$ ,  $(0,25; 100)$ ,  $(0,07; 50)$ ,  $(0,25; 100)$ ,  $(0,1; 50)$ ,  $(0 - 0,1; 50)$ , где  $\lambda$  - длина волны в полукоре. Разброс электрических параметров АК можно компенсировать изменением длины шлейфа  $L_1$ , что обеспечивает перестройку резонансной частоты  $f$  на  $\pm 10\%$  и длины шлейфа  $L_6$ , что обеспечивает подстройку выходной мощности  $P_{\text{ВЫХ}}$  на  $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ max}}$ . В качестве АК был использован биполярный транзистор 2Т634А-2. Блокировочные и разделительный конденсаторы  $C_{\text{бл}}, C_p$  марки К10-9 с номиналом 3300 и 1300 Пф соответственно.

Основные электрические характеристики АСВЧ приведены ниже.

Частота генерации $f$ , ГГц	1,4
Относительная нестабильность $\delta_f$ , % при $t = \pm 50$	$10^{-3} \text{ } ^\circ$
Выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ , мВт	40
Напряжение эмиттера $U_э$ , В	-1,7
Напряжение коллектора $U_к$ , В	16

Таким образом, рассмотрена аналитически завершенная методика расчета АСВЧ, обеспечивающая расчет нагрузочных ККО  $d_j$  (3), (6) и (11) его АК при его потенциальной устойчивости  $K < 1$  (1) без обратной связи. Рассчитанные ККО  $d_j$  обеспечивают требуемую частоту генерации и максимум выходной мощности  $P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВЫХ max}}$  (17) АСВЧ в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С. В. Теоретические основы построения двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей // Измерительная техника. – 2005. – № 3. – С. 41–46.
2. Савелькаев С. В. Методы анализа устойчивости активных СВЧ-цепей и измерения их S-параметров // Метрология. – 2005. – № 4. – С. 19–28.

3. Савелькаев С. В. Коаксиальное контактное устройство // Измерительная техника. – 2005. – № 5. – С. 65–68.
4. Савелькаев С. В., Устюгов М. Б. К вопросу повышения эффективности систем автоматизированного проектирования усилительных и автогенераторных СВЧ-устройств // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 128–130.
5. Френер В. Х. Быстрый расчет усилителей с использованием параметров рассеяния // В кн.: Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. – М.: Радио и связь. – 1982. – №22. – С. 37 – 49.
6. Полупроводниковые входные устройства СВЧ. Под редакцией В. С. Эткина. – М.: Сов. радио, 1975, Т. 1, 344 с.
7. Петров Г. В., Толстой А. И. и др. Автогенераторы СВЧ-диапазона на полевых транзисторах с затвором Шоттки // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 7. – С. 38–55.
8. Торопов Е. Б. Расчет транзисторного СВЧ-автогенератора с применением параметров рассеяния//В кн.: Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. – М.: Радио и связь. – 1982. – № 22. – С. 37–49.
9. Kurokawa K. Power waves and scattering matrix // IEEE Trans. – 1965. – 1965. Vol. MTT-13, №2. – P. 194–202.

© С. В. Савелькаев, В. С. Айрапетян, В. А. Литовченко, 2014

## ПОДВОДНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПАНЕЛИ ВМФ

*Олег Владимирович Матыцин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31

Формирование навыков подводного ориентирования является важным вопросом при подготовке водолазов. Поэтому он и является основным и сложным в курсе водолазной подготовки. Его освоение помогает, как минимум, определить свое местоположение при нахождении под водой.

**Ключевые слова:** ориентирование, маршрут движения, навигационные приборы, навигационные панели.

## NAVY SUBMARINE NAVIGATIONAL BARS

*Oleg V. Matytsin*

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31

The skills of underwater orienteering is an important issue in the training of divers. Therefore it is a major and complex in the course of diving training. Mastering it helps, at least, to find your location when placed under water.

**Key words:** orienteering, driving directions, navigation devices, navigation panel.

Наиболее скрытным путем вывода является морской. Он обеспечивает доставку легководолазов непосредственно к объектам противника, которые расположены вблизи рек и морей. Так с использованием данного пути вывода войск перед военнослужащими стала актуальной проблема ориентирования под водой.

Главная цель подводного ориентирования военных водолазов – прохождение под водой определенного маршрута, скрытное передвижение группы, максимальная точность нахождения объекта за минимальное время, используя при этом подводное снаряжение.

Формирование навыков подводного ориентирования является важным вопросом при подготовке водолазов. Поэтому он и является основным и сложным в курсе водолажной подготовки. Его освоение помогает, как минимум, определить свое местоположение при нахождении под водой, как максимум – построить маршрут движения, сориентироваться в поиске объектов, расположенных как на суше, так и под водой.

В соответствии с программой обучения водолазной подготовке курсанты должны отрабатывать навыки ориентирования под водой с использованием навигационной аппаратуры. Наиболее эффективными приборами для подводного ориентирования являются подводные навигационные панели. Ввиду сла-



бого развития водолазной промышленности в России, таких приборов мало и они более громоздкие по сравнению с иностранными экземплярами. В мире имеются множество подобных приборов, но данные образцы обладают высокой себестоимостью, а также производятся в ограниченном количестве.

Учитывая эти факторы, целью необходимо провести анализ имеемых навигационных приборов и определить возможность изготовления подобных приборов в условиях подразделения из имеемых в продаже материалов и узлов.

### **Навигационные приборы, имеющиеся в подразделениях ВМФ России**

Подводная навигационная панель (ПНП) Cobra предназначена для автономной навигации, точного позиционирования и перемещения по заданному маршруту водолаза или аквалангиста.

Панель может использоваться как в морских, так и во внутренних водах.

ПНП Cobra представляет собой переносное автономное устройство, определяющее текущее местоположение водолаза по известным координатам точки погружения и определяемым значениям курса, скорости и глубины нахождения водолаза.

Координаты исходной точки погружения вводятся в панель либо вручную, либо автоматически при подключении приёмника GPS. Остальные необходимые данные получаются с помощью встроенных в ПНП датчиков.

Для обеспечения точного позиционирования и навигации под водой устройство оборудована акустическим (доплеровским) датчиком скорости, датчиком глубины, альтиметром, встроенным компасом, датчиком температуры. Для подсчёта координат водолаза в реальном масштабе времени в панель встроен микрокомпьютер с высоким быстродействием. Питание панели осуществляется от аккумуляторов с большой длительностью непрерывной работы, что позволяет использовать её в течение нескольких погружений без дополнительной подзарядки. Устройство снабжено двумя ручками для переноски.

Управление ПНП осуществляется с помощью четырёх кнопок, расположенных на передней панели устройства. Размеры и расположение кнопок подобраны специально для удобной работы с панелью в водолазных рукавицах. Вся необходимая информация отображается на высококонтрастном жидкокристаллическом дисплее.



## Основные технические характеристики ПНП COBRA

Максимальное кол-во заложенных маршрутов	9
Максимальное кол-во маршрутных точек в каждом маршруте	20
Точность определения пройденного расстояния	менее 3%
Точность показания компаса	2
Точность определения скорости	0,2%
Точность определения температуры	0,4°С
Максимальная глубина использования	90 метров
Максимальное время работы без подзарядки аккумуляторов	7 часов
Диапазон рабочих температур	от -5 до +45°С
Габаритные размеры вместе с ручками для переноски	
Ширина	370 мм
Высота	310 мм
Глубина	330 мм
Вес на воздухе/в воде	12,7кг/-1кг

### Недостатки данной панели:

Основным недостатком данной панели является то, что навигация данной системы полностью зависит от сигнала GPS, а в ходе боевых действий вывода из строя спутников, в результате чего ПНП COBRA станет не эффективной. Также данная панель сделана из мало-прочного материала.

### Навигационные приборы иностранных армий. ТАС – 100



Подводная навигационная панель ТАС-100 АМ – оригинальная панель для подводных погружений, используемая многими водолазами по всему миру. Панель объединяет глубиномер, водолазный хронометр и подводный компас в жёсткой, лёгкой и ударопрочной пластиковой панели с удобными, легкозажимаемыми ручками.

В подводной навигационной панели ТАС-100 АМ заложен принцип навигации, основанный на принципе потраченного времени на участке пути. Ключевым начальным значением при навигации является скорость перемещения под водой. К примеру, если за 20 сек. вы преодолеваете 30 футов (10 м), то можно подсчитать пройденный путь, измерив время движения и ориентируясь по компасу. Для обеспечения большей точности, «исходные данные» необходимо получить, двигаясь спокойно, с одинаковой скоростью.

После определения «исходных данных» панель ТАС-100 позволяет прокладывать и двигаться по проложенному заранее маршруту. Для понимания метода прокладки маршрута необходимо понять принцип совместной работы всех компонентов навигационной панели.

Глубина и время фиксируются при помощи глубиномера ТАС-DG и хронометра ТАС-CHRON. Курс контролируется при помощи компаса, расположенного в центре навигационной панели. На картушке компаса нанесена белая люминисцентная шкала на черном фоне для улучшения считывания показаний в условиях плохой видимости, и выделены три точки: север, восток и запад. Для подсветки компаса во время ночных погружений панель оснащена устройством для размещения химического источника света.

#### **Основные технические характеристики ТАС-100:**

- Размеры: 30,5 см х 25,4 см х 12,7 см
- Вес в воздухе: 1,35 кг
- Материал панели: чёрный пластик ABS
- Иллюминация компаса – регулируемый источник света
- Наклон компаса: 20 ° С-Ю и 40 ° З-В
- Диапазон глубиномера: 0-16 м

#### **Основными недостатками ПНП ТАС-100 является:**

- Относительно небольшой диапазон глубиномера.
- Высокая себестоимость панели.

Имеемые современные навигационные панели водолазов как, отечественного, так и зарубежного производства изготавливаются из пластика, с применением подводных приборов изготавливаемых промышленностью, это – глубиномеры, часы, компаса. Анализ их устройства и имеемых в продаже подводных устройств обеспечивающих измерение – глубины, времени, направления и обеспечивающих расчет декомпрессии (подводные компьютеры или декомпрессиметры) позволяют говорить о возможности изготовления навигационных панелей в условиях подразделения.

© О. В. Матыцин, 2014

## **ПОДВОДНЫЕ СРЕДСТВА БУКСИРОВАНИЯ БОЕВЫХ ПЛОВЦОВ**

*Олег Владимирович Матыцин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31

*Сергей Александрович Кузнецов*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент СГГА, группа ОИ-51, тел. (383)361-07-31

Подводный буксировщик, обладающий необходимыми характеристиками для ориентирования и перемещения водолаза под водой.

**Ключевые слова:** подводный буксировщик, транспортировка, буксировщик водолаза.

## **UNDERWATER EQUIPMENT OF TOWING MILITARY SWIMMERS**

*Oleg V. Matytsin*

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31

*Sergey A. Kuznetsov*

Siberian state geodetic Academy, 630108, Russia, Novosibirsk, ul. Plahotnogo, 10, tel. (383)361-07-31

Underwater towing with the necessary characteristics intended for deposits and move diver under water.

**Key words:** submarine towing, transportation, propulsion vehicle diver.

В ходе ведения войн и вооруженных конфликтов развивались пути и способы доставки личного состава, вооружения и военной техники, как в тыл противника, так и в прифронтовые районы. Существует три пути вывода войск: воздушный, наземный, морской (водный). Наиболее часто для вывода используются воздушный и наземный способы вывода. Но за последние два десятилетия прогресс, в сфере оборонно-защитного комплекса совершил огромный скачек.

### **Буксировщики отечественного производства**

Подводные средства движения предназначены для транспортировки, передвижения легководолазов в подводном или надводном положении, а также для транспортировки различных грузов, оружия, снаряжения в корпусе ПСД или ГК, выполнении осмотра подводной части кораблей, пирсов, проведении противодиверсионных мероприятий, охране водных районов.

Классификация ПСД осуществляется по ряду признаков и характеристик, а именно: водоизмещению, классу плавсредств, предназначению, автономности и

т.д. Классификация по назначению наиболее полно отражает и характеризует ПСД, подчеркивается их тактико-техническими характеристиками.

**Подводные средства движения подразделяются на:**

- а) СМПЛ
- б) Групповые носители водолазов.
- в) Групповые буксировщики водолазов.
- г) Индивидуальные буксировщики водолазов.
- д) Буксировщики индивидуальные подводника (БИП, БВПИ)

**Носитель водолазов "Сирена - УМ".**

Носитель водолазов "Сирена - УМ" предназначен для передвижения двух легководолазов в подводном или надводном положениях к месту выполнения задачи, а также для транспортирования различных грузов и снаряжения в грузовом контейнере. Носитель оборудован системой СТП - 4.

**Носитель водолазов «Сирена-УМ» включает в себя:**

- головное отделение,
- проточное отделение,
- кормовое отделение с хвостовой частью,
- грузовой контейнер,
- аккумуляторную батарею,
- ЗИП одиночный,
- формуляр,
- съемные приборы навигации, связи, СТП.

**Индивидуальный буксировщик водолаза "Протон".**

ИБВ "Протон" предназначен для транспортировки легководолаза в подводном и надводном положении в воде с диапазоном солёности от 0 до 30 промилей и температурой от -2 до + 30 С. Буксировщик обеспечивает транспортировку легководолаза и одновременную буксировку другого легководолаза или грузового контейнера.

**Устройство буксировщика водолазов.**

Буксировщик состоит из:

- корпуса;
- двигательно-двигательного комплекса;
- аккумуляторных батарей;
- устройство крепления водолаза к буксировщику (плечевые и задний упоры);
- кабели электродвигателя (и два кабельных ввода);
- выключатель;
- предохранительный клапан;
- продувочный клапан;
- бугель для буксировки (КТМ);
- крышка аккумуляторного отсека с резиновым кольцом;
- пенопластовые прокладки (при использовании АКБ 6-БАМ-3П);
- груза:

- а) грузы № 1 закреплены гайкой-барашком на оси крышки, которая вворачивается в горизонтальную шахту прочного корпуса;
- б) грузы № 2 закреплены на планках проницаемого отсека винтами;
- в) грузы № 3 закреплены винтами на дне аккумуляторного отсека.

Буксировщик водолаза «Протон» крепится на груди водолаза при помощи упоров. Подпружинивание плечевых упоров обеспечивает прижатие буксировщика к водолазу, оставляя, в то же время, некоторую свободу движения. Подгонка по росту осуществляется перестановкой заднего упора.

При выключении двигателя буксировщик с водолазом плавает в воде с дифферентом на корму, за счет соответственного расположения центра тяжести и центра водоизмещения.

При включенном электродвигателе, буксировщик водолаза осуществляет равномерное перемещение водолаза под водой. При переводе ДДК в нижнее положение, плавание осуществляется по поверхности. Управление ходом буксировщика по курсу и глубине осуществляется изменением положения тела, рук и ног водолаза.

*Индивидуальные буксировщики «Протей-5М», «Протей-5МУ».*

Буксировщики типа «Протей-5М», «Протей-5МУ» предназначены для транспортировки водолаза в подводном и надводном положении в воде с диапазоном солёности от 0 до 30 промилей и температурой от 0 до + 30 С. Буксировщик обеспечивает транспортировку водолаза и одновременную буксировку другого водолаза или грузового контейнера.

**Буксировщик для туризма и исследований «Сом».**

Буксировщики «Протей» и «Протон» предназначались в основном для профессионалов. В них реализовано стремление постоянного повышения тактико-технических характеристик. Поэтому увеличивались их масса и стоимость. Они требовали от человека все более и более высокой квалификации.

В период перестройки в 1998 году П. В. Трошин с коллективом ОКБ создал конверсионный вариант буксировщика. Шифр «Сом».

При его создании решались следующие проблемы:

- Снизить требования к квалификации аквалангиста.
- Снизить скорость плавания до безопасного уровня.
- Обеспечить приемлемый уровень стоимости изделия.
- Обеспечить транспортировку неподготовленного пассажира.
- Обеспечить полную безопасность плавания
- Создать новый вид услуги в дайвинге — катание начинающих на расстоянии, недоступные при плавании на ластах.

**Размещение.** Человек располагается на ложементе с опорой на задний упор, удерживаясь за дугу бампера в любом удобном для него месте. Аппарат пригоден для аквалангиста любого роста.

**Работа.** Буксировщик при любой солёности воды может вывешен специальными грузами до нулевой или небольшой положительной плавучести (около 0,5 кг). Буксировщик вывешивается с небольшим дифферентом на корму.

Заняв исходное положение, водитель, придерживаясь за дугу бампера, включает двигатель и начинает движение по поверхности. Затем, придав буксировщику дифферент на нос, плавно погружается под воду.

Управление по курсу и глубине осуществляется изменением положения тела относительно буксировщика. При правильной вывеске навыки управления буксировщиком вырабатываются за несколько минут.

**Конструкция.** По своей архитектуре «Сом» напоминает «Протон-У», но без защитного колпака и рулевого устройства. Корпус представляет собой герметичную сварную конструкцию обтекаемой формы, выполненную из алюминий-магниевого сплава.

Буксировщик разобцается на три основных блока:

- Крышка с ложементом и бампером.
- Собственно корпус с закрепленным на нем ДДК.
- Аккумуляторная батарея в контейнере.

Батарея закрепляется в корпусе, к которому при помощи разъемного хомута крепится крышка с ложементом и бампером. На корпусе имеются продувочный и предохранительные клапаны.

**Аккумуляторная батарея.** В буксировщике использована современная стандартная необслуживаемая свинцово-кислотная аккумуляторная батарея. Предусмотрена возможность буксировки контейнера с дополнительными источниками тока. Это позволит увеличить дистанцию плавания в несколько раз.

**Электрическая схема.** Электрическая схема двухпроводная. Для включения и выключения и защиты двигателя от перегрузок по току, так же как в изделии «Протон», применен автомат защиты. Он расположен в герметичной коробке, размещенной на торцевом конце ложементы.

Для подсоединения кабель-троса, или подзарядки аккумуляторной батареи без вскрытия корпуса в нем имеется штепсельный разъем с герметизирующей заглушкой.

Буксировщик может быть оснащен счетчиком ампер-часов.

**Двигатель и движитель.** На буксировщике может быть установлен электродвигатель ДПК и ДПК-2М с соответствующим улучшением характеристик.

Электродвигатель своим неподвижным валом крепится непосредственно на кормовом торце корпуса. К нему же крепится профильная насадка на гребной винт. Она так же, как и в других буксировщиках, служит защитой для винта и повышения его КПД.

**Транспортировка второго аквалангиста.** При транспортировке второго человека сверху на корпусе устанавливается дополнительный откидной упор. Пассажир ложится на корпус, упирается в задний упор и удерживается руками за водителя. Такая схема несколько проигрывает в гидродинамическом отношении, но обеспечивает непосредственный контакт между водителем и пассажиром. Инструктор имеет возможность мгновенно реагировать на нештатное поведение пассажира.

Разделение обязанностей между членами экипажа существенно улучшает условия проведения поисковых работ и различных визуальных и аппаратурных исследований.

**Буксировка грузов.** Мощность двигателя обеспечивает буксировку значительного количества груза. В буксируемом контейнере может также располагаться дополнительная аккумуляторная батарея.

**Буксировщики иностранных армий.**

Основываясь на опыте использования подразделений боевых пловцов (подводных диверсантов) в период второй мировой войны и в локальных войнах, зарубежные военные специалисты считают, что и в современных условиях такие подразделения способны эффективно действовать против кораблей, средств противодесантной обороны, портовых и береговых объектов противника. Руководство ВМС ряда стран НАТО оснащают подразделения боевых пловцов специальными средствами доставки, легководолазным снаряжением, подводным оружием, гидроакустической, навигационной и другой аппаратурой.

Подводные средства движения (ПСД) служат для транспортировки боевых пловцов, а также мин, подрывных зарядов к объектам диверсий. Тактико-технические характеристики основных подводных средств движения ВМС капиталистических государств приведены в таблице.

*Таблица*

Тактико-технические характеристики

Тип ПСД. Параметры.	“Си Хорс-2” (Италия)	“Дарт” (США)	“Минисаб” Мк VII (США)	SE2F/X60 (Италия)	“Сабкэт” (Англия)
Экипаж, чел.	2	2	2	2	2-3
Дальность плавания, км	...	28	...	50(3.3 уз.)	50( 4 уз.)
Скорость хода, уз.	3	8	5	4.5	5
Автономность, ч	3	3.5	...	...	...
Глубина погружения, м	30	...	...	60	200
Масса, кг	360	...	440	2400	750
Длина, м	4.5	...	4.27	7	3.1
Ширина, м	1.2	...	2.15	0.8	1.63
Мощность энергосило- вой установки, кВт	1.32	...	...	...	3.9

Значительно усовершенствованы конструкции различных подводных аппаратов, в том числе СМПЛ и других технических средств, для подводных диверсий.

ПСД типов SE2F/X30 и SE2F/X60, выпускаемые в Италии, в настоящее время считаются за рубежом одними из наиболее современных средств подоб-



ного назначения. Эти ПСД, имея практически одинаковые ТТХ, отличаются величиной глубины погружения и степенью оснащённости навигационной аппаратурой.

Корпус носителя выполнен из стали и имеет в кормовой и носовой оконечностях цилиндрическую форму. Он разделен на четыре отсека: носовой, центральный и два кормовых (носовой и кормовые - герметичны, центральный - проницаемый). В герметичном носовом отсеке размещена группа АБ, закреплённая на каретке, способной перемещаться в продольном направлении, чем достигается дифферентовка носителя в подводном положении. Над носовым отсеком раскреплен контейнер с контрольно-измерительными приборами, защищенный обтекателем из стеклопластика. Центральный отсек предназначен для размещения двух водолазов в снаряжении, его верхняя часть закрыта трехсекционным колпаком, выполненным из оргстекла. Передняя и задняя секции колпака могут двигаться в продольном направлении, обеспечивая доступ водолаза в отсек. В центральном отсеке размещены дифферентный насос, уравнивательная и балластная цистерны, баллон воздуха высокого давления, единая рукоятка управления движением, эхолот, лаг и магнитный компас.

Прочная кормовая часть носителя разделена переборкой на два отсека. В передней части расположены АБ и два воздушных баллона бортовой систем жизнеобеспечения, хранящимся перед каждым водолазом, что позволяет последним не тратить запасы воздуха из своих дыхательных аппаратов. В задней части кормовой секции размещены гребной двигатель мощностью 4 кВт с редуктором. Гребной винт трехлопастной. Вертикальные и горизонтальные рули раскреплены на кронштейнах, приваренных к кормовому отсеку; перекладка рулей осуществляется с помощью тросовых тяг из передней кабины водолаза. Иногда в обтекателе над кормовым отсеком размещается стеклопластиковый контейнер с запасными дыхательными аппаратами и минами-присосками.

Для регулирования плавучести предусмотрена уравнивательная цистерна, выполненная из нержавеющей стали, размещенная в нижней части центрального отсека между двумя кабинами водолазов; заполнение и осушение ее проводится дифферентным насосом. Система погружения-всплытия включает балластную цистерну, два баллона со сжатым воздухом, трубопровод с арматурой. Балластная цистерна размещена над уравнивательной цистерной. Выполнена из стеклопластика и снабжена клапанами вентиляции; заполнение ее производится самотеком, осушение – сжатым воздухом. При продутой балластной цистерне носитель способен осуществлять движение в надводном положении, при этом водолазы могут дышать атмосферным воздухом.

В герметичном, стеклопластиковом контейнере, расположенном перед водолазом, размещены: магнитный компас, дифферентомер, глубиномер, лаг, эхолот, часы, амперметр, дифферентный насос, воздушный манометр, термометр, переключатель станций управления энергоустановкой.

Вывод: Из описанной технологии видно, что подводный буксировщик, обладающий необходимыми характеристиками можно изготовить самостоятельно в подразделении. При этом, все материалы, используемые для его изготовления

имеются в свободной продаже, их поиск не составляет труда. Обслуживание этого подводного буксировщика не является затратным и под силу любому водолазу. При этом он легко обслуживается и ремонтируется в полевых условиях. Буксировщик будет обладать небольшой массой и размерами, прост в эксплуатации. Его конструкция позволит размещать на нем необходимое дополнительное оборудование.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов С. Н. Матыцин О. В. Подводные средства движения: учебное пособие. – Новосибирск, 2005.

2. МЧС России, Дальневосточный региональный поисково-спасательный отряд. Лекции По водолазной подготовке. Водолазное снаряжение и оборудование Средства подводного наблюдения, поиска и обследования. Транспортёры водолазов 2009 год.

© О. В. Матыцин, С. А. Кузнецов, 2014

## **УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В БОЕПРИПАСАХ С ОТСЕЧКОЙ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ**

*Сергей Григорьевич Губин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий тел. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

Разработана математическая модель внутрибаллистических процессов в боеприпасах с отсечкой пороховых газов.

**Ключевые слова:** баллистика, боеприпасы, внутренняя баллистика.

## **THE SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL INTRA BALLISTIC PROTSESSOVS IN AMMUNITION WITH THE CUT-OFF OF POWDER GASES**

*Sergey G. Gubin*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

A mathematical model of внутрибаллистических processes in munitions with cutoff of powder gases.

**Key words:** ballistics, ammunition, internal ballistics.

Особенности математического моделирования внутрибаллистических процессов в боеприпасах с отсечкой пороховых газов отличается, от математического моделирования обычных боеприпасов. Т.к. существует разнится в периодах выстрела при протекании внутрибаллистических процессов.

**Допущения и уравнения, принятые при проведении внутрибаллистических расчётов.**

Для упрощения расчётов внутрибаллистических параметров примем ряд допущений, принятых в большинстве методик для внутрибаллистических расчётов. [1-5]

1. Воспламенение заряда происходит мгновенно.
2. Влияние газов воспламенителя настолько мало, что им можно пренебречь.
3. Горение порохового заряда подчиняется геометрическому закону.
4. Параметры расширения пороховых газов не изменяются.
5. Справедлив линейный закон скорости горения.
6. Состав пороховых газов не изменяется.
7. Вместо отношения истинных теплоёмкостей принимается отношение средних теплоёмкостей.

8. Различные работы, производимые пороховыми газами, помимо главной работы  $\frac{m \cdot V^2}{2}$ , принимаются пропорциональными живой силе гранаты в поступательном движении.

9. Перемещение оружия за время движения снаряда не учитываются.

10. Деформация стенок корпуса и штоков при выстреле мала и ей можно пренебречь.

11. Прорыва пороховых газов не происходит.

12. Охлаждение газов под влиянием стенок корпуса и штоков в расчёт не принимается.

13. Движение снаряда начинается лишь тогда, когда в камере разовьётся давление  $P_0$ .

14. В предварительном периоде:

$\Psi_0$  – относительная часть сгоревшего заряда за предварительный период.

$$\Psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{P_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}},$$

где:  $P_0$  – давление форсирования;

$\alpha$  – коэффциент пороховых газов;

$\delta$  – плотность порохового заряда;

$f$  – сила пороха;

$\Delta$  – плотность заряжания.

$$z_0 = \frac{2 \cdot \psi_0}{(\sigma_0 + 1) \cdot \gamma_1},$$

$z_0$  – относительная толщина пороха, сгоревшая от начала горения.

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \cdot \psi_0}.$$

где:  $\sigma_0$  – относительная поверхность пороха, сгоревшая от начала горения.

15. В первом периоде:

Линейный закон скорости горения:

$$u = u_1 P,$$

где:  $u$  – скорость горения;

$u_1$  – коэффициент скорости горения пороха;

$P$  – давление.

Процесс образования пороховых газов описывается уравнением:

$$\Psi = \gamma_1 z \cdot (1 + \lambda_1 z);$$

где:  $\Psi$  – относительная часть сгоревшего заряда,

$z$  – относительная сгоревшая толщина пороха,

$\gamma_1, \lambda_1$  – характеристики формы пороха, постоянные числа, зависящие от формы зерна.

Уравнение пиродинамики:

$$PS(l_\psi + l) = f\omega\psi - \frac{\theta\varphi qV^2}{2g}$$

где:  $S$  – площадь поперечного сечения каморы;

$l_\psi$  – приведённая длина свободного объёма каморы;

$l$  – длина пути снаряда по каналу ствола;

$W_0$  – начальный объём, в котором происходит горение пороха;

$\theta$  – параметр расширения;

$\varphi$  – коэффициент фиктивности;

$q$  – вес снаряда;

$V$  – скорость снаряда;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\omega$  – вес пороха;

$$l_0 = \frac{W_0}{S}$$

где:  $l_0$  – приведённая длина каморы.

Процесс поступательного движения гранаты:

$$\frac{\varphi q}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = SP$$

Итак, окончательно, с учётом  $I_k = \frac{e_1}{u_1}$  – конечный импульс, получим систе-

му уравнений в виде:

где  $e_1$  – толщина горящего свода пороха в одном направлении.

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = \gamma_1 z(1 + \lambda_1 z) \\ P = f\omega \cdot \frac{\psi - \frac{\theta\varphi qV^2}{2gf\omega}}{S \cdot (l_\psi + l)} \\ l_\psi = l_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \psi \right] \\ \frac{dl}{dt} = V \\ \frac{dz}{dt} = \frac{P}{I_k} \\ \frac{\varphi q}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = SP \end{array} \right.$$

Учитывая конструктивные особенности схемы метания, в расчеты необходимо внести изменения.

Так как в данных типах боеприпасов некоторые периоды выстрела отсутствуют или протекают только частично, из-за ограниченного объема рабочего хода поршня (штоков). По этому необходимо каждое действие поршня (штоков) с изменением объема выделить и дать ему название. Для нашей методики назовём его «Стадией».[6, 7]

Начальными условиями для последующих стадий являются результаты, полученные в предыдущей стадии.

### Расчет внутрибаллистических параметров

#### Предварительный период.

Как уже отмечалось ранее, период форсирования протекает без изменений.

Определим:  $\Psi_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $z_0$ ,

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{P_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}}$$

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \psi_0}$$

$$z_0 = \frac{2\psi_0}{(\sigma_0 + 1)\gamma_1}$$

Подставив в систему уравнений все значения, полученные в предварительном периоде как начальные, проведем расчет для первого штока.

#### Первый период.

Отсчет времени  $t$  – начинается от момента движения штока, т.е. считается, что все процессы в предварительном периоде происходят мгновенно.

Таким образом, решение системы уравнений необходимо вести при следующих начальных условиях:

$$t=0; V=0; l=0; Z=Z_0; P=P_0.$$

Для численного интегрирования системы уравнений приведём её к виду из трёх дифференциальных уравнений по  $t$ , для этого:

1. Подставим  $\psi = \gamma_1 z(1 + \lambda_1 z) = \gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1$  в первые два уравнения системы, тогда:

$$P = \frac{f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\theta\varphi q V^2}{2g}}{S(l_\psi + l)},$$

$$l_\psi = l_0 \cdot \left[1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right) \cdot \Delta \cdot (\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1)\right].$$

2. Подставим  $l_{\psi}$  во второе уравнение:

$$P = \frac{f\omega \cdot (\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\theta \varphi q V^2}{2g}}{S \cdot \left\{ (l_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \cdot (\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) \right]) + l \right\}}$$

И выразим отсюда V:

$$V = \sqrt{\frac{2g \left[ f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \left[ f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\varphi q V^2 \theta}{2g} \right] \right]}{\varphi q \theta}}$$

Подставим полученные выражения в 3 дифференциальных уравнения от t:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dl}{dt} = V \\ \frac{dz}{dt} = \frac{P}{I_k} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{SPg}{\varphi q} \end{array} \right.$$

В развернутом виде имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dl}{dt} = \sqrt{\frac{2g \left[ f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \left[ f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\varphi q V^2 \theta}{2g} \right] \right]}{\varphi q \theta}} \\ \frac{dz}{dt} = \frac{1}{I_k} \cdot \frac{f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\theta \varphi q V^2}{2g}}{S \cdot \left\{ (l_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \cdot (\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) \right]) + l \right\}} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\varphi q} \cdot \frac{f\omega(\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) - \frac{\theta \varphi q V^2}{2g}}{\left\{ (l_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \cdot (\gamma_1 z + \gamma_1 z^2 \lambda_1) \right]) + l \right\}} \cdot g \end{array} \right.$$

В зависимости от типа принципа работы специальных боеприпасов расчёт ведется по-разному. В боеприпасах с обычным принципом метания с одним поршнем массой поршня можно пренебречь. В боеприпасах со штоками придётся учитывать массу штоков независимо от схемы метания. [6, 7]

Для определения скоростных характеристик нам необходимо, знать массу и размеры элементов выстрела, которые могут оказать влияние при расчете скорости движения выстрела на определенном участке движения.

При переходе к каждой последующей стадии учитывается изменение площади поперечного сечения камеры и массы движущегося тела.

Определим конечную скорость боеприпаса после раскрытия первого штока, с учетом массы первого штока:

$$V_{B1} = \frac{qV_1}{q + m_{ш1}}$$

Подставив в систему уравнений все значения, полученные после раскрытия первого штока как начальные, заменим показатель  $V_1$  на  $V_{B1}$  и проведем расчет для второго штока и т.д. для следующих штоков.

Так как первый период может заканчиваться после полного раскрытия поршня (штоков), то нам необходимо знать, какое максимальное давление получим при догорании смеси в постоянном объёме. Это необходимо для проведения расчётов на прочность метательного устройства.

Алгоритм решения системы уравнений для данной стадии аналогичен решению системы для 3 стадии, за исключением:

1. Напомним, что 4 период начинается после раздвижения всех штоков и поршня и проходит до полного сгорания оставшегося пороха. Поэтому перемещения штоков и ускорения гранаты больше не происходит. Поэтому систему из 3-х уравнений приводим к виду:

$$\frac{d}{dt}l = 0$$

$$\frac{d}{dt}z = \frac{1}{I_k} \cdot \frac{f\omega(\gamma_1 \cdot z + \gamma_1 \cdot z^2 \lambda_1) - \frac{\phi q V^2 \Theta}{2g}}{S \cdot \left[ l_0 \cdot \left[ 1 - \frac{\Delta}{\delta} - \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right) \cdot \Delta \cdot (\gamma_1 \cdot z + \gamma_1 \cdot z^2 \lambda_1) \right] \right] + 1},$$

$$\frac{d}{dt}V = 0$$

Стадия завершается при сгорании всего пороха, т.е. при  $z=1$

Для получения более точных расчётов необходимо сократить количество допущений и ввести их в дифференциальные уравнения. Это усложняет расчёт, но даёт более точный результат.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дроздов Н. Ф. Решение задач внутренней баллистики для бездымного пороха трубчатой формы. – М.: Артакадемия, 1941. – 122с.
2. Вентцель Д. А. Внутренняя баллистика. – М.: ВВИА им. Жуковского, 1948. – 415 с.



3. Граве И. П. Внутренняя баллистика // Пиродинамика. Выпуск II. – Л.: Артакадемия им. Ф.Э. Дзержинского, 1934. - 292 с.
4. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Гос. Науч.-Тех. Издат. Оборонгиз, 1962. - 703 с.
5. Горохов В. С. Внутренняя баллистика ствольных систем. – М.: ЦНИИ Информатики, 1985. – 160 с.
6. Губин С. Г. Методика расчета внутрибаллистических параметров в системах обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объеме // Сборник тезисов докладов конференции «Наука. Промышленность. Оборона. НПО-2003». – НГТУ. – 2003. – С. 35-38.
7. Губин С. Г. Особенности расчета внутрибаллистических параметров в системах обратного метания с отсечкой пороховых газов в переменном-замкнутом объеме // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 7. – С. 150–153.

© С. Г. Губин, 2014

## **ОБЗОР РАЗВИТИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-БОЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ В СИСТЕМЕ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-БОЕВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СПН И ВОЙСКОВОЙ РАЗВЕДКИ СУХОПУТНЫХ ВОЙСК**

*Сергей Григорьевич Губин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, старший преподаватель кафедры специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

*Виталий Александрович Войновский*

Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище, 390031, Россия, г. Рязань, Площадь генерала армии В. Ф. Маргелова, 1, преподаватель кафедры ПП СпН, тел. (4912)20-94-95, e-mail: rvvdku-vi@mail.ru

В предлагаемой статье представлены средства обеспечения разведывательно-боевой деятельности, которые объединены по функциональному признаку, отражающему основную функцию, в свою очередь, которая исполняет элемент, входящий в ту или иную подсистему.

**Ключевые слова:** разведывательно-боевые комплексы, системы управления, подразделениями СпН и ВР, разведывательно-сигнализационные системы.

## **THE REVIEW OF DEVELOPMENT OF PROSPECTING AND FIGHTING COMPLEXES IN SYSTEM OF MEANS OF ENSURING OF PROSPECTING AND FIGHTING ACTIVITY OF DIVISIONS OF SPN AND ARMY INVESTIGATION OF LAND FORCES**

*Sergey G. Gubin*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., senior teacher of the Department of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: ognewik61@mail.ru

*Vitaly A. Voynovsky*

Ryazan highest airborne command school, 390031, Russia, Ryazan, area of the general V. F. Margelov of 1, teacher of SPN software chair, tel. (4912)20-94-95, e-mail: rvvdku-vi@mail.ru

Means of ensuring of prospecting and fighting activity which are integrated on a functional sign reflecting the main function in turn which executes an element entering this or that subsystem are presented in offered article.

**Key words:** prospecting and fighting complexes, control systems, SPN and BP divisions, prospecting and signaling systems.

В условиях современного динамичного боя необходимо минимизировать временной промежуток времени между обнаружением цели, принятием решения об уничтожении и поражением высокоточным оружием, что требует создания единых разведывательно-боевых систем. [1]

В связи с этим непрерывно совершенствуются формы и способы вооруженной борьбы, в боевых действиях важная роль отводится разведывательным подразделениям соединений и частей специального назначения и войсковой

разведки (СпН и ВР). Данные подразделения предназначены для выполнения трех основных видов задач: разведывательных, специальных и специфических.

Выполнение задач подразделениями СпН и ВР ведется в условиях обеспечения скрытности действий, на территории противника, автономного режима работы в отрыве от главных сил. В связи с этим особое внимание уделяется развитию и совершенствованию средств обеспечения разведывательно-боевой деятельности (СО РБД) которые образуют единую, сложную, с множеством взаимосвязей между элементами и классами систему.

Система СО РБД представляет собой совокупность технических устройств, приспособлений, имущества, боеприпасов функционально предназначенных для обеспечения выполнения разведывательных, специальных и специфических задач личным составом разведывательных подразделений. [2]

Рассмотрим каждую из подсистем входящих в систему средств обеспечения РБД.

**1. Подсистемы разведки** предназначены для добычи и съема информации, поиска, обнаружения, сопровождения деятельности объекта, отображения изменения качественного и количественного состояния объекта разведки, управления специальными устройствами и средствами поражения: [3]

- средства для поиска и обнаружения объектов;
- поиска и обнаружения специальных объектов;
- искатели кабельных линий;
- обнаружения специальных боеприпасов;
- средства разведки минно-взрывных заграждений;
- средства поиска маркированных объектов (грузов);
- средства контроля и мониторинга окружающей среды;
- разведывательно-сигнализационную аппаратуру;
- средства радиотехнической разведки в т.ч. радиоперехвата и пеленгации;
- средства съема информации и отображения характеристик объекта;
- средства ориентирования и навигационного обеспечения;
- радиолинии управления специальными устройствами и средствами поражения;
- средства разведки местности и преград;
- средства сопровождения (наблюдения) объектов;

**2. Подсистема поражения** в системе средств обеспечения РБД - есть совокупность технических устройств, принадлежностей, инструментов приспособлений предназначенных для уничтожения, поражения, частичного вывода из строя и нанесения повреждений объектам, вооружению, военной технике и живой силе противника

Вооружение и военная техника, входящие в систему поражения подразделяются на: вооружение общего и специального назначения, боеприпасы общего и специального назначения и минно-взрывную технику.

Ввиду того, что основным условием применения частей и подразделений СпН и ВР является скрытность в ходе выполнения задачи и такой не маловажный фактор как внезапность, а вооружение общего и специального назначе-

ния применяется для кратковременных огневых контактов, то в аспекте сопряжения средств поражения с разведывательной аппаратурой предлагаются к рассмотрению элементы входящие в подсистему минно-взрывной техники подсистемы поражения состоящую из инженерных боеприпасов и комплектов минирования.

Инженерные боеприпасы (ИБП) - средства инженерного вооружения, содержащие в себе взрывчатые вещества и пиротехнические составы.

Комплекты минирования - комплекты средств, предназначенные для минирования местности минами различных классов с помощью устройств ручного запуска (УРП) и переносных комплектов минирования (ПКМ) с целью поражения живой силы противника, а также устройства управляемых по проводам и радиоканалу противотанковых и противопехотных минных полей.

**3. Подсистема управления** в общей системе обеспечения РБД - есть совокупность устройств, принадлежностей и приспособлений предназначенных для передачи, шифрования (дешифрования) накопления и хранения информации и состоящих на снабжении и проходящих по учету в службе связи соединения (части, подразделения) специального назначения ограниченная до переносного, носимого или портативного значения по массе и габаритам.

**4. Подсистема вывода и эвакуации** представляет собой совокупность технических устройств, принадлежностей и приспособлений, предназначенных для осуществления вывода и эвакуации подразделений и доставки грузов различными способами и путями, а также механизации процессов вывода и эвакуации, для увеличения массы переносимого груза, подразделениями специального назначения имеющими ограничения до переносного, носимого или портативного значения по массе и габаритам.

**5. Подсистема обеспечения жизнедеятельности** – в ее состав входят средства необходимые для поддержания боевой готовности разведывательного органа, его успешного функционирования и поддержанию в готовности к действию ограниченные до носимого или портативного значения по массе и габаритам.

В подсистему защиты – входят средства предназначенные:

- индивидуальной бронезащиты личного состава;
- защиты и противодействия системам разведки;
- преодоления и проделывания проходов в минно-взрывных заграждениях;
- преодоления и проделывания проходов в минно-взрывных заграждениях;
- имитации действий разведывательных органов.

Основой любой разведывательно-боевой системы является комплект оборудования и программно-математического обеспечения, позволяющий каждой боевой единице стать полноценным участником цифрового поля боя, т.е. в соответствии со своими полномочиями получать и передавать разведывательную информацию в едином формате, которая хранится в единой базе данных. Единая разведывательно-ударная система должна объединять всех участников цифрового поля боя в сеть с горизонтальными (обмен разведывательной ин-

формацией) и вертикальными (обмен разведывательной информацией и принятие решений) связями.

Основную роль в обнаружении противника и выдаче целеуказания комплексам УРВ, самолётам ВВС и кораблям ВМФ будут играть специальные подразделения. Оснащённые лёгкими малозаметными автомобилями высокой проходимости, малогабаритными беспилотными и дистанционно-пилотируемыми летательными аппаратами различного типа, разведывательные органы смогут уклоняться от прямого столкновения с противником.

В перспективе для экипировки бойцов специальных подразделений будут применяться совершенные разведывательно-боевые комплексы, включающие в себя бронированный экзоскелет, вооружение, системы жизнедеятельности, активные средства маскировки, средства разведки, управления и связи.

Постоянным спутником бойца спецназа станут всевозможные наземные и воздушные роботизированные системы, образующие вокруг "хозяина" своеобразное информационное поле разведывательной информации и, при необходимости, обеспечивающие силовое прикрытие.

Одним из эффективных средств разведки являются многоспектральные разведывательно-сигнализационные приборы (РСП). Удешевление электронных компонентов позволит производить их в огромных количествах, забрасывая на территорию противника воздушными средствами доставки и артиллерией.

На сегодняшний день направлением совершенствования и развития вооружения и военной техники входящих в систему обеспечения разведывательно-боевых действий, является комплексирование различных средств разведки, поражения, управления и связи в один совмещающий в себе следующие функции: поиск, обнаружение, наблюдение и поражение объекта разведки. Данный комплекс позволяет не только реализовывать вышеуказанные функции, но и представляет собой единую информационную систему, что позволяет оперативно реагировать на изменение обстановки и получать более достоверные сведения об объекте.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боевой устав Воздушно-десантных войск, часть 3. – М.: Воениздат, 1993. – 345 с.
2. Губин С. Г., Войновский В. А. Тактика действий при работе с «Радиобарьером»: учебное пособие. – Рязань: РВВДКУ, 2014. – 40 с.
3. Губин С. Г., Енкен Б. База знаний по разведывательно-сигнализационному комплексу «Радиобарьер»: пособие. – Новосибирск: Учебный центр ООО «Полюс-СТ», 2013. – 395 с.

© С. Г. Губин, В. А. Войновский, 2014

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**

*Павел Геннадьевич Богомолов*

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, К. Маркса, 20, аспирант кафедры общей физики, тел. (383)346-08-34, e-mail ofbor@kof.ref.nstu.ru

*Михаил Григорьевич Рубанович*

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, К. Маркса, 20, доцент кафедры общей физики, тел. (383)346-08-34, e-mail ofbor@kof.ref.nstu.ru

*Владимир Александрович Хрусталеv*

Новосибирский государственный технический университет, 630092, Россия, г. Новосибирск, К. Маркса, 20, профессор кафедры электронных приборов, тел. (383)346-08-34, e-mail khrustalev@epu.ref.nstu.ru

В настоящей работе представлено исследование распределения заряда в поперечном сечении микрополосковой линии (МПЛ). Распределение численно исследовалось методом конечных элементов. Плотность заряда увеличивается на краях МПЛ и уменьшается в середине МПЛ. В конформно отображенной расчетной области подъем плотности заряда в точке стыковки воздуха и твёрдого диэлектрика, а правей твёрдого диэлектрика его резкий провал.

**Ключевые слова:** распределение заряда, плотность заряда, микрополосковые линии.

## **INVESTIGATION OF CHARGE DISTRIBUTION IN THE CROSS SECTION OF A MICROSTRIP LINE**

*Pavel G. Bogomolov*

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, Marx, 20, graduate student of General Physics, tel. (383)346-08-34

*Michail G. Rubanovich*

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, Marx, 20, Associate Professor, Department of General Physics, tel. (383)346-08-34

*Vladimir A. Khrustalyov*

Novosibirsk State Technical University, 630092, Russia, Novosibirsk, Marx, 20, Professor of Electronic Appliances, tel. (383)346-08-34

In this paper presents a study of the charge distribution in the cross section of the microstrip line (MSL). Distribution numerically was investigated by finite element method. Charge density increases at the edges of MSL, and decreases in the middle of MSL. In conformal mappings of the computational domain lift the charge density at the point docking air and solid dielectric, and the further to the right of solid dielectric his sharp drop.

**Key words:** distribution of charge, the charge density, the microstrip lines.

Доклад посвящён исследованию и анализу распределения заряда в поперечном сечении МПЛ. Выявлены особенности сложного распределения зарядов

в поперечном сечении МПЛ, что позволило определить значения плотности заряда, найдя распределение заряда по контуру МПЛ в ее поперечном сечении.

Для описания постоянных по времени электрических полей используется четвертое уравнение Максвелла [1]:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \mathbf{E}) = \rho, \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  – это вектор напряженности электрического поля;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды; а  $\rho$  – функция, описывающая распределение плотности электрических зарядов, являющихся источниками поля.

При этом искомой величиной при решении практических задач, как правило, выступает не вектор  $\mathbf{E}$ , а функция  $\rho$ , так происходит потому, что на практике нет никакой априорной информации о пространственном распределении зарядов [2].

Решить уравнение (1) аналитическим способом удастся лишь в очень простых ситуациях. На практике это означает использование упрощенных моделей, что часто приводит к неудовлетворительному результату. Для получения решения с заданной точностью необходимо использовать численное моделирование. В этом случае удобнее использовать не сами искомые характеристики, как например вектор  $\mathbf{E}$ , а их потенциалы. При описании постоянных по времени электрических полей, то есть решении задач электростатики, используется скалярный электрический потенциал  $u$  такой, что:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} u. \quad (2)$$

При этом из теории электромагнетизма известно, что если электрическое поле постоянно и в области присутствуют проводники, то поверхности этих проводников являются поверхностями равного потенциала. Подставляя (2) в (1), получаем уравнение:

$$-\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad}(u)) = \rho. \quad (3)$$

В задаче (рис. 1) границами области выступают границы проводников с заданными на них значениями потенциала  $u$  и удаленные границы области с заданным на них так называемом условии «большого бака». Данные условия выражаются в равенстве нулю значений потенциала  $u$  и его производных. Заметим также, что внутри самой области нет зарядов, являющихся дополнительными источниками поля. Это означает, что в уравнении (3)  $\rho = 0$ .

После конформного отображения расчетная область примет вид, изображенный на рис. 2.

В этом случае краевые условия для потенциала электрического поля  $u = u(\xi, \eta)$  на соответствующих границах такие же, как и в исходной расчетной области. Метод численного расчета распределения потенциала  $u$  полностью совпадает с описанным методом для исходной расчетной области. Однако для

вычисления заряда по описанному в работе методу интегрировать нормальную составляющую вектора напряженности электрического поля в данном случае нужно уже не по всей поверхности  $S_2^0$ , а только по той ее части, которая соответствует реальному размеру металлического полоска.

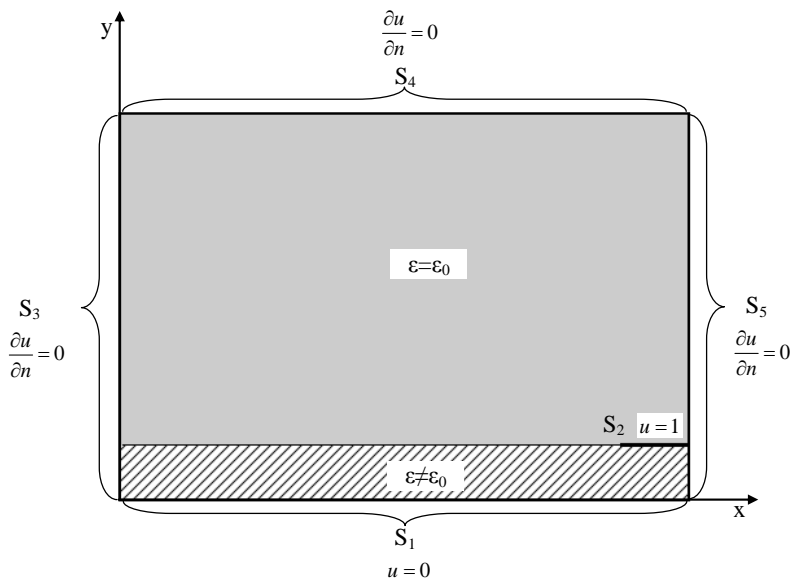


Рис. 1. Исходная расчетная область

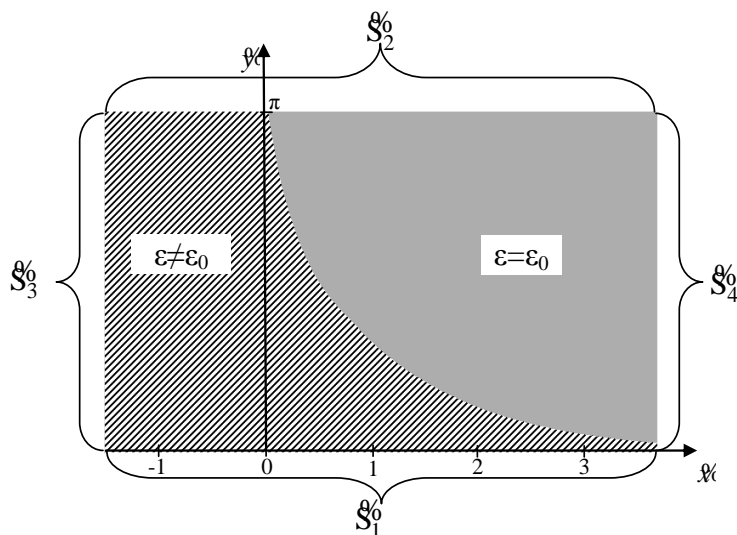


Рис. 2. Часть конформно отображенной расчетной области вблизи раздела материалов с разной диэлектрической проницаемостью

Ниже приведены результаты расчетов для двух моделей. Расчеты выполнялись на нескольких вложенных сетках. Погрешность результатов вычислений не превышает 1%.



В первой модели ширина полоска равна 1мм, толщина - 6 мк, ширина диэлектрика 1мм, а значения диэлектрической проницаемости диэлектрика  $\epsilon=9.6\epsilon_0$ . Во второй модели ширина полоска равна 6 мм, толщина - 6мк, ширина диэлектрика 4 мм, а значения диэлектрической проницаемости диэлектрика  $\epsilon=6.6\epsilon_0$ .

На рис. 3 показано распределение удельного значения заряда  $Q^{ud}$  [Кл/(В·м<sup>2</sup>)] по нижней (со стороны диэлектрика), по верхней (со стороны воздуха) поверхности металлического полоска для обеих моделей.

На рис. 4 показано распределение удельного значения заряда  $Q^{ud}$  [Кл/(В·м<sup>2</sup>)] на границах  $S_1^0$  и  $S_2^0$  в конформно отображенной расчетной области.

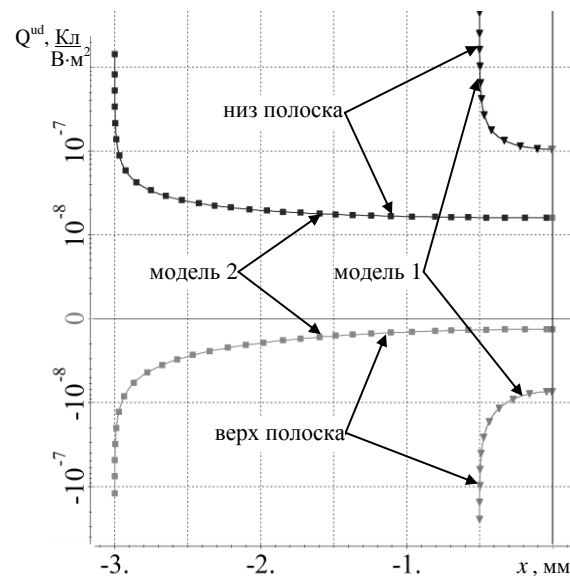


Рис. 3. Распределение удельного значения заряда по поверхности полоска

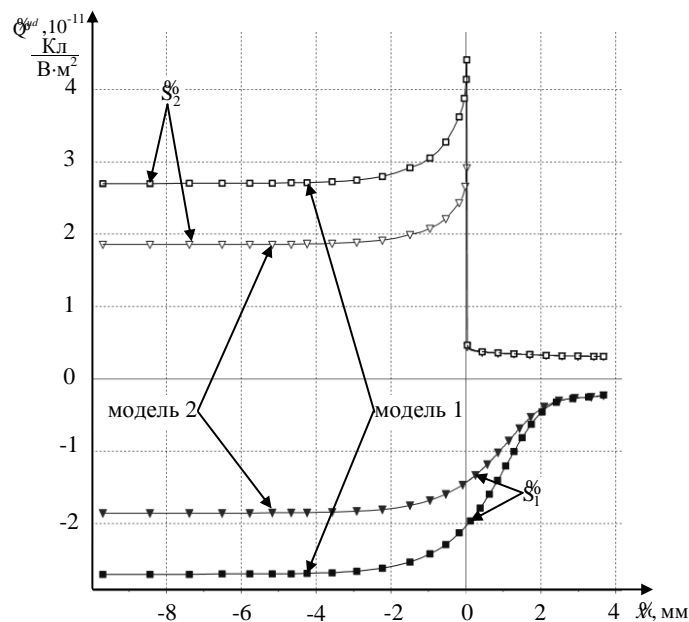


Рис. 4. Распределение удельного значения заряда на границах  $S_1^0$  и  $S_2^0$

Разработана численная модель исходной расчётной области МПЛ на основе использования метода конечных элементов. Предложенная модель позволяет определить потенциальное электрическое поле и соответственно вычислить распределение заряда в поперечном сечении МПЛ с помощью интегрирования нормальной составляющей вектора напряженности электрического поля. Данная методика определения распределения заряда применима как для МПЛ на диэлектрике (рис. 1), так и для конформно отображённой МПЛ (рис. 2).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. - М.: Энергия, 1968. - 488 с.
2. Методы расчёта электростатических полей / Н. Н. Миролюбов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, Н. Н. Тиходеев. – М.: Высш. школа, 1963. – 414 с.
3. Разинкин В. П., Абросимов А. А., Мехтиев А. Д. Анализ переходных процессов в нестационарных частотно-избирательных цепях // Научный вестник НГТУ. – 2012. – №2 (47). – С. 115–120.
4. Широкополосная амплитудно-частотная коррекция / В. П. Разинкин, В. А. Хрусталеv, М. Г. Рубанович, Ю. В. Востряков, А. А. Абросимов // Радиопромышленность. – 2012. – Вып. № 1. – С. 31–41.

© П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталеv, 2014

## **ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАРКОТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ИК ЛАЗЕРА**

***Валерик Сергеевич Айрапетян***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий кафедрой специальных устройств и технологий, тел. (383)361-07-31, e-mail: V.S.Ayrapetyan@ssga.ru

***Татьяна Валерьевна Маганакова***

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, студент, тел. 8913-795-71-01, e-mail: TanuShka\_A88@mail.ru

Проведены расчетные и экспериментальные исследования по дистанционному определению спектроскопических параметров некоторых наркотических веществ при помощи ИК-параметрического лазера.

**Ключевые слова:** параметрический генератор света, нелинейный кристалл, дифференциальное поглощение и рассеяние.

## **DETECTION AND MEASUREMENT OF PARAMETERS OF DRUGS USING TUNABLE IR LASER**

***Valeric S. Ayrapetyan***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph. D., department head of special devices and technologies, tel. (383)361-07-31, e-mail: V.S.Ayrapetyan@ssga.ru

***Tatyana V. Maganacova***

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St, student, tel. 8913-795-71-01, e-mail: TanuShka\_A88@mail.ru

The calculated and experimental research on remote spectroscopic determination of the parameters of certain drugs with the use of IR-parametric laser.

**Key words:** parametric generator of light, nonlinear crystal, differential scattering and absorption.

Дистанционное детектирование наркотических веществ (НВ) в атмосфере является актуальной задачей современности.

Большое число НВ относятся к классу летучих соединений и характеризуются высоким давлением паров, вследствие чего они могут быть обнаружены при анализе компонент атмосферы.

Одним из высокочувствительных и оперативных методов дистанционной диагностики наркотических веществ в настоящее время является лазерное зондирование, основанное на принципе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР).

Результаты исследований [1,2,3] свидетельствуют, что основные колебательно-вращательные полосы поглощения излучения легально применяемыми

НВ приходится на ближний и средний инфракрасный (ИК) диапазон длин волн (от 1 до 8 мкм). В этой связи роль плавно перестраивающегося ИК-параметрического лазера в данном диапазоне длин волн неоспоримо возрастает. Кроме того, спектры поглощения наиболее известными наркотическими веществами, такими как синтетические каннабиноиды, стимуляторы амфетоминового ряда представляют собой узкие полосы сложной формы с полушириной, равной нескольким единицам  $\text{см}^{-1}$ . Поэтому дистанционное исследование спектров поглощения нужно проводить высокомонохроматичным параметрическим лазером с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения, спектральная ширина которого ( $\Delta\nu_{\text{изл}}$ ) должна быть меньше спектральной ширины полосы поглощения детектируемой молекулой ( $\Delta\nu_{\text{погл}}$ ).

Разработка метода детектирования НВ с помощью ИК - параметрического лазера представляет собой комплексную задачу, включающую:

1) теоретические исследования и анализ экспериментально измеренных параметров спектральных полос поглощения ( $\lambda = 1 \div 8$  мкм) молекулами веществ, полученных различными прямыми способами, в том числе биологическими и оптическими;

2) разработку и создание перестраиваемого ИК – параметрического генератора света (ПГС) в диапазоне длин волн от 1,41 до 8,8 мкм, дальнейшие исследования и улучшение пространственно-временных и энергетических характеристик ПГС.

Исследования спектров поглощения наркотическими веществами можно проводить также косвенным способом. Практически все молекулы НВ имеют слабые СН (углеродные) связи, которые при нормальных условиях атмосферы разрушаются, а при превышении температуры от 30 до 60°C концентрация паров из некоторых наркотических веществ увеличивается почти на порядок. Вращательные спектры паров имеют достаточно интенсивные изолированные линии в диапазоне длин волн от 1,4 до 4,2 мкм, следовательно, их можно идентифицировать с помощью ИК – ПГС, работающего в таком же диапазоне.

В публикациях [4,5] приведено сообщение о разработке, создании и испытании автоматизированного дифференциального лазерного комплекса (рис. 1) на основе параметрического генератора света, перестраиваемого в ближней и средней инфракрасной области спектра, для измерения малых концентраций атмосферных газов.

При прохождении импульсного излучения параметрического лазера через кювету с наркотическим веществом часть излучения поглощается молекулами данного вещества. Посредством плавной перестройки частоты излучения первый импульс, генерируемый лазером, устанавливается на максимум линии поглощения молекулой НВ. Следующий импульс параметрического лазера дискретно перестраивается на крыло этой линии поглощения. Сигналы двух импульсов регистрируются фотодетектором и сравниваются в АЦП. Дифференциальное значение этих двух сигналов выводится на монитор ПК в виде колебательно - вращательных спектров поглощения молекулами НВ.

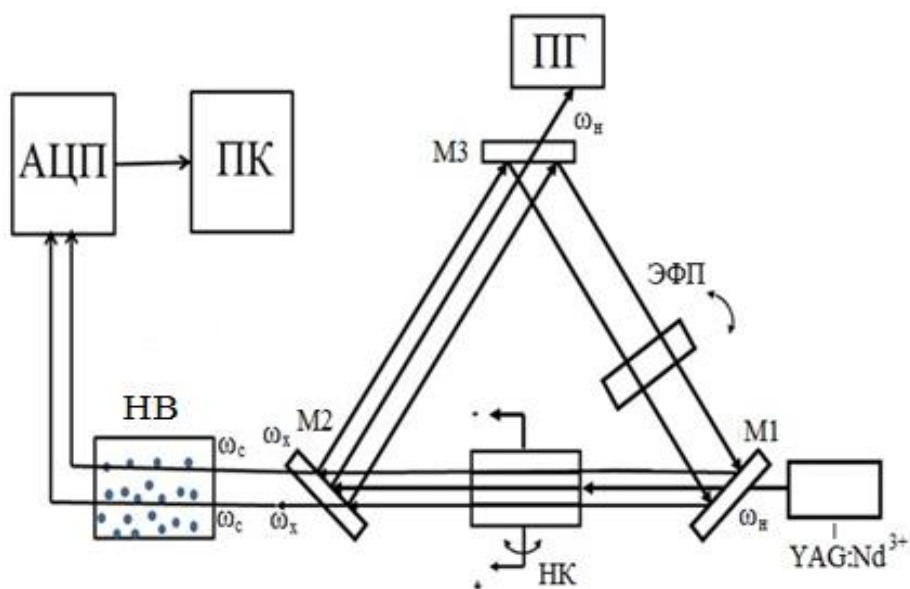


Рис.1 Оптическая схема экспериментальной установки для исследования структуры, состава и концентрации наркотических веществ:

YAG: Nd<sup>3+</sup> - лазер накачки; НК – нелинейный кристалл из LiNbO<sub>3</sub> ; M1, M2, M3 – зеркала; ЭФП – эталон Фабри-Перо; ПГ – поглотитель основного излучения; ω<sub>с</sub> , ω<sub>х</sub> , ω<sub>н</sub> – сигнальная, холостая и основная частоты лазерного излучения; НВ – наркотическое вещество; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК - персональный компьютер

В данной работе приводятся результаты вычислений интенсивности и минимальной энергии излучения, необходимых для детектирования наркотического вещества относящееся к ряду синтетических каннабиноидов JWH-250 (2-(2-метоксифенил)-1-(1-пентил-1H-индол-3-ил) этанон) разработанным автоматизированным дифференциальным комплексом (рис.1). Расчеты выполнены на основе базы данных HITRAN [6].

На рис. 2, 3 приведены сечения поглощения в инфракрасной зоне спектра НВ [7].

На основе интенсивностей были вычислены объемные коэффициенты обратного рассеяния  $\beta(\lambda_0, R)$  на длине волны  $\lambda_0$  и расстоянии до объекта R , а затем получено значение минимальной выходной энергии зондирующего лазера для детектирования минимальной концентрации НВ в соответствии с формулой [1]:

$$E_{Lmin} \approx \frac{2R^2(C/Ш)_{min}}{\beta(\lambda_0, R)\xi(\lambda_0)U(\lambda_0)} \exp \left[ 2 \int_0^R k(\lambda_0, R) dR \right], \quad (1)$$

где C/Ш – отношение интенсивности сигнала к шуму;  $\xi(\lambda_0)$  – коэффициент спектрального пропускания приемной оптической системы;  $U(\lambda_0)$  – параметр чувствительности приемной системы;  $k(\lambda_0, R)$  – коэффициент ослабления на соответствующей длине волны  $\lambda_0$ .

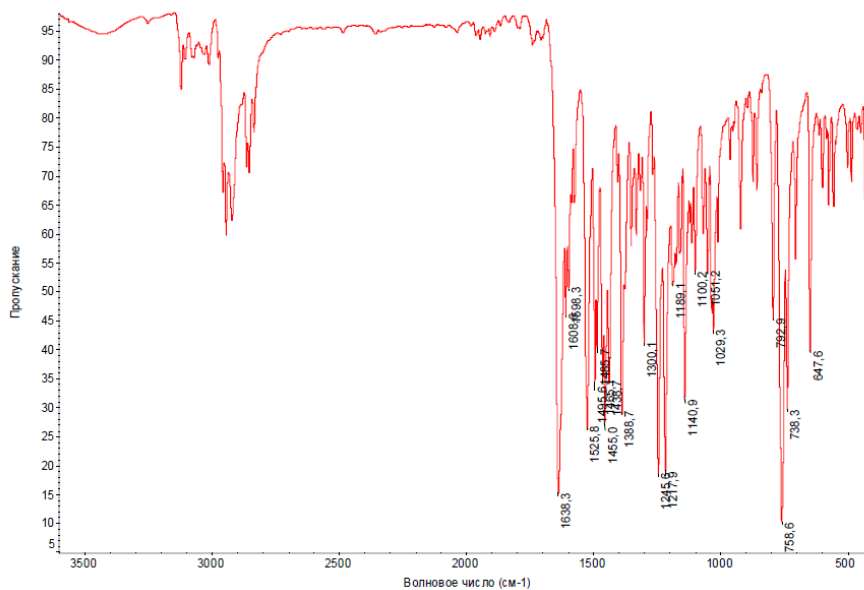


Рис. 2. ИК-спектр JWH-250

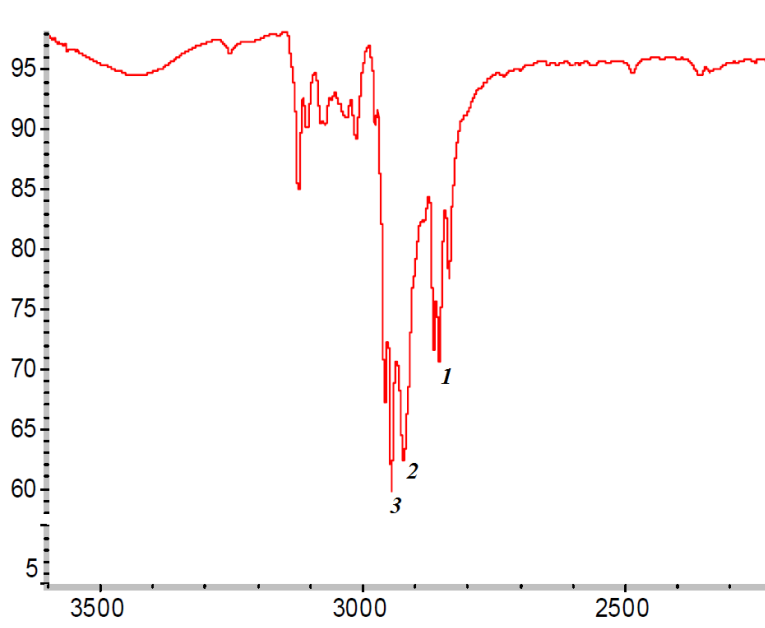


Рис. 3. ИК-спектр JWH-250, увеличена зона спектра около 3 мкм

Учитывая, что отношение интенсивности сигнала к шуму С/Ш для созданной системы (рис. 1) равно 1,5, зная величины параметров лазерной установки ( $\xi(\lambda_0) = U(\lambda_0) = 1$ ), с учетом проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях ( $R = 5$  см) по формуле (1) получим, что минимально необходимая энергия зондирующего лазера будет равна 10 мДж.

По значениям минимальной выходной энергии зондирующего сигнала, объемного коэффициента обратного рассеяния и расстояния до объекта вычис-

лена интенсивность прошедшего сигнала ( $E$ ) через молекулы JWH-250 вещества по формуле Бэра:

$$E = E_{Lmin} e^{-\beta R} . \quad (2)$$

Величина концентрации органических веществ  $N(R)$  в объеме газа, которая может быть определена с помощью метода ДПР, была рассчитана по формуле:

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_A(\lambda_0, \lambda_1)} \left\{ \frac{d}{dR} \left[ \ln \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_0, R)} - \ln \frac{\beta(\lambda_1, R)}{\beta(\lambda_0, R)} \right] + k(\lambda_1, R) - k(\lambda_0, R) \right\}, \quad (3)$$

где  $\sigma_A(\lambda_0, \lambda_1) = \sigma_A(\lambda_0) - \sigma_A(\lambda_1)$  – сечение дифференциального поглощения;  $P(\lambda, R)$  – мощность сигнала на длине волны  $\lambda$ .

Затем вычислено относительное число НВ ( $n$ ) по формуле:

$$n = \frac{N(R)}{N_L}, \quad (4)$$

где  $N_L$  – число Лошмидта.

Результаты вычисления значений полуширины спектров поглощения ( $\Delta\nu_{\text{полг}}$ ) и энергии прошедшего излучения ( $E$ ), а также концентрации молекул ( $N(R)$ ) и относительное число молекул ( $n$ ) НВ приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты расчета спектроскопических параметров

Номер ветви	Полоса поглощения, $\nu$ (см <sup>-1</sup> )	Длина волны, $\lambda$ (мкм)	Полуширина излучения, $\Delta\nu$ (см <sup>-1</sup> )	Коэффициент поглощения, $\alpha$ (см <sup>-1</sup> )	Концентрация НВ
1.	2835,29-2870,59	3,505	40,7	$2,38 \cdot 10^{-12}$	$0,44 \cdot 10^{-14}$
2.	2905,88-2947,06	3,42	42,75	$11,66 \cdot 10^{-12}$	$2,17 \cdot 10^{-14}$
3.	2929,41-2961,76	3,39	26,105	$4,12 \cdot 10^{-12}$	$0,77 \cdot 10^{-14}$

Таким образом, результаты проведенных расчетов показывают, что с помощью разработанного многофункционального автоматизированного параметрического лазерного комплекса, работающего в ближнем и среднем ИК области спектра, можно детектировать молекулы органических веществ с концентрацией на уровне нескольких единиц ppm.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование атмосферы.- М.: Мир, 1987. – 548 с.

2. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия.- М.: Физматгиз, 1962. – 892 с.
3. Кабанов М.В., Андреев Ю.М., Гейко П.П. Мониторинг эмиссии антропогенного и природного метана. Докл. II Международной конференции по сокращению эмиссии метана, Новосибирск, 2000. – 800 с.
4. Ayrapetian V.S. IR lidar based on OPO/ A.V. Nakobyan, G.M. Apresyan, E.M. Poghosyan, A.H. Sahakyan, K.A. Sargsyan, T.K. Sargsyan // SPIE. 2006. v.6160, pp.708 – 713
5. Айрапетян В.С. Внерезонаторная параметрическая генерация с плавной и (или) дискретной перестройкой частоты излучения// Вестник НГУ сер. Физика.- 2009, №3.-С.20 – 24.
6. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.N. e.a. The HITRAN Molecular Database: edition of 1991 and 1992, JQSRT., 1992. v.48, pp.469 – 507.
7. Шевырин В.А., Мелкозеров В.П., Экспертное исследование некоторых наиболее распространенных «структурных аналогов» наркотических средств и психотропных веществ // УФСКН РФ Свердловской области базовый экспертно-криминалистический отдел, ЭКЦ ГУВД по свердловской области, Екатеринбург, 2010 г.

© В. С. Айрапетян, Т. В. Маганакова, 2014



## ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Мария Владимировна Орлова*

ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)216-05-68

Разработана программа для расчета и исследования сигнала на входе приемника теплового излучения, позволяющая получить реализации сигнала в виде графиков, для конкретного положения объекта на фоне заданной подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, поток излучения, плотность излучения, энергетическая яркость, коэффициент излучения, приемник излучения, реализации сигнала.

## INVESTIGATION OF THE THERMAL RADIATION RECEPTOR INPUT SIGNAL

*Maria V. Orlova*

OJSC Scientific Research Institute of Electronic Devices, 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva St., Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)216-05-68

A program for calculating and investigating of the signal from the thermal radiation receptor was developed, that provides signal realization graphics for the given placement of the object on the given backgrounds.

**Key words:** thermal radiation, radiant flux, radiant emittance, radiance, emissivity of a thermal radiator, receptor of radiation, signal realizations.

Для обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности может быть использовано явление контраста обнаруживаемого объекта с фоном. Широко используется явление температурного контраста, обусловленного работой двигателя объекта, а также неравномерного нагрева фона и корпуса объекта на солнце. В пассивной локации объектом обработки являются поля, создаваемые тепловым излучением тел. При этом достоинством пассивного локатора является скрытность работы, а недостатками – малый уровень и случайный характер принимаемых сигналов. Сравнение сигналов проводится на основе яркости источников излучения [1].

Значения энергетической яркости объектов и фонов определяются их температурами. Для определения интегральной плотности излучения можно воспользоваться законом Планка [2].

$$r(\lambda, T) = \frac{C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

где  $r(\lambda, T)$  - спектральная плотность излучения абсолютно черного тела;

$C1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>,  $C2 = 0,01438$  м·К - коэффициенты закона Планка;  
 $T$  - температура, К.

Плотность излучения абсолютно черного тела в заданном спектральном интервале ( $\lambda_1 - \lambda_2$ ) определяется по формуле

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda. \quad (2)$$

Яркость поверхности может быть определена по формуле [2]

$$B = \frac{R \varepsilon_T}{\pi} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_T$  – коэффициент излучения, т.е. отношение энергетической яркости реального тела к энергетической яркости абсолютно черного тела при той же температуре.

При малых значениях угла поля зрения приемника  $\alpha$  лучистый поток на входе приемника теплового излучения в дальней инфракрасной области спектра может быть рассчитан по формуле:

$$\Phi = B(\alpha)^2 S_{ob} \tau_o, \quad (4)$$

где  $S_{ob}$  – площадь объектива

$\tau_o$  – коэффициент ослабления оптической системы приемника.

Существуют различные способы обзора поверхности с целью обнаружения объекта [3]. По формуле (4) может быть рассчитан поток оптического излучения в зависимости от времени при перемещении поля зрения пассивной системы обнаружения по поверхности. В соответствии с методикой расчета потока излучения разработана программа для расчета и исследования сигнала на входе приемника теплового излучения, предназначенного для обнаружения объектов на фоне поверхности по их температурному контрасту относительно подстилающей поверхности. В данной работе рассматривается способ сканирования поверхности по сходящейся спирали. При этом рассматриваются различные варианты расположения объекта в системе координат, связанной с локатором. Объект, подлежащий обнаружению, представлен в виде совокупности отсеков, для каждого из которых задается значение температуры поверхности. Подстилающая поверхность представляет собой совокупность областей с заданным распределением температуры и коэффициентов излучения. По данным литературных источников, коэффициенты излучения фоновых образований и большинства обнаруживаемых объектов отличаются незначительно и близки к единице [2]. Разработанная программа позволяет получить реализации сигнала в виде графиков зависимости мощности сигнала на входе приемника от времени  $\Phi(t)$  (рис. 3, рис. 4), а также изображение обнаруживаемого объекта и области обнаружения (поля зрения) локатора на плоскости (рис. 1, рис. 2).

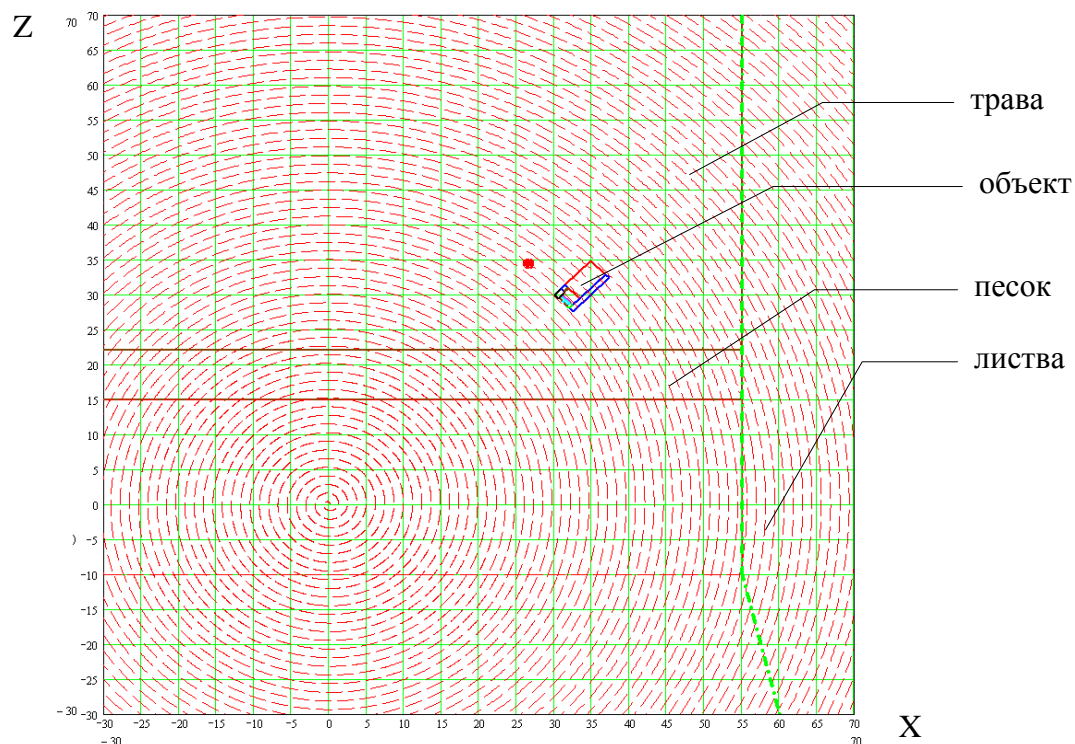


Рис. 1. Схема фона и объекта (1 вариант ориентации объекта - координаты объекта на плоскости в системе координат локатора  $X_0 = 30$  м,  $Z_0 = 30$  м)

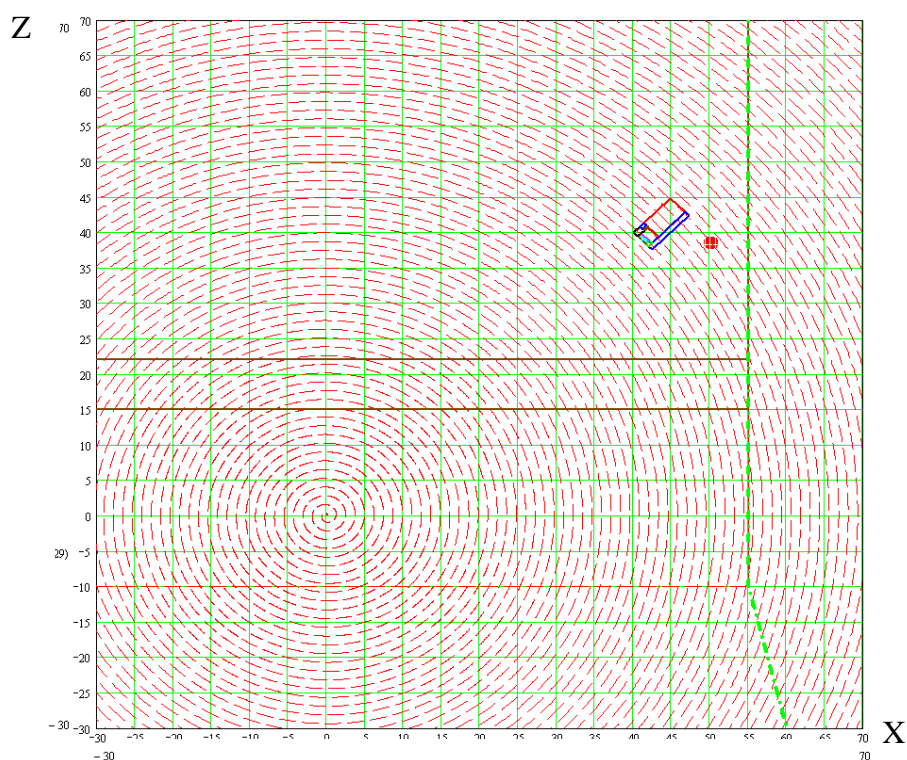


Рис. 2. Схема фона и объекта (2 вариант ориентации объекта - координаты объекта на плоскости в системе координат локатора  $X_0 = 40$  м,  $Z_0 = 40$  м)

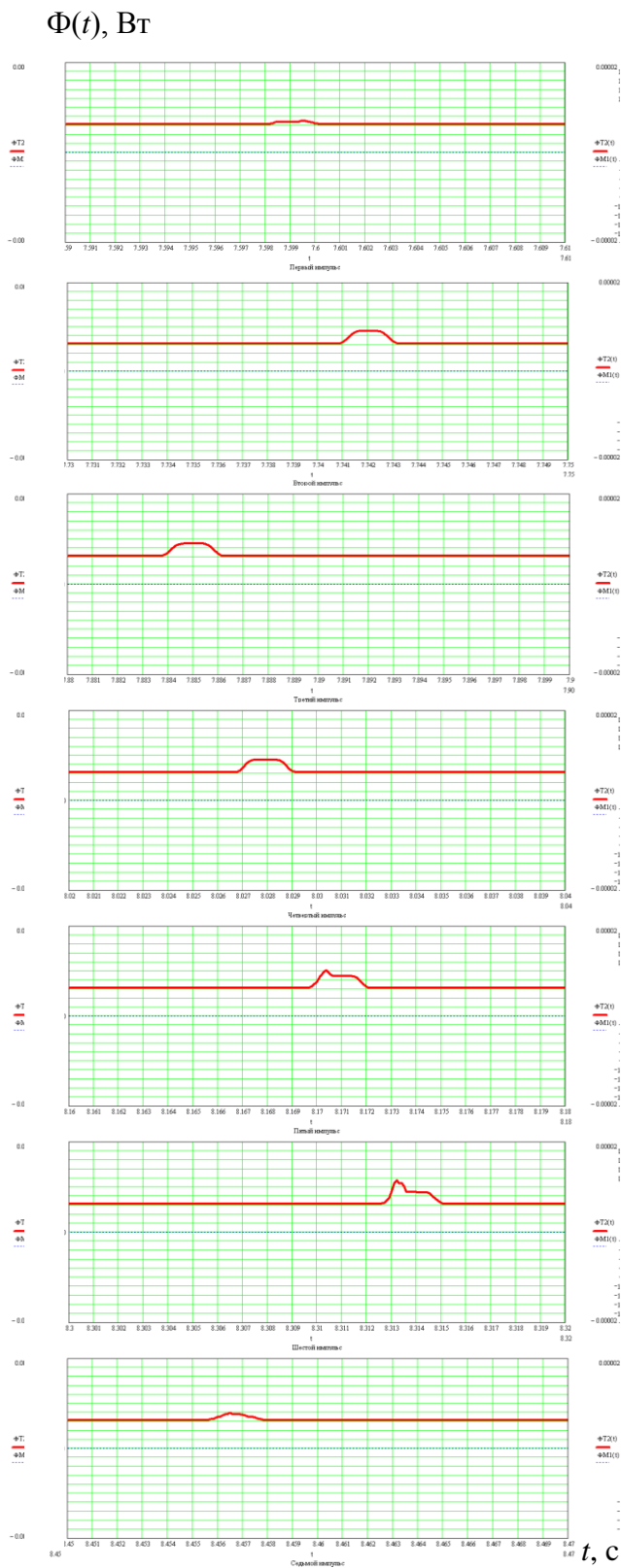


Рис. 3. Импульсы полезного сигнала от объекта при последовательном пересечении поверхности полем зрения локатора (1 вариант ориентации объекта)



Рис. 4. Импульсы полезного сигнала от объекта при последовательном пересечении поверхности полем зрения локатора (2 вариант ориентации объекта)

Приведенные реализации сигналов соответствуют высотам локатора над поверхностью 86 м – 73 м (рис. 1 и рис. 3) и 110 – 96 м (рис. 2 и рис. 4). Из приведенных рисунков видно (рис. 3 и рис. 4), что пятый и шестой импульсы соответствуют пересечению полем зрения наиболее нагретых отсеков объекта, и их интенсивность зависит от степени нагрева отсеков. Расчеты показывают, что при сильном нагреве поверхности фона от солнечных лучей превышение уровня полезного сигнала над сигналом от поверхности может быть недостаточно интенсивным, особенно при остановке двигателя объекта, что может вызвать пропуск полезного сигнала при обнаружении объекта приемником теплового излучения. Также следует отметить, что на меньших высотах и, соответственно, при меньших размерах области обнаружения (поля зрения локатора), наблюдается зависимость интенсивности сигнала от ориентации объекта на плоскости обнаружения. При «неудачной» ориентации объекта поле зрения может лишь частично пересечь нагретый отсек, что может быть причиной пропуска полезного сигнала.

Разработанная программа позволяет исследовать вид сигнала для различных условий обнаружения (могут быть заданы различные варианты ориентации обнаруживаемого объекта, а также различное распределение температур). При этом выявляются «сложные» условия обнаружения, при которых возможны пропуски полезного сигнала, что является крайне нежелательным событием. Программа позволяет зафиксировать положение области обнаружения (и изобразить графически) в момент достижения сигналом максимального значения или некоторого порогового значения. Кроме обнаруживаемого объекта в разработанной программе возможно задание мешающих образований как естественного, так и искусственного происхождения. При необходимости может быть исследован вид сигнала в других спектральных диапазонах и при других характеристиках приемного устройства с целью исключения пропусков полезного сигнала в так называемых «сложных» условиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш.шк., 1990. – 496 с.: ил.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. Радио, 1978. – 400 с.: ил.
3. Козелкин В. В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. – М.: Машиностроение, 1974. – 336 с.

© М. В. Орлова, 2014

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ НА ВХОДЕ ПРИЕМНИКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ**

*Мария Владимировна Орлова*

ОАО «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)216-05-68

Разработана программа для расчета и исследования сигналов на входе каналов приемника инфракрасного излучения в двух спектральных диапазонах, позволяющая получить реализации сигналов в виде графиков и сравнить вид сигналов для различных условий обнаружения объектов.

**Ключевые слова:** инфракрасное излучение, поток излучения, плотность излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость, отражение, реализации сигнала.

## **INVESTIGATION OF THE INPUT SIGNAL FROM INFRARED RADIATION TWO-CHANNEL RECEPTOR**

*Maria V. Orlova*

OJSC Scientific Research Institute of Electronic Devices, 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva St., Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)216-05-68

A program for calculating and investigating of the signals from the infrared two-spectral radiation receptor was developed, that provides signal realization graphics and their comparison for different conditions of the object detection.

**Key words:** infrared radiation, radiant flux, radiant emittance, irradiance, radiance, reflection, signal realizations.

В настоящее время широко применяются системы обнаружения, принимающие сигнал из одной области пространства в различных спектральных диапазонах с целью повышения вероятности обнаружения объектов и повышения помехоустойчивости системы [1]. При решении задачи обнаружения объекта на фоне подстилающей поверхности используется явление контраста. Излучение поверхности в дневное время состоит из отраженного и рассеянного солнечного света и собственного теплового излучения [2]. При длине волны менее 4 мкм большая часть излучения обусловлена отраженной солнечной радиацией, интенсивность которой зависит от положения Солнца, облачности и коэффициента отражения земного покрова. При длине волны более 4 мкм большая часть излучения обусловлена собственным тепловым излучением, которое определяется коэффициентом излучения поверхности и температурой [2]. Таким образом, контраст между объектом и фоном в ближней инфракрасной области спектра зависит от коэффициентов отражения различных материалов и поверхностей (коэффициентов энергетической яркости [2]) и освещенности поверхно-

стей, а в дальней инфракрасной области спектра – в основном от разницы температур между обнаруживаемым объектом и фоном.

Для исследования сигналов в различных спектральных диапазонах (ближняя и дальняя инфракрасные области спектра) разработана программа для расчета мощности сигналов на входе приемника. Программа позволяет рассматривать различные варианты расположения объекта относительно обнаружителя. Объект, подлежащий обнаружению, представлен в виде совокупности отсеков, для каждого из которых задается значение температуры поверхности и коэффициентов отражения. Подстилающая поверхность представляет собой совокупность областей с заданным распределением температуры, коэффициентов излучения и коэффициентов отражения. Также задается энергетическая освещенность поверхности. Пример заданного расположения объекта на фоне поверхности представлен на рис. 1.

Интенсивность сигнала на входе пассивного обнаружителя в дальней инфракрасной области спектра, обусловленная собственным тепловым излучением, определяется энергетической яркостью поверхности.

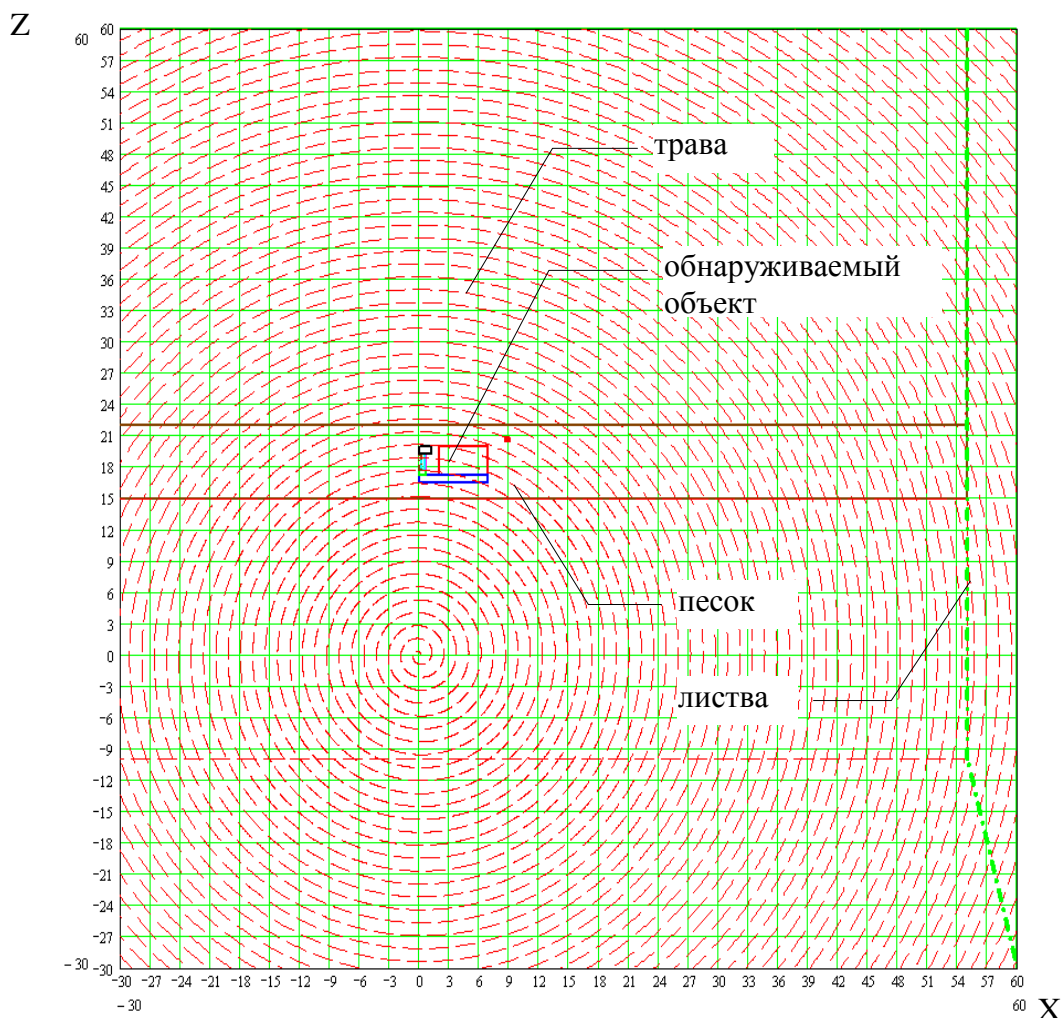


Рис. 1. Схема фона и обнаруживаемого объекта (координаты объекта на плоскости в системе координат локатора  $X_0 = 0$  м,  $Z_0 = 20$  м)

Плотность излучения абсолютно черного тела в спектральном интервале  $(\lambda_1 - \lambda_2)$  определяется по формуле

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda, \quad (1)$$

где  $C1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>,  $C2 = 0,01438$  м·К – коэффициенты закона Планка;  
 $T$  – температура, К.

Энергетическая яркость поверхности в дальнем инфракрасном диапазоне может быть определена по формуле [2]

$$B_{\text{дальн}} = \frac{R \varepsilon_T}{\pi} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_T$  – коэффициент излучения.

При малых значениях угла поля зрения приемника мощность сигнала на входе приемника в дальнем инфракрасном диапазоне может быть определена по формуле:

$$\Phi_{\text{дальн}} = B_{\text{дальн}} (\alpha)^2 S_{ob} \tau_{od}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол поля зрения приемника;

$S_{ob}$  – площадь объектива;

$\tau_{od}$  – коэффициент ослабления оптической системы приемника в дальнем инфракрасном диапазоне.

Сигнал на входе приемника в ближней инфракрасной области спектра, обусловленный отраженным солнечным излучением, зависит от освещенности (облученности поверхности) и коэффициента энергетической яркости (для диффузно отражающей поверхности коэффициент энергетической яркости равен коэффициенту отражения [2]). Энергетическая яркость поверхности может быть определена по формуле [2]

$$B_{\text{ближн}} = \frac{E\rho}{\pi}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения поверхности;

$E$  – освещенность поверхности (зависит от положения Солнца и облачности).

Лучистый поток в этом случае при малых значениях угла поля зрения приемника рассчитывается по формуле

$$\Phi_{\text{ближн}} = B_{\text{ближн}} (\beta)^2 S_{ob} \tau_{ob}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – угол поля зрения приемника;

$S_{ob}$  – площадь объектива;

$\tau_{ob}$  – коэффициент ослабления оптической системы приемника в ближнем инфракрасном диапазоне.



Примеры реализаций сигналов на входе приемника приведены на рис. 2.

$\Phi_{дальн}(t)$ , Вт

$\Phi_{ближн}(t)$ , Вт

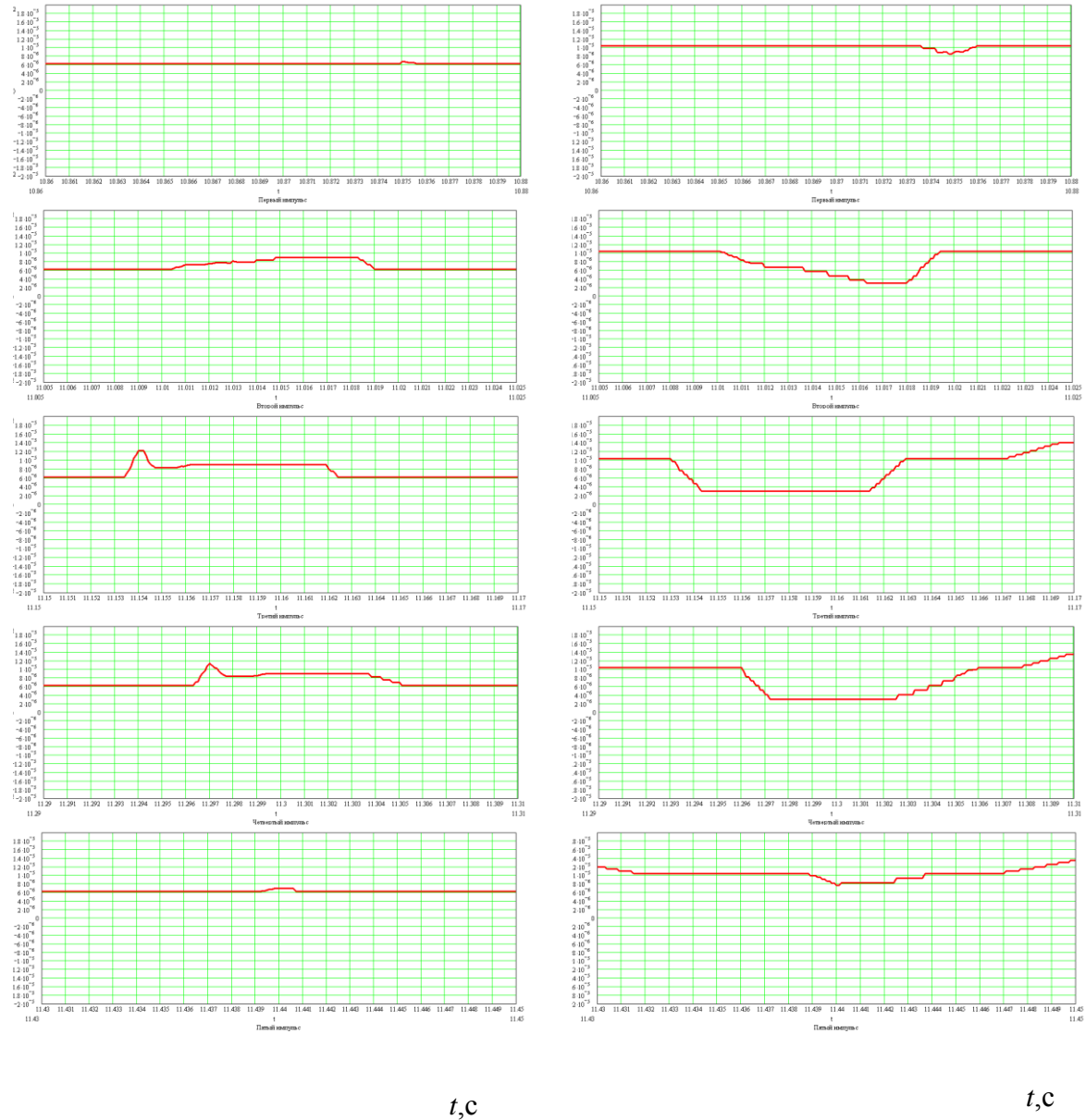


Рис. 2. Сигнал от объекта при последовательном пересечении поверхности полем зрения пассивного обнаружителя для случая расположения объекта в соответствии с рис. 1 (соответствует высотам локатора над поверхностью 36 – 28 м)

Разработанная программа позволяет исследовать сигналы на входе приемника инфракрасного излучения в различных спектральных диапазонах при перемещении поля зрения обнаружителя по поверхности в соответствии с задан-

ным законом сканирования (приведены результаты для сканирования поверхности по сходящейся спирали). Также возможно отобразить графически положение области обнаружения (поля зрения локатора) в момент достижения наибольшего контраста объекта относительно подстилающей поверхности в различных спектральных диапазонах.

Из приведенных на рис. 2 реализаций сигналов видно, что в случае отсутствия ярко выраженного контраста теплового излучения наблюдается контраст в отраженном солнечном излучении (при условии, что коэффициент отражения фоновых образований больше коэффициента отражения поверхности обнаруживаемого объекта). Однако, такой контраст характерен не для всех объектов, подлежащих обнаружению.

Разработанная программа позволяет исследовать сигналы на входе приемника инфракрасного излучения в различных спектральных диапазонах, изменяя условия освещенности, значения коэффициентов отражения различных поверхностей, степень нагрева и ориентацию обнаруживаемого объекта и фоновых образований. При этом могут быть выявлены сложные условия обнаружения объектов. Полученные данные могут быть использованы для усовершенствования существующих и разработки новых алгоритмов обнаружения и устройств обнаружения объектов на фоне поверхности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орлова М.В. Обработка сигналов в комплексированных системах ближней локации: учеб. пособие / М.В. Орлова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 76 с.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. Радио, 1978. – 400 с., ил.

© М. В. Орлова, 2014

## О ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

### *Валерий Иванович Ознобихин*

ОАО «НИИЭП», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, старший научный сотрудник, тел. (383)216-05-48, e-mail: ozval@mail.ru

### *Валерий Борисович Ромодин*

ОАО «НИИЭП», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (383)216-05-48, e-mail: romodin@ngs.ru

### *Татьяна Викторовна Ячmeneва*

ОАО «НИИЭП», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, инженер 2-й категории, тел. (383)216-05-48, e-mail: mtv1688-09h@yandex.ru

С помощью генетического алгоритма решается задача оптимизации волноводно-щелевых антенн. Приводятся численные данные оптимизации двенадцати элементной антенны.

**Ключевые слова:** проектирование, волноводно-щелевая антенна, генетический алгоритм.

## ABOUT THE DESIGN OF WAVEGUIDE-SLOT ANTENNA

### *Valery I. Oznobikhin*

JSC «НИИЭП», 630005, Russia, Novosibirsk, ul. Pisarev, 53, Senior Researcher, tel. (383)216-05-48, e-mail: ozval@mail.ru

### *Valery B. Romodin*

JSC «НИИЭП», 630005, Russia, Novosibirsk, ul. Pisarev, 53, head of the laboratory, tel. (383)216-05-48, e-mail: romodin@ngs.ru

### *Tatiana V. Yachmeneva*

JSC «НИИЭП», 630005, Russia, Novosibirsk, ul. Pisarev, 53, an engineer second category, tel. (383)216-05-48, e-mail: mtv1688-09h@yandex.ru

Using genetic algorithm to solve the problem of optimization of the waveguide-slot antennas. Numerical optimization data twelve element antenna.

**Key words:** design, waveguide-slot antenna, the genetic algorithm.

Основная проблема проектирования волноводно-щелевых антенн (ВЩА) – это выбор размеров щелей и их расположение на стенке волновода. Один из методов ее решения рассмотрен в статье [1]. Он состоит из трех этапов. Вначале синтезируется амплитудно-фазовое распределение (АФР) тока на щелях по заданным требованиям к ДН, затем по синтезированной АФР находят длины и смещения щелей с использованием приближенной модели ВЩА в виде каскадного соединения 4-х полюсников. На конечном этапе происходит оптимизация целевой функции, составленной с учетом всех требований к характеристикам

антенны, на основе строгой модели ВЩА [2]. Причем, в качестве начального приближения берется решение, полученное из приближенной модели. Для оптимизации использовались как градиентные, так и прямые алгоритмы.

Заметим, что целевая функция, используемая при оптимизации, является нелинейной и, следовательно, многоэкстремальной. Поэтому, если брать произвольное начальное приближение, то наиболее вероятно происходит выход на локальный экстремум. Начальное же приближение, полученное на втором этапе, находится вблизи глобального экстремума. Но даже такое начальное приближение часто не приводит к нужному результату при использовании градиентных, или прямых методов минимизации [3].

В работе [3] рассмотрен прямой метод оптимизации на основе генетического алгоритма (ГА). Как известно, ГА является одним из стохастических эволюционных алгоритмов, применяемых для поиска глобальных экстремумов функции многих переменных [4]. Как показано в [3], с помощью ГА удается получить приемлемые результаты при оптимизации ВЩА со случайных начальных приближений, минуя первые два этапа. Но, многочисленные расчеты показали, что требуемые решения достигаются за несколько тысяч итераций, что не столь существенно, если время расчета целевой функции достаточно небольшое. Если же анализ целевой функции длителен, например, как для ВЩА с диэлектрическим покрытием, то время оптимизации существенно возрастает.

В данной статье предлагается использовать смешанный метод. В случайный набор решений ГА добавляется приближение, полученное на втором этапе, упомянутого выше метода. Тогда все случайные варианты будут концентрироваться вокруг него и вероятность выхода на глобальный экстремум возрастает, а время расчета, соответственно, уменьшается. При таком подходе упрощается и целевая функция. В этом случае ее можно представить в виде:

$$f = c_1 \cdot |\theta_{0t} - \theta_{0p}| / \theta_{0t} + c_2 \cdot |\Delta\theta_t - \Delta\theta_p| / \Delta\theta_t + c_3 \cdot |U_{1t} - U_{1p}| / U_{1t} + c_4 \cdot |U_{2t} - U_{2p}| / U_{2t} \quad (1)$$

где  $\theta_{0t}, \Delta\theta_t$  - заданные (требуемые) угол наклона и ширина максимума (по уровню  $-3\text{дБ}$ ) ДН,

$\theta_{0p}, \Delta\theta_p$  - расчетные значения угла наклона и ширины максимума ДН,

$U_{1t}, U_{1p}$  - заданные и расчетные значения УБЛ в передней зоне излучения,

$U_{2t}, U_{2p}$  - заданные и расчетные значения УБЛ в задней зоне излучения,

$c_1, c_2, c_3, c_4$  - весовые коэффициенты (Лагранжа).

Если требуемый уровень боковых лепестков в передней и задней зоне одинаковый, то последние два члена в (1) можно заменить одним, с максимальным расчетным УБЛ.

Контрольные параметры ( $\theta_{0p}, \Delta\theta_p, U_{1p}, U_{2p}$ ) рассчитываются по строгой матричной модели ВЩА [2].

Основными оптимизационными параметрами являются, как уже указывалось выше, длина ( $L$ ) и смещение ( $X$ ) щелей. Для более удобного применения ГА представим эти параметры в виде:

$$X_k = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \cdot XP_k ,$$

$$L_k = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \cdot LP_k , \quad (2)$$

где  $X_k, L_k$  - смещение и длина  $k$ -ой щели,

$X_{\min}, X_{\max}, L_{\min}, L_{\max}$  – максимальные и минимальные значения, которые могут принимать  $X$  и  $L$ ,

$XP_k, LP_k$  – параметрические векторы, компоненты которых требуется найти в процессе оптимизации, численные их значения лежат в интервале  $[0 \div 1]$ .

Фактически, целевая функция (1) зависит от параметрических векторов  $XP, LP$  и задача проектирования заключается в нахождении их оптимальных значений, т.е. таких значений, которые реализуют ВЩА с требуемыми характеристиками.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию 12-ти элементной переменного-фазной решетки с диэлектрическим слоем. В результате приближенного синтеза были получены следующие параметры щелей (в долях длины волны):

$$X = [0.2873 \ 0.3018 \ 0.2779 \ 0.3162 \ 0.2640 \ 0.3332 \ 0.2493 \ 0.3505 \ 0.2348 \ 0.3656 \ 0.2317 \ 0.3445].$$

Длина всех щелей одинакова и равна:  $L = 0.2232$ . Соответствующая ДН приведена на рис.1. Видно, что УБЛ в задней зоне -22 дБ. (требуемый -25 дБ), а передний фронт главного лепестка завален. После применения ГА получены следующие результаты:

$$X = [0.2873 \ 0.3018 \ 0.2779 \ 0.3162 \ 0.2640 \ 0.3332 \ 0.2493 \ 0.3461 \ 0.2348 \ 0.3656 \ 0.2317 \ 0.4773], \quad L = 0.2260.$$

Видно, что изменились смещения восьмой и двенадцатой щелей, а также возросла немного длина щелей, но размеры их остались одинаковы. Соответствующая ДН приведена на рис. 2. При этом, уровень БЛ снизился до -26.6 дБ, а передний фронт стал круче. Для этого, вместо требования к ширине ДН на уровне -3 дБ, пришлось минимизировать ширину ДН по уровню -100 дБ.

Если исходить из случайных начальных приближений, то, как показали расчеты, за такое же количество итераций (500-600) подобные результаты получить не удастся.

Таким образом, предложенная методика оптимизации является перспективной и может быть использована при проектировании ВЩА.

В заключение, авторы благодарят В.С. Кулика за ценные советы и помощь в отработке программы расчета.

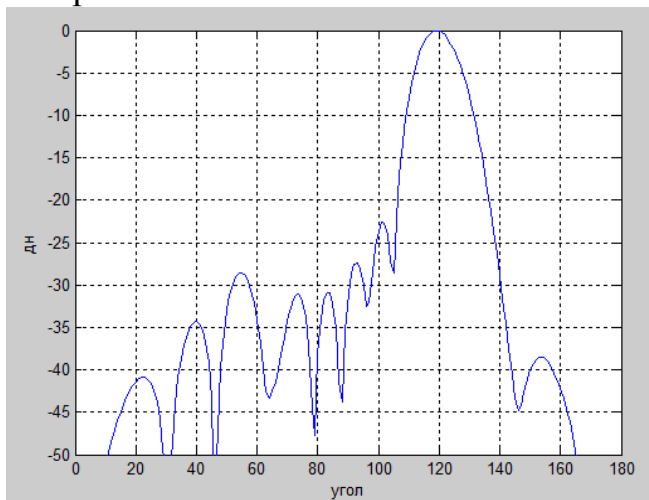


Рис. 1

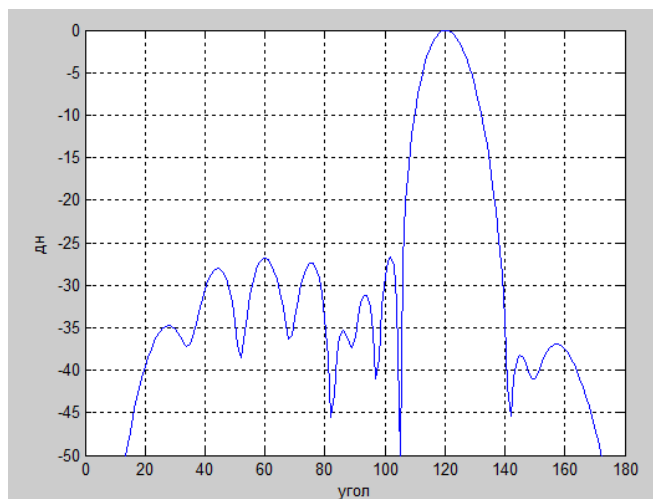


Рис. 2

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ознобихин В.И., Ромодин В.Б. Метод оптимизации волноводно-щелевой антенны / Тезисы докл. Всесоюзного научно-технического семинара «Математическое моделирование и создание САПР для расчета, анализа и синтеза антенных систем и их элементов»; Ростов Великий, 1990.

2. Ромодин В.Б. Матрица рассеяния волноводно-щелевой антенны // Системы и средства передачи информации / Сборник научных трудов учебных институтов связи.-Л.:1985. С.49-54.

3. Ознобихин В.И., Ромодин В.Б. Оптимизация волноводно-щелевых антенн методом генетического алгоритма: сборник трудов МНТК "Четвертые Уткинские чтения". Секция "Ракетно-космическая техника и технология". Том 1, сс.230-232. БГТУ "Военмех", Санкт-Петербург, Россия, 2009 г.

4. Батищев Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач / Под ред. Львовича Я.Е.: учеб. пособие. Воронеж, 1995.

УДК 621.396

## РАЗРАБОТКА АНТЕННЫ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**Виталий Сергеевич Кулик**

ОАО «НИИ Электронных Приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, инженер, тел. (383) 224-24-79

**Валерий Борисович Ромодин**

ОАО «НИИ Электронных Приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (383) 224-24-79

Разработан компактный излучатель с широкой диаграммой направленности в обеих плоскостях, предназначенный для использования в мобильных устройствах. Излучатель представляет собой щель в центре верхней плоскости круглого диэлектрического резонатора. Возбуждение резонатора осуществляется снизу через коаксиальную линию, внедрённую в излучатель в плоскости симметрии со сдвигом от центра резонатора.

**Ключевые слова:** круглый диэлектрический резонатор, щелевая антенна, оптимизация.

## MOBILE DEVICE ANTENNA DESIGN

**Vitaly S. Kulik**

OJSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, engineer, tel. (383)224-24-79

**Valery B. Romodin**

OJSC «Scientific Research Institute of Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, laboratory chief, tel. (383)224-24-79

The compact antenna with a broad far-field pattern in both planes are designed for use in mobile devices. The emitter is a slot in the center of the top plane of the circular dielectric resonator. Excitation is carried out from the bottom plane of the resonator via the coaxial feed line, embedded in the plane of symmetry offset from the center up to top plane of the antenna.

**Key words:** circular dielectric resonator, slot antenna, optimization.

Для использования в мобильных устройствах требуется создать антенну с линейной поляризацией и широкой диаграммой направленности. Из простейших антенн нужными характеристиками обладает щелевой излучатель. Для упрощения изготовления и уменьшения габаритных характеристик щель размещается на круглом диэлектрическом резонаторе, изготовленном по технологии SIW (substrateintegratedwaveguide).

Зависимость радиуса резонатора от частоты основного резонанса имеет следующий вид[1].

$$r(f) = \frac{c \cdot 2,405}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где  $f$  – рабочая частота,

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала заполнения резонатора,

$c$  – скорость света.

Через найденный радиус и диаметр с шагом металлизированных отверстий находим радиус расположения отверстий [2].

$$r_{SIW} = r + \frac{d^2}{0,95 \cdot s}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр металлизированных отверстий,

$s$  – шаг между отверстиями.

Длина резонансной щели с учётом укорочения на диэлектрике (3):

$$l_{рез} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{2 \cdot (\varepsilon + 1)}}, \quad (3)$$

По приведённым выше формулам рассчитаны предварительные параметры излучателя для работы в S диапазоне и создана его модель (рис. 1). Оптимизацией положения точки подключения коаксиального кабеля, диаметра резонатора и длины щели излучатель настроен на требуемую частоту.

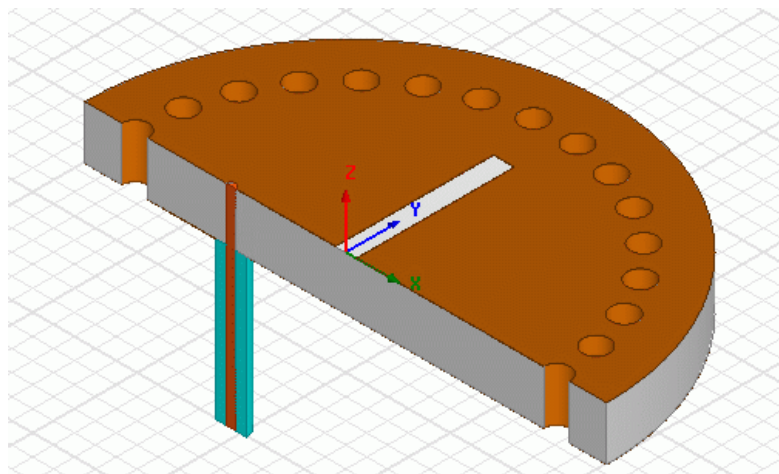


Рис. 1. Внешний вид резонатора с щелью

Полученная конструкция подвергнута оптимизации для точной настройки на резонансную частоту.

Для проверки результатов теоретических расчётов изготовлены пять экземпляров образцов излучателей. Диаграммы направленности антенн измерены в безэховой камере.



На рис. 2, 3 представлены результаты измерений диаграмм направленности антенн в сравнении с теоретическими расчётами.

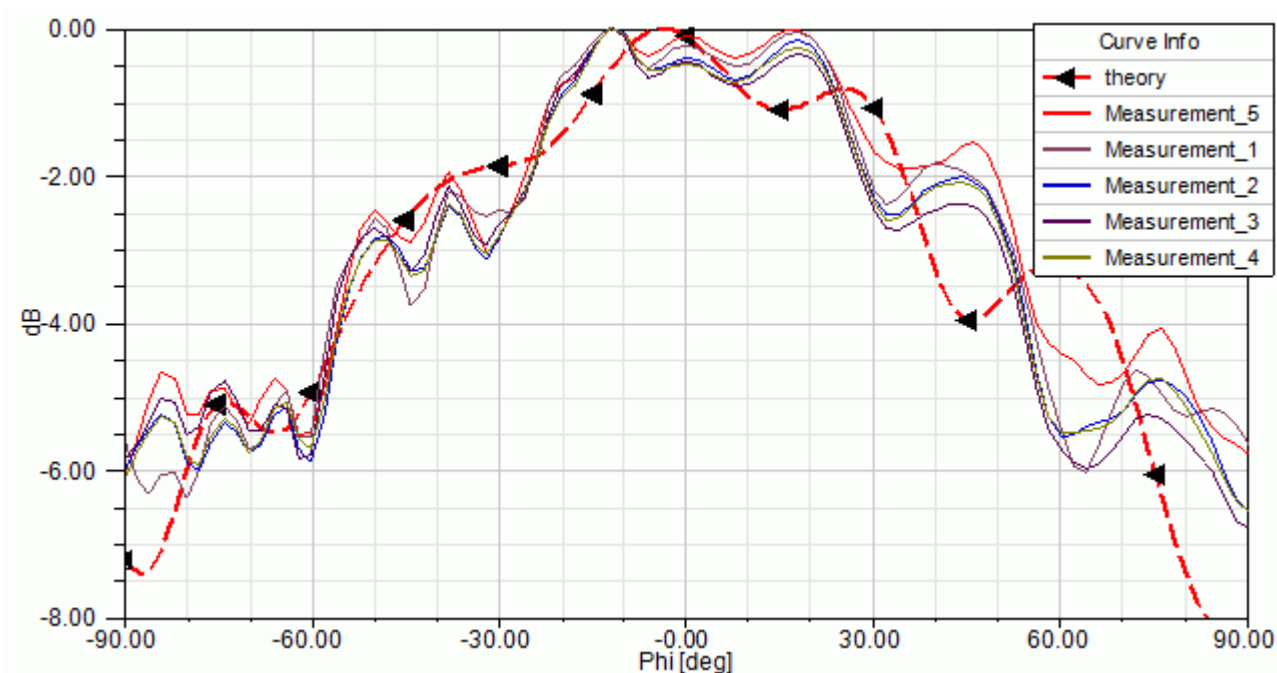


Рис. 2. Сечение ДН в Е-плоскости

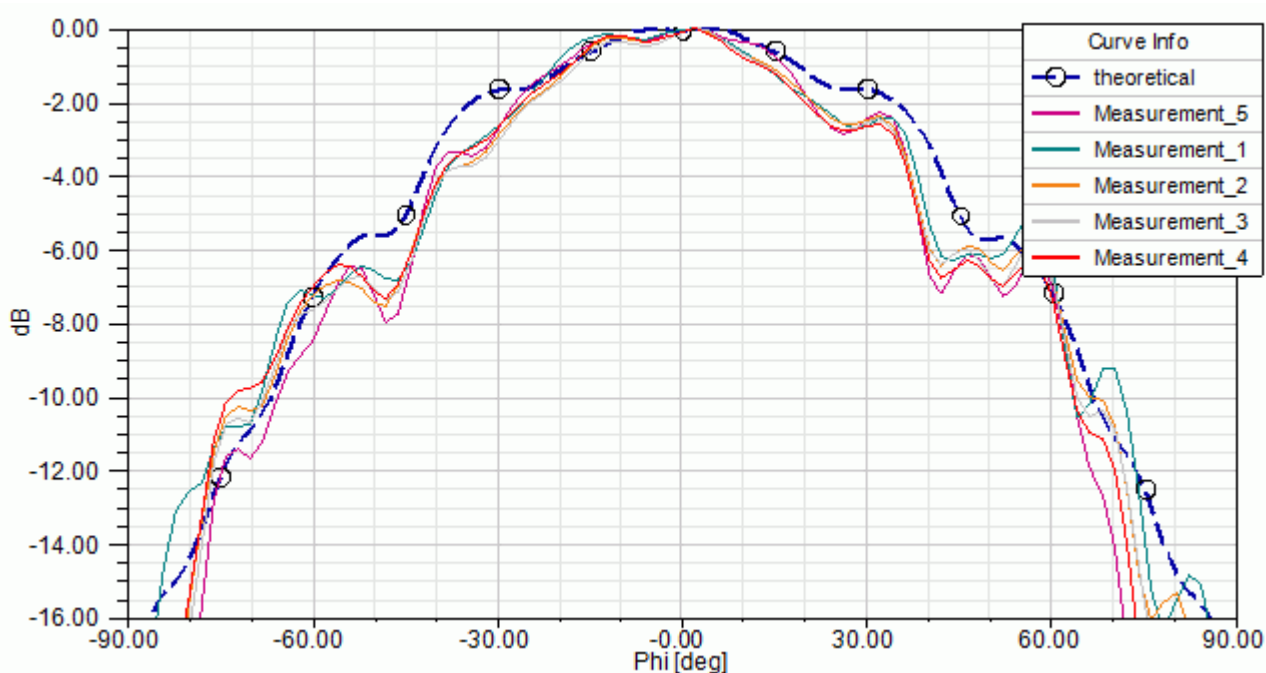


Рис. 3. Сечение ДН в Н-плоскости

Коэффициент усиления антенны на центральной частоте составил 3,5 дБ. Полоса рабочих частот по уровню КСВН  $\leq 2$  составила 320 МГц.

Результаты измерений хорошо согласуются с вычислениями. Расхождение диаграмм в Е-плоскости объясняется наличием возможных отклонений диэлектрических параметров резонатора от расчётных.

Разработанная антенна представляет собой завершённую конструкцию и может быть использована в мобильных устройствах различного назначения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы электродинамики: учебное пособие для вузов / Н.Н. Фёдоров – М.: Высшая школа, 1980. – 399с., ил.
2. Analytical equivalence between substrate-integrated waveguide and rectangular waveguide / W. Che, K. Deng, D. Wang and Y.L. Chow // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2008. – Вып. 2 (1). – С. 35-41.

© В. С. Кулик, В. Б. Ромодин, 2014

УДК 681.78

## **ПРИМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДНО-БАЗОВОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКАХ**

*Андрей Геннадьевич Батурин*

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, начальник лаборатории, тел. (383)216-05-93, e-mail: rock\_@mail.ru

В статье приведен обзор амплитудного и амплитудно-базового методов обнаружения в оптоэлектронных датчиках. Рассмотрены вопросы применения амплитудно-базового метода и расчёта параметров датчика на его основе. Приведены результаты расчёта.

**Ключевые слова:** оптико-электронные устройства, обнаружение объектов, амплитудно-базовый метод обнаружения, триангуляция, дальнометрия.

## **USAGE OF AMPLITUDE-TRIANGULATION DETECTION METHOD IN OPTOELECTRONIC SENSORS**

*Andrey G. Baturin*

Joint Stock Company «Research institute of electronic devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, head of laboratory, tel. (383)216-05-93, e-mail: rock\_@mail.ru

This paper presents a review of amplitude and amplitude-triangulation detection methods, considers amplitude-triangulation method usage issues and sensor design rules.

**Key words:** optical-electronic devices, object detection, amplitude-triangulation detection method, triangulation, range measuring.

Оптоэлектронные датчики, основанные на амплитудном методе обнаружения, получили широкое распространение. В данном методе анализируется единственный параметр принятого сигнала – его амплитуда. Амплитуда принятого сигнала зависит не только от дальности до отражающей поверхности, но и от её коэффициента отражения, угла падения излучения на поверхность, затухания сигнала в атмосфере и др. [1] Вследствие этого, система не имеет достоверной информации о дальности до отражающей поверхности и, как следствие, не позволяет разделить область обнаружения на несколько зон, разнесенных по дальности. Это приводит к невозможности селекции амплитудным датчиком объекта, расположенного на фоне другой отражающей поверхности.

В работе [2] предпринята попытка выделения достоверной информации о дальности до отражающей поверхности из амплитуды принятого сигнала, используя априорную информацию об отражательных свойствах поверхности. Для описания отражательных свойств поверхности авторы используют модель

освещения Фонга, известную по компьютерной графике. При этом мощность принятого сигнала можно определить по формуле:

$$P_{np}(R) = \frac{S_{вх} \cdot [C_0 \cdot \cos(\alpha) + C_1 \cdot \cos(2\alpha)]}{4 \cdot R^2}, \quad (1)$$

где  $P_{np}$  – мощность принятого сигнала, Вт;

$S_{вх}$  – площадь входного зрачка, м<sup>2</sup>;

$C_0, C_1$  – коэффициенты, учитывающие отражающие свойства поверхности и мощность источника излучения, Вт;

$\alpha$  – угол между вектором излучения и нормалью к поверхности;

$R$  – расстояние до отражающей поверхности, м.

В датчике [2] коэффициенты  $C_0$  и  $C_1$  определяются в ходе первоначального обучения датчика для данной отражающей поверхности, а угол  $\alpha$  вычисляется динамически исходя из амплитуды сигналов  $n$  смежных приемо-передающих каналов многоканального датчика.

Несмотря на высокие достигнутые результаты, реализовать данный метод в полностью автоматических датчиках не представляется возможным из-за необходимости первоначального обучения для определения свойств конкретной отражающей поверхности. Для исключения этапа первоначального обучения в [2] предложено рассчитывать коэффициенты  $C_0$  и  $C_1$  исходя из первичной информации о дальности от датчиков, основанных на другом физическом принципе, например, от ультразвуковых датчиков.

Другим способом получения информации о дальности является применение амплитудно-базового метода [1]. В основе метода лежит эффект перемещения изображения тела свечения по фоточувствительным элементам фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости своего объектива [3]. Особенность данного метода заключается в том, что расположение изображения тела свечения на фоточувствительных элементах фотоприемника зависит только от дальности до отражающей поверхности и от конструктивных параметров датчика. Фактически, этот метод является реализацией триангуляционного метода дальнометрии. В данном методе дальность до отражающей поверхности определяется как сторона треугольника по известной второй стороне (базовое расстояние) и прилежащей к ней углам, один из которых задан конструктивно, а второй измеряется датчиком по положению изображения тела свечения на многоэлементном фотоприемнике. Причём с увеличением измеряемого угла также увеличиваются его приращения, связанные с изменением дальности.

Использование в оптоэлектронных датчиках матричных фотоприемников на основе ПЗС или ПЗИ матриц позволяет с высокой точностью вычислить текущую дальность до отражающей поверхности. В то же время они обладают низкой скоростью считывания, чувствительностью к фоновым засветкам и невозможностью стробирования принимаемого сигнала [4]. Ввиду этого, в качестве фотоприемника используются многоэлементные фотодиоды или многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) с индивидуальными выходами каждого фоточувствительного элемента. Ограниченное количество фоточувствительных элементов приводит к

тому, что датчик вместо информации о текущей дальности до отражающей поверхности обладает только информацией о расположении обнаруживаемого объекта в одной из зон, соответствующей фоточувствительному элементу.

Важнейшей характеристикой оптоэлектронного датчика является дистанционная характеристика – зависимость амплитуды принятого сигнала от дальности, построенная для каждого из фоточувствительных элементов фотоприемника. Мощность принятого сигнала для каждого из фоточувствительных элементов фотоприемника для диффузно-отражающей поверхности определяется формулой (2). Для произвольной отражающей поверхности также возможно использование модели Фонга, аналогично [2].

$$P_{np}(R) = \frac{P_0 \cdot \rho \cdot \cos(\theta) \cdot S_{вх} \cdot K_S(R)}{2 \cdot \pi \cdot R^2}, \quad (2)$$

где  $P_{np}$  – мощность принятого сигнала, Вт;

$P_0$  – излучаемая мощность, Вт;

$S_{вх}$  – площадь входного зрачка приемного объектива, м<sup>2</sup>;

$K_S(R)$  – коэффициент перекрытия приемной и передающей диаграмм направленности;

$\rho$  – коэффициент отражения поверхности.

$\theta$  – угол между вектором излучения и нормалью к поверхности;

$R$  – расстояние до отражающей поверхности, м.

Ключевым моментом расчёта дистанционной характеристики является расчёт коэффициента перекрытия приемной и передающих диаграмм направленности  $K_{пр}(R)$ , поскольку он оказывает наибольшее влияние на форму дистанционной характеристики. В настоящее время не существует методики, позволяющей достоверно рассчитать коэффициент  $K_S(R)$  в области малых дальностей вследствие большого количества трудноучитываемых факторов (переотражения внутри приемного тракта, приводящие к снижению контраста изображения, переотражения между датчиком и объектом и т.д.). В частности, методики, приведенные в [1] и [3], дают довольно грубую оценку  $K_S(R)$ , так как они не учитывают ни абберации приемного и передающего объективов датчика, ни гауссово распределение интенсивности излучения.

Значительно сократить погрешность расчёта  $K_S(R)$  можно при переходе от представления приемной и передающей диаграмм направленности в виде прямоугольных функций (в декартовой системе координат), как в методиках [1] и [3] к расчётным или экспериментальным распределениям мощности излучения (чувствительности фотоприемника). Определение  $K_S(R)$ , а точнее  $K_S(\psi(R))$ , сводится к вычислению свёртки распределений нормированной мощности излучения и чувствительности фотоприемника.

В соответствии с описанной методикой была рассчитана дистанционная характеристика оптоэлектронного датчика на амплитудно-базовом принципе действия с разделением зоны обнаружения по дальности на 2 области. Расчётная дистанционная характеристика приведена на рис. 1.

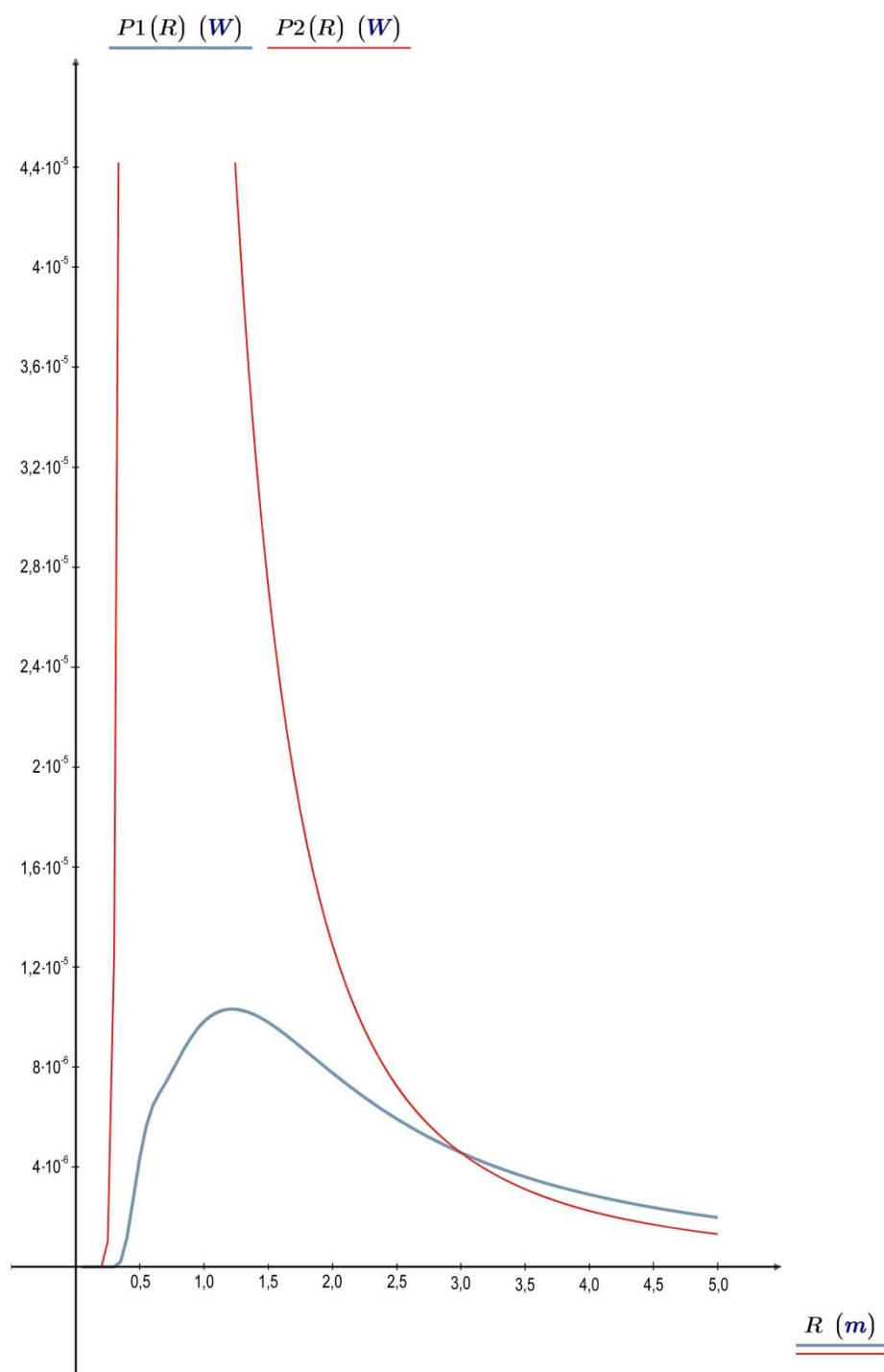


Рис. 1. Расчётная дистанционная характеристика оптоэлектронного датчика:  
 $R$  – дальность,  $P1(R)$ ,  $P2(R)$  – сигналы на входе фоточувствительных элементов ФПУ

На дальности  $R=3$  м значения сигналов  $P1(R)=P2(R)=4,6 \cdot 10^{-6}$  Вт, в то время как для данного ФПУ пороговая мощность для каждого из элементов составляет  $P_{пор}=3 \cdot 10^{-8}$  Вт. На основании этих данных по методике [5] была проведена оценка разности сигналов  $P1(R)$  и  $P2(R)$ , обеспечивающей вероятность пропуска сигнала  $P_{пр}<0,1\%$  при условии оптимальной фильтрации входных сигналов. Эта разность сигналов определяет зону неопределенности между областью

принятия положительного решения ( $R < 3$  м) и областью принятия отрицательного решения ( $R > 3$  м), связанной с влиянием собственных шумов ФПУ. По результатам оценки значение  $\Delta P = 1,6 \cdot 10^{-7}$  Вт, что соответствует  $\Delta R = \pm 0,2$  м.

Последующая экспериментальная проверка показала хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных на дальностях свыше 1,2 м. Наибольшее расхождение между расчётными и экспериментальными данными наблюдается на дальности меньше 0,5 м, заключающаяся в отсутствии у образца датчика «мёртвой» зоны. Данное отличие связано со сложностью достоверно учесть все факторы, влияющие на  $K_S(R)$  в области малых дальностей. Дальнейшее повышение точности расчёта возможно с использованием методики трассировки хода лучей через всю систему, что сопряжено со значительными вычислительными трудностями.

На основании вышеизложенного могут быть сделаны следующие выводы:

1. Амплитудно-базовый метод благодаря триангуляционному способу измерения дальности обеспечивает высокую точность.
2. Методики расчёта дистанционной характеристики обеспечивают достаточно высокую точность в области равносигнальных зон, обеспечивающих разделение зоны обнаружения по дальности на области, в которых датчиком принимаются различные решения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лёгкий В.Н., Топорков В.Д. Лазерные системы ближней локации: оптоэлектронные датчики. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 152 с.
2. P.M. Novotny, N.J. Ferrier. Using Infrared Sensors and the Phong Illumination Model to Measure Distances. URL: [http://paulnovo.us/files/ICRA99\\_Novotny.pdf](http://paulnovo.us/files/ICRA99_Novotny.pdf) (дата обращения: 13.10.2013).
3. Мусьяков М.П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. М.: Радио и Связь, 1991. - 168 с.
4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов. 4-е изд. – М.: Логос, 1999. - 480 с.
5. Шестов Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. – М.: Советское радио, 1967. - 347 с.

© А. Г. Батулин, 2014

## **МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫЕ МНОГОФАКТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОДНО ИЗ ВОЗМОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ БУДУЩЕГО АУТЕНТИФИКАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ**

*Геннадий Александрович Сырецкий*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры наносистем и оптотехники, тел. 8913-896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

На основе существующих предпосылок впервые выдвигается необходимость создания мультимодельных многофакторных технологий для идентификации и аутентификации.

**Ключевые слова:** аутентификация, идентификация, мультимодельный, многофакторный, технология.

## **MULTIMODEL MULTIFACTOR TECHNOLOGY AS ONE OF THE POSSIBLE DIRECTIONS THE FUTURE IDENTIFICATION AND AUTHENTICATION**

*Gennady A. Syretsky*

Siberian State Academy of Geodesy, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Ph.D. (Engineering), Prof. of Department Nanosystems and Optotechnology, tel. 8-913-896-35-87, e-mail: sga-2002@mail.ru

On the basis of existing preconditions for the first time put forward the necessity of creating a multi-model multi-factor technologies for identification and authentication.

**Key words:** authentication, identification, multi-model, multi-factor, technology.

Неоспорим факт того, что в условиях капиталистического рынка надежное обеспечение информационными ресурсами, в том числе и сосредоточенными в виртуальных средах, любого предприятия и сектора экономики предполагает их санкционированное использование. Это обусловлено как спецификой деятельности работников организаций, так и угрозами, создающими потенциальную или реально существующую опасность нанесения ущерба активам предприятия. Они имеют определенную своим владельцем количественную либо качественную ценность. Источником угрозы безопасности информационных ресурсов, информации может служить физическое лицо (в том числе, инсайдер), материальный объект или физическое явление. Безопасное состояние обрабатываемой информации определяют согласно российскому стандарту такие три ее свойства как конфиденциальность, доступность и целостность. Поэтому на предприятии должны быть применены такие управляемые меры безопасности, которые устранили бы на нем недопустимый риск, т.е. неприемлемый риск «при данных обстоятельствах на основании существующих в текущий период времени ценностей в обществе» (ГОСТ Р ИСО/МЭК 18045-2008). С этой целью в состав локальных и распределенных информационных инфраструктур включают различные средства защиты электронной информации и обеспечения безопас-



ности. В России их обеспечение регламентируется Федеральным законом, нормативными документами Федеральной службы безопасности (ФСБ) и Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК)).

Санкционированное пользование информационными ресурсами, электронной информацией предполагает изначально регистрацию и получение пользователем (человеком, системой, процессом) идентификатора и выполнение в процессе работы процедур аутентификации (проверки и подтверждения подлинности (верификации)), являющихся неотъемлемой частью политики безопасности.

Наличие у пользователя идентификатора дает возможность входа в информационную среду, доступа к наперед заданным ресурсами и получения им предоставленного сервиса. Традиционным средством входа в автоматизированную систему служит пароль.

В зависимости от роли различают аутентификацию содержания и аутентификацию источника электронной информации (отправителя информации, неоспоримости авторства). Аутентификация содержания нужна для того, чтобы злоумышленник не мог подменить настоящее сообщение на фальшивое. Аутентификация источника позволяет установить автора электронной информации. Она направлена на обнаружение и предотвращение неправомерных действий со стороны участников информационного обмена (например, мошенничества, отказа, подлога и фальсификации). Развитие электронного бизнеса, появление электронных платежей и денег накладывает дополнительные требования к аутентификации — обеспечение неотслеживаемости действий клиентов (например, отсутствие возможности ведения досье на объекты использования электронных денег клиентом банка). Это обусловлено существующей международной и российской законодательной базой, касающейся **охраны и защиты частной жизни гражданина**. Основным механизмом обеспечения неоспоримости авторства и подлинности сообщения служит электронная цифровая подпись, которая в общем случае должна соответствовать требованиям международных и отечественных стандартов. Согласно Федеральному закону «Об электронной цифровой подписи» электронная цифровая подпись представляется как «реквизит электронного документа, предназначенный для защиты данного электронного документа от подделки, полученный в результате криптографического преобразования информации с использованием закрытого ключа электронной цифровой подписи и позволяющий идентифицировать владельца сертификата ключа подписи, а также установить отсутствие искажения информации в электронном документе».

В первой части доклада приводятся базовые компоненты, присущие как парольной системе, так и системе аутентификации. Далее рассматриваются недостатки традиционных и существующих технологий идентификации и аутентификации, базирующихся на использовании паролевых систем и биометрических систем, ориентированных на работу с одним уникальным признаком человека. Современные биометрические системы ориентированы на фиксацию статических характеристик (поведения и признаков частей тела) человека. Отражено возможное среднее пространство атак на традиционные системы. Показа-

но, что в ряде случаев снизить риск можно путем использования двухфакторной (расширенной) аутентификации.

Далее в докладе обсуждаются современные тренды в области появления новых технологий. Основой обсуждения служат технологические дорожные карты для некоторых значимых отраслей промышленности и циклы зрелости новых технологий компании Gartner.

Результаты обсуждения трендов дают основание для разработки мульти-модельных многофакторных концепций и технологий, базирующихся как на новых подходах, так и на наследующих в симбиозе достоинства традиционных паролевых и биометрических систем. Они выносятся на дискуссию во время доклада. На взгляд автора, мультимодельные многофакторные технологии дадут биометрическим системам возможность контактной и бесконтактной фиксации множества уникальных статических характеристик, динамических физических признаков и психофизиологических процессов человека. Информация в них будет представлена как интеллектуальный агент, способный знать для чего организуется ее поиск и с какой целью будет использоваться информация.

В заключительной части доклада приводится и обсуждается ряд структур компонентов идентификации и аутентификации систем информационной безопасности, основанных на ряде предлагаемых автором мультимодельных многофакторных концепций и технологий.

© Г. А. Сырецкий, 2014

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖАТИЯ РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗООБРАЗНОГО ДЕЙТЕРИЯ

*Игорь Борисович Палымский*

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, тел. (383)286-80-18, e-mail: palymsky@hnet.ru

Численно моделируется процесс обжатия газообразного дейтерия с учетом двух возможных термоядерных реакций D-D и T-D типа. При моделировании учитывается от 5 000 до 20 000 частиц в двумерной постановке. Предложенное моделирование описывает процессы, сопровождающиеся протеканием реакций D-D и T-D типа. Протекание термоядерных реакций приводит к значительному выделению кинетической энергии и, как следствие, рассеянию газового диска вместе со второй отраженной ударной волной.

**Ключевые слова:** реакция, ударная волна, газ, дейтерий, тритий.

## NUMERICAL SIMULATION OF COMPRESSING PROCESS OF GAS DEUTERIUM WITH REACTIONS

*Igor B. Palymskiy*

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, 630102, Russia, Novosibirsk, Kirova st. 86, D. Sc., Professor of Department of Physics, tel. (383)286-80-18, e-mail: palymsky@hnet.ru

Numerically modeled the process of compression of gaseous deuterium, considering two possible thermonuclear reactions D-D and T-D type. Modeling takes into account 5,000-20,000 particles in two-dimensional formulation. The proposed modeling describes the processes followed by reactions D-D and T-D type. The flow of thermonuclear reactions leads to a significant release of the kinetic energy and as a consequence scattering gas disk together with the second of the reflected shock wave.

**Key words:** reaction, shock wave, gas, deuterium, tritium.

Бурное развитие вычислительной техники и широкое применение графических ускорителей в математическом моделировании сделало возможным проведение расчетов течений газа методом частиц. Такой подход известен как метод молекулярной динамики или задача n-body. Основные трудности, при этом, возникают при учете взаимодействия между частицами газа.

Если рассматривается течения инертного газа, где взаимодействие относительно слабое и сводится в основном к Ван-дер-Ваальсовому, можно учитывать взаимодействие только с частицами находящимися в непосредственной окрестности на основе быстроспадающего (как шестая степень расстояния) потенциала Ленарда-Джонса [1].

В более сложном случае движения заряженных частиц или частиц движущихся в поле силы тяжести необходимо учитывать медленно спадающую (как вторая степень) силу взаимодействия и, как следствие, учитывать взаимодей-

ствие каждой частицы с каждой. Объем вычислительной работы при этом есть  $O(N^2)$ , что делает такие расчеты чрезвычайно затратными и возможными только при использовании графических ускорителей. Более подробный обзор может быть найден в работе [2].

В данной работе, методом частиц численно моделируется процесс обжатия газообразного дейтерия с учетом протекания двух возможных термоядерных реакций D-D и T-D типа. Цель данной работы продемонстрировать принципиальную возможность численного моделирования сжатия газообразного дейтерия с протеканием термоядерных реакций.

Рассматривается задача о движении газового облака заряженных частиц (ядер дейтерия) под действием центральной силы (аналога многократно усиленной силы тяжести), обеспечивающей необходимое сжатие и силы кулоновского отталкивания. Для простоты задача решается в двумерной постановке.

Соответствующая система уравнений принимает вид:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{Gr \cdot m_i m_j - Cu \cdot q_i q_j}{r_{i,j}^{1.5}} (x_j - x_i), \quad m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \frac{Gr \cdot m_i m_j - Cu \cdot q_i q_j}{r_{i,j}^{1.5}} (y_j - y_i),$$

$$r_{i,j} = ((x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2)^{0.5}, \quad i, j = 1, 2 \dots N, \quad i \neq j.$$

Здесь  $m$  и  $q$  – масса частицы и ее заряд,  $x$  и  $y$  – положение частицы, а  $Gr$  и  $Cu$  – коэффициенты в выражении для центральной притягивающей силы и силы Кулоновского отталкивания.

Коэффициенты в законах притягивающей и отталкивающей силы  $Gr$  и  $Cu$  выбраны равными 1, масса ядра дейтерия считается равной 2, а его заряд 1. В начальный момент времени газовый диск вращается как твердое тело.

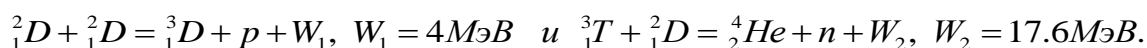
Для численного интегрирования используется известная схема чехарда (leapfrog) [3], согласно которой сначала на полуцелых шагах по времени определяются скорости, а затем на целых шагах положения частиц

$$\vec{v}_i(t + \tau/2) = \vec{v}_i(t - \tau/2) + \tau \cdot \vec{F}_i(t) / m_i, \quad \vec{r}_i(t + \tau) = \vec{r}_i(t) + \tau \cdot \vec{v}_i(t + \tau/2).$$

Здесь символами  $V$ ,  $r$  и  $F$  обозначены векторы скорости, положения и силы, соответственно.

Полагается, что между заряженными частицами протекает реакция, если частицы подходят достаточно близко друг к другу и хотя бы одна из них имеет кинетическую энергию, достаточную для преодоления кулоновского барьера.

При численном моделировании учитываются термоядерные реакции двух типов:



Оценки показывают, что температуре  $10^9$ К соответствует энергия  $0.13MэВ$  и принимая эту величину равной значению Кулоновского барьера  $P_b$  получим, что  $W_1 = 30.8 \cdot P_b$  и  $W_2 = 120 \cdot P_b$ .

При учете реакций считались выполненными законы сохранения импульса и энергии, а недостающая степень свободы (угол между горизонтальной осью  $x$  и направлением движения протона (нейтрона)) определялась так, чтобы кинетическая энергия, уносимая в результате реакции более легкой частицей, была максимальна.

Для расчетов использовалась гибридная параллельная архитектура на GPU+CPU. Самым затратным с вычислительной точки зрения является определение суммарной силы, действующей на частицу. Вычисление сил выполнялось на графическом ускорителе NVIDIA GeForce GTX 570 с распараллеливанием на OpenACC, а все остальные расчеты проводились на восьмиядерном CPU AMD FX-8350 с использованием распараллеливания на OpenMP.

В численных расчетах учитывалось от 5000 до 20000 частиц, при этом величина Кулоновского барьера определялась как  $P_b = Cu \cdot (e_1 - e_2) / (e_1 \cdot e_2)$ , где параметры  $e_1$  и  $e_2$  имеют смысл расстояния слияния и минимального расстояния. В данной работе принималось  $e_1 = 10^{-4}$  и  $e_2 = 10^{-5}$ .

В качестве масштаба времени выбрано время свободного падения

$\tau = (3\pi / (32 \cdot G \cdot \rho))^{0.5} = 0.6802 / N^{0.5}$  [4], с учетом того, что плотность  $\rho$  и  $\gamma$  здесь равны  $2N/\pi$  и 1, соответственно.

В качестве теста проведены расчеты с числом частиц  $N = 5000, 10000, 15000$  и  $20000$  без учета реакций. Расчеты показывают хорошую повторяемость и масштабируемость результатов при варьировании  $N$ . В частности, с графической точностью совпадают кривые изменения эффективного радиуса газового диска и нормированных значений кинетической энергии (суммарная кинетическая энергия отнесенная к  $N^2$ ) как функций безразмерного времени. Хорошо согласуются также давление, температура и плотность в центре диска (рис. 1).

При учете протекания реакций сходимость результатов при изменении  $N$  значительно хуже. В самом деле, расстояние между частицами имеет порядок  $N^{-0.5}$  и при прочих равных условиях реакции начинаются раньше при увеличении числа частиц  $N$ , а протекание реакций приводит к притоку энергии, причем эта энергия многократно (в 30.8 раз в (D-D) и в 120 раз в (T-D) реакциях) превосходит затраченную на преодоление Кулоновского барьера.

Приток энергии приводит к резкой интенсификации течения и увеличению нормированной кинетической энергии (рис. 2, знаками показаны моменты времени, в которых зафиксировано протекание реакции T-D(•) типа при  $N = 5000$ ) и способствует уменьшению сжатия газового диска и понижению давления и температуры в центре. Как и ожидалось, существенное различие наблюдается для кинетической энергии (рис. 2) и эффективного радиуса газового диска (степень сжатия), а кривые изменения давления, плотности и температуры в центре газового диска представляются близкими.

Однако, с качественной точки зрения развитие течения при различных  $N$  представляется похожим. При  $N = 5000$  течение развивается по следующему сценарию.

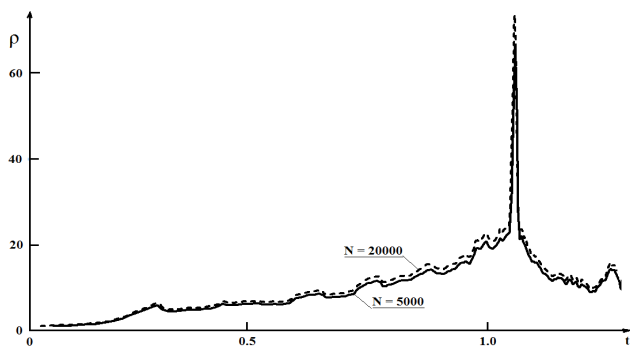


Рис. 1. Плотность в центре газового диска, отнесенная к первоначальному значению как функция времени

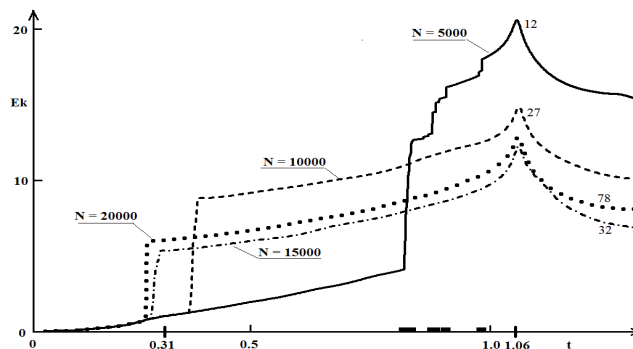


Рис. 2. Нормированная кинетическая энергия системы как функция времени

Из начальных данных формируется сходящаяся ударная волна относительно слабой интенсивности (при  $t = 0.31$ , рис. 2). После формирования и прохождения отраженной волны, формируется вторая сходящаяся ударная волна, обеспечивающая суммарное повышение давления в 12400 раз, плотности в 46.7 и температуры в 265 раз ( $t = 1.06$ ).

На рис. 3 четко виден фронт второй сходящейся ударной волны в момент времени  $t = 0.989$ , черными знаками показаны: ядра трития (прямоугольники), гелия (круг) и не вступающие в реакции протоны и нейтроны (ромбы).

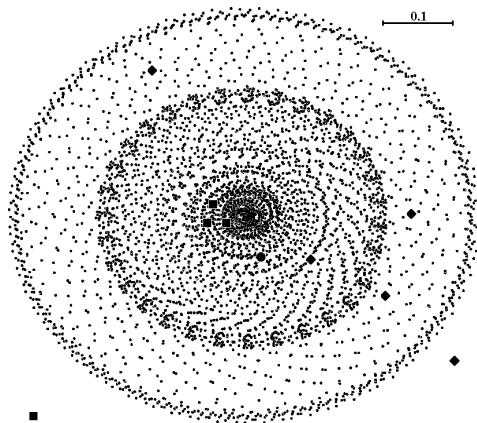


Рис. 3. Вторая сходящаяся ударная волна

Протекание термоядерных реакций приводит к значительному выделению кинетической энергии и как следствие рассеянию газового облака.

Тестовое рассмотрение задачи о сжатии газового диска без учета реакций показало хорошую повторяемость и масштабируемость результатов расчетов при разном числе частиц  $N$ .

При учете реакций соответствие результатов, полученных с разным числом частиц  $N$  значительно хуже. Плохое соответствие наблюдается для норми-

рованной кинетической энергии и эффективного радиуса газового диска, а кривые изменения давления, плотности и температуры представляются близкими.

Результаты расчетов убедительно свидетельствуют, что при наличии центральной силы достаточной интенсивности, обеспечивающей необходимое сжатие, возможно протекание термоядерных реакций D-D и T-D типов.

Из-за огромного притока энергии, течение имеет крайне сложный характер, число прореагировавших частиц сложным образом зависит от первоначальной закрутки газового диска, числа учитываемых частиц и соотношения между коэффициентами в выражении для центральной притягивающей силы и силы отталкивания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирный В., Фрэнер М. Об одной программе моделирования молекулярной динамики газа с элементами распараллеливания алгоритма // Вычислительные технологии. – 2001. – Т. 6. – № 3. – С. 32–50.
2. Боярченков А.С., Поташников С.И. Использование графических процессоров и технологии CUDA для задач молекулярной динамики // Вычислительные методы и программирование. – 2009. – Т. 10. – С. 9–23.
3. Роуч П. Вычислительная гидродинамика: монография. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
4. Сурдин В.Г., Ламзин С.А. Протозвезды. Где, как и из чего формируются звезды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1190949/index.html>

© И. Б. Палымский, 2014

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ЛИТИЕВОЙ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДАМИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ**

*Игорь Владиленович Минин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства, тел. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

*Олег Владиленович Минин*

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой метрологии и технологии оптического производства, тел. (383) 361-07-45, e-mail: kaf.metrol@ssga.ru

Приведены результаты предварительных экспериментов по формированию кумулятивной струи из алюмо-литиевого сплава 01420.

**Ключевые слова:** геофизические исследования, кумуляция, плазменная струя.

## **INVESTIGATION OF CREATION OF LITHIUM CUMULATIVE JET FOR IONOSPHERE RESEARCH BY MEANS OF COSMIC GEODESY METHODS**

*Igor V. Minin*

Siberian state geodetic academy, 630108, Russia, Novosibirsk, Plakhotny St., 10, Dr.Sci.Tech., professor of "Metrology and Technology of Optical Production" chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

*Oleg V. Minin*

Siberian state geodetic academy, 630108, Novosibirsk, Plakhotny St., 10, Dr.Sci.Tech., professor of "Metrology and Technology of Optical Production" chair, tel. (383)361-07-45, e-mail: prof.minin@gmail.com

The experimental results of Al-Li 01420 alloy cumulative jet formations are described.

**Key words:** geophysical research, cumulation, plasma jet.

Ионосфера является одним из источников ошибки в определении местоположения пользователя в глобальных навигационных спутниковых системах GPS и ГЛОНАСС [1]. Величина задержки пропорциональна полному электронному содержанию (ПЭС) вдоль траектории распространения волны, измеряемые различными средствами ионосферного мониторинга. Изменения ПЭС вызывают пропорциональные изменения фазы и искажения амплитуды радиосигнала.

Поэтому важным и актуальным является исследование ионосферы в активных экспериментах, в которых по отклику среды на воздействие источника возмущения с известными параметрами определяются ее свойства. Следует



подчеркнуть, что исследования ионосферы с использованием геофизических ракет и спутников с применением высокоскоростных струй абсолютно необходимы в интересах фундаментальной науки.

Осуществить такие исследования возможно с помощью выпуска системы струй из плазмообразующего вещества, атомный вес которого близок к молекулярному весу воздуха, в ионосферу, которые обеспечивают активное импульсное воздействие на нее и создание одной или нескольких (по числу кумулятивных зарядов) неперекрывающихся областей ионизированного воздуха на большом расстоянии от точки инъекции, превышающем радиус торможения продуктов взрыва [2].

Уже в первых экспериментах с инъекцией в магнитосферу вдоль геомагнитных линий пучков электронов с энергией  $\sim 10$  кэВ удалось инициировать искусственные полярные сияния. При инъекции в ионосферу плазменных литиевых струй наблюдалось возбуждение достаточно интенсивных электрических полей [3,4].

На сколько известно авторам, идея использовать кумулятивные заряды для формирования потока частиц из материала с низким потенциалом ионизации была предложена в работе [5]. Кумулятивный заряд для формирования барьерной кумулятивной струи был исследован в [6]. Заряд с коническим лайнером из стронция был предложен в работе [7].

Конструкция кумулятивного заряда с лайнером из бария обсуждалась в работе [8]. В случае применения взрывчатого вещества PETN/EPON начальная скорость струи составляла около 4 км/с. При применении взрывчатого вещества Baratol начальная скорость струи возрастала до 8.9 км/с. Внешний диаметр облицовки составлял 60 мм, внутренний – 50 мм, угол конического лайнера был 90 градусов.

В настоящей работе приведены результаты предварительных экспериментальных исследований возможности формирования кумулятивной струи из алюмо-литиевого сплава 01420. Использовались физические методы гиперкумулятивного режима струеобразования [9].

Химический состав сплава 01420: 5,0–6,0% Mg; 1,9–2,3% Li; 0,09–0,15% Zr; 0,1–0,3% Si; 0,3% Fe; 0,1% Ti; 0,3% Mn; 0,005 % Na; основа Al, % (мас.). [10]. Серийно выпускаемый сплав 01420 имеет следующие характеристики: среднепрочный коррозионностойкий высокомодульный свариваемый сплав системы Al-Mg-Li пониженной плотности ( $d = 2,47$  г/см<sup>3</sup>,  $E = 78$  ГПа; свойства в направлении D:  $\sigma_b \geq 420$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 270$  МПа,  $\delta \geq 9$  %). Применение сплава обеспечивает для изделий авиакосмической техники снижение массы клепаной конструкции до 12 %, сварной - до 24 % [11].

Эксперименты проводились на модельных зарядах с идентичными облицовками, выполненными из алюминия и сплава 01420. На рис. 1 показан процесс начального формирования кумулятивной струи из алюминиевой облицовки, а на рис. 2 – рентгенограмма алюминиевой струи. Видно, что из алюминиевого лайнера формируется компактная струя с начальной скоростью около 6 км/с.



Рис. 1. Начальная стадия обжатия кумулятивной облицовки

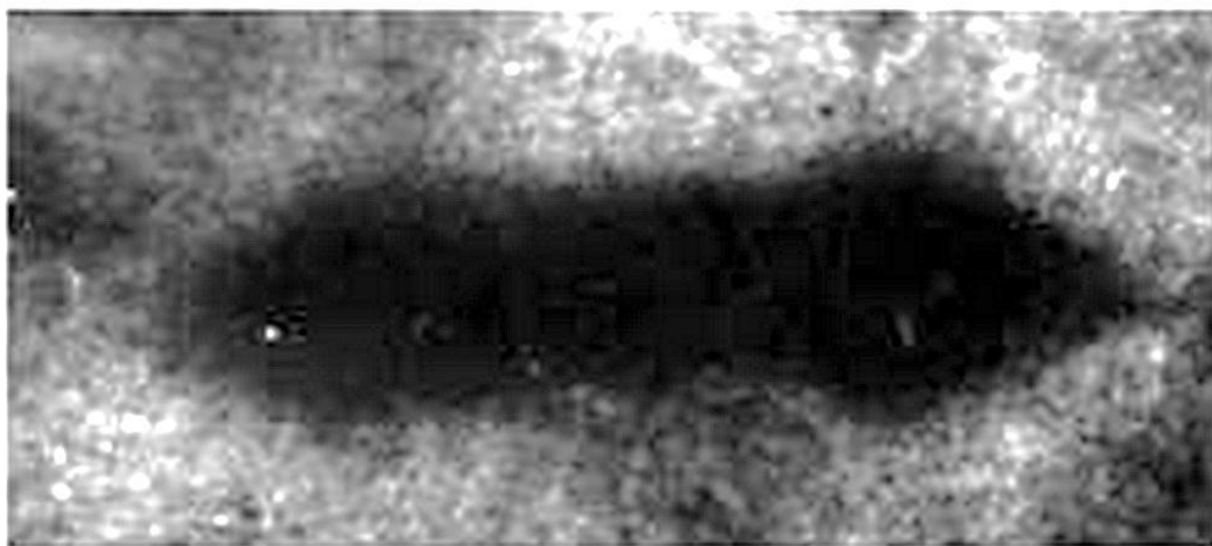


Рис. 2. Компактная кумулятивная струя из алюминия

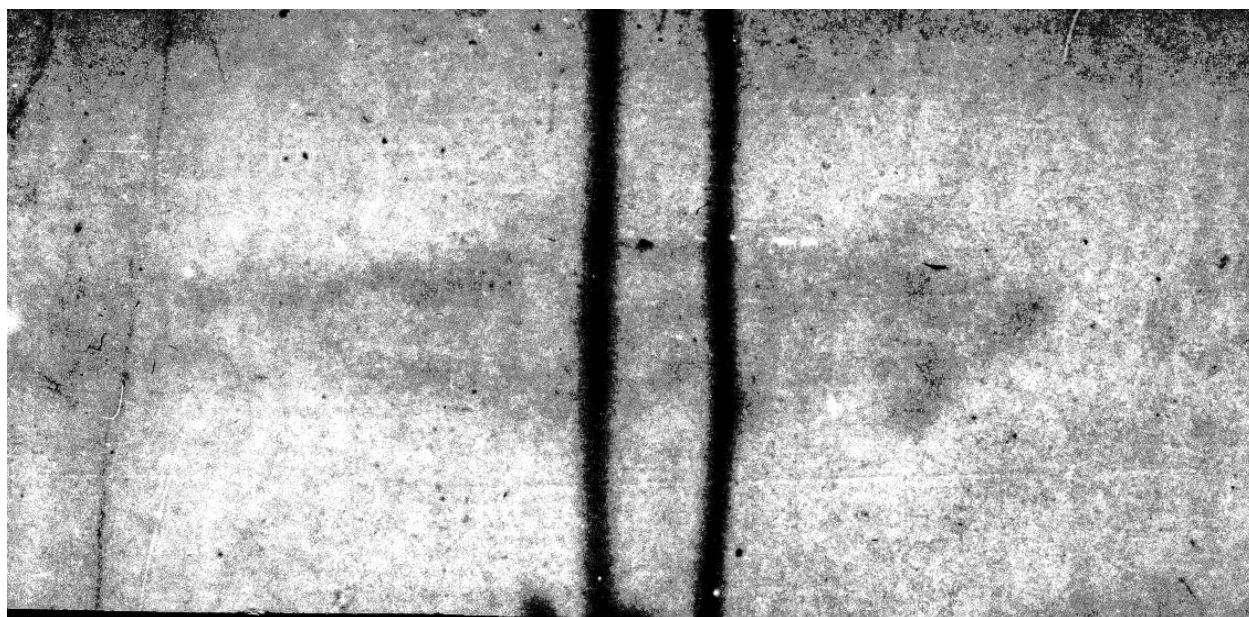


Рис. 3. Скоростной поток частиц из сплава 01420

Не смотря на то, что в литературе имеются данные о проявлении сплавом 01420 эффекта структурной сверхпластичности (авторами работ [12, 13] исследована микрозеренная структурная сверхпластичность образцов сплава 01420, которые находились при температуре испытаний в твердом состоянии), сплошной кумулятивной струи из сплава 01420 в условиях сверхбыстрой деформации при взрывном нагружении получить не удалось (рис. 3). Поэтому вопрос о фазовом состоянии кумулятивной струи из такого материала остается открытым [14].

Однако формируемый скоростной поток частиц металла с низким потенциалом ионизации пригоден для использования в ионосферных экспериментах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Ф. Матвейчук, А.С. Толстиков, Г.В. Шувалов, И.В. Минин, О.В. Минин. Проблемные вопросы обеспечения точности координатно-временных определений на основе применения ГЛОНАСС технологий. // XXXVIII Академические чтения по космонавтике. МВТУ, январь 2014, Секция 13, с. 403
2. Способ возмущения ионосферы и устройство для его осуществления (патент РФ № 2144685)
3. Margaret G. Kivelson and C. T. Russell. Active experiments, magnetospheric modification, and a naturally occurring analogue // *Radio Science*, Volume 8, Number 11, p. 1035-1048, November 1973
4. T N Davis. Chemical releases in the ionosphere //1979, *Rep. Prog. Phys.* 42, p. 1565
5. J. Hunter, G. Martelli, K. S. Martin, and P. Rothwell. PRODUCTION OF FAST JETS OF IONIZED BARIUM USING EXPLOSIVE SHAPED CHARGES // *Applied Physics Letters* 14, 35 (1969);
6. J. Hunter and G. Martelli. PRODUCTION OF FAST JETS OF IONIZED BARIUM USING EXPLOSIVE SHAPED CHARGES // *APPLIED PHYSICS LETTERS*, v.14, N1, 1969, pp.35-37
7. Wescott, Eugene M.; Stenbaek-Nielsen, Hans; Swift, Daniel W.; Valenzuela, Arnoldo; Rees, David. SR90, strontium shaped-charge critical ionization velocity experiment // *Journal of Geophysical Research* (ISSN 0148-0227), vol. 95, Dec. 1, 1990, p. 21069-21075.
8. NAKAMURA Junji. Observations of barium Luminescent Clouds Using Explosive Shaped Charges // *Proceedings of the Second Symposium on Coordinated Observations of the Ionosphere and the Magnetosphere in the Polar Regions: Part II*. P.204-219, 1979
9. Патент РФ 2412338 опубл. 20.02.2011. Способ и устройство (варианты) формирования высокоскоростных кумулятивных струй для перфорации скважин с глубокими незапеченованными каналами и с большим диаметром
10. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. – Киев: Наук. думка, 1992. – 192 с.
11. ГОСТ 13616-97 Профили прессованные прямоугольные полоосообразного сечения из алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов.
12. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – Москва: Металлургия, 1984. – 264 с.
13. Фридляндер И.Н., Эхина Е.В., Кунявская Т.М., Ликин В.Л. Проявление эффекта сверхпластичности в алюминиевых сплавах с литием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1985. – № 2. – С. 62–63.
14. Минин В.Ф., Минин И.В., Минин О.В. Методы и результаты экспериментальных исследований фазового состояния кумулятивной струи: краткий обзор // *Вестник СГГА*. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 98–111.

© И. В. Минин, О. В. Минин, 2014

## **РАНГОВАЯ БИНАРИЗАЦИЯ И ПРОВЕРКА ОДНОРОДНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Роман Владимирович Подрезов*

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, инженер 1 категории, тел. (383)216-05-53, e-mail: podrezov-r.v@mail.ru

В статье рассматривается применение рангового алгоритма проверки гипотезы об однородности изображения и сегментации. Показан пример работы алгоритма на реальном изображении. Приведены характеристики работы алгоритма, полученные методом статистического моделирования.

**Ключевые слова:** проверка неоднородности, сегментация изображений, априорная неопределенность.

## **RANK BASED BINARIZATION AND HOMOGENEITY TESTING OF THERMAL IMAGES**

*Roman V. Podrezov*

Joint Stock Company «Research institute of electronic devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53 Pisareva, 1-st category engineer, tel. (383)216-05-53, e-mail: podrezov-r.v@mail.ru

This paper considers rank method of image homogeneity testing in segmentation task. Processing example is shown on real image. Algorithm characteristics are provided using statistical modeling method.

**Key words:** homogeneity testing, image segmentation, prior uncertainty.

Среди большого разнообразия методов сегментации изображений можно выделить несколько наиболее распространенных [1-3], которые применяются в условиях априорной неопределенности относительно функций распределения (ФР) классов. Методы сегментации, основанные на ранговых статистиках близки по эффективности к оптимальным [4].

Для ряда задач, таких как, например, обнаружение нагретых объектов на холодном фоне в тепловидении, требуется информация о присутствии объекта. Т.е. необходимо установить, состоит изображение только из фона, либо на нем присутствуют и фон и объект. Эту задачу можно решить проверкой гипотезы однородности рабочей выборки и изображения в целом (соответствия одному и тому же распределению). В частности широко известны такие методы проверки однородности выборок как двухвыборочный тест Колмогорова-Смирнова и критерий Лемана-Розенблатта [5]. Однако, в данном случае представляет интерес провести проверку гипотезы против сложной альтернативы двумодального распределения яркостей на изображении.

Рассмотрим алгоритм проверки однородности и пороговой сегментации, предложенный в [6], с тем изменением, что  $H_0$  - гипотеза, утверждающая о

том, что изображение состоит из отсчетов одного класса. Пусть  $H_1$  - гипотеза о неоднородности изображения (альтернатива). Параметрами альтернативы в таком случае являются количество наблюдений фона  $k$  в рабочей выборке рангов  $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$  и количество наблюдений фона на изображении в целом  $l$ .

Принятие решения об однородности изображения выполняется в соответствии с обобщенным критерием отношения максимального правдоподобия:

$$\Lambda(\hat{R}) = \frac{\max_{k,l} P(\hat{R} / H_1, k, l)}{P(\hat{R} / H_0)} > C, \quad (1)$$

где  $C$  - порог принятия решения, который зависит от выбранного критерия,

$\Lambda(\hat{R})$  - отношение правдоподобия,

$\hat{R}$  - вариационный ряд рабочей выборки.

В нашем случае применяется критерий Неймана-Пирсона, в соответствии с которым

$$\sum_{\Lambda(\hat{R}) > C} P(\hat{R} | H_0) \leq \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – заданная вероятность ложной тревоги.

Предположим, что изображение неоднородно, и на нем имеется  $l$  точек фона и  $n-l$  точек объекта ( $n$  – общее число точек на изображении). Согласно вышеизложенному утверждению, распределения классов не перекрываются, и их безошибочное разделение возможно с использованием правила:

$$d_i = \delta(R_i) = \begin{cases} 0, & R_i < \hat{l}, \\ 1, & R_i \geq \hat{l}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\hat{l}$  - оценка кол-ва элементов фона на изображении,

$R_i$  - ранг  $i$ -той точки изображения.

Сформируем рабочую выборку рангов объемом  $m$  из отсчетов некоторого произвольного участка изображения. В рабочей выборке будем оценивать количество элементов фона  $\hat{k}$ , построив вариационный ряд  $\hat{R} = \{R^{(1)}, R^{(2)}, \dots, R^{(m)}\}$ .

МП оценкой  $\hat{k}$  при гипотезе  $H_1$ , считается значение  $k_1$ , обеспечивающее минимум в соответствии с выражением [6]:

$$\hat{k} = k_1, \quad \min_{k_1} C_{R^{(k_1)}+1}^{k_1} C_{n-R^{(k_1)}-1}^{m-k_1} \quad (4)$$

где  $C_y^x = \frac{y!}{x!(y-x)!}$  биномиальный коэффициент.

МП оценка  $\hat{l}$  при этом вычисляется согласно выражению [6]:

$$\hat{l} = R^{(k)} + 1. \quad (5)$$

Отношение правдоподобия для упорядоченного рангового вектора наблюдений рабочей выборки  $\hat{k}$  можно представить в виде [6]:

$$\Lambda(\hat{R}) = \frac{C_n^m}{C_{R^{(\hat{k})}+1}^{\hat{k}} C_{n-R^{(\hat{k})}-1}^{m-\hat{k}}}. \quad (6)$$

Однако с увеличением размера изображения возникают вычислительные проблемы, связанные с переполнением. И эта проблема была преодолена использованием статистик, получаемых, при логарифмировании выражений (5) и (6):

$$\hat{k} = \min_k \left[ \ln \Gamma(R^{(k)} + 1) - \ln \Gamma(R^{(k)} - k + 1) - \ln \Gamma(k + 1) + \right. \\ \left. + \ln \Gamma(n - R^{(k)} + 1) - \ln \Gamma(n - R^{(k)} - m + k + 1) - \ln \Gamma(m - k + 1) \right], \quad (7)$$

$$\ln \Lambda(\hat{R}) = \ln \Gamma(n + 1) - \ln \Gamma(n - m + 1) - \ln \Gamma(m + 1) - \ln \Gamma(R^{(k)} + 1) + \\ \ln \Gamma(R^{(k)} - k + 1) + \ln \Gamma(k + 1) - \ln \Gamma(n - R^{(k)} + 1) + \\ + \ln \Gamma(n - R^{(k)} - m + k + 1) + \ln \Gamma(m - k + 1). \quad (8)$$

Как видно из (7), (8) статистики состоят из суммы (разности) однотипных функций, значения которых можно держать в таблице.

На рис. 1 представлена схема рангового алгоритма.

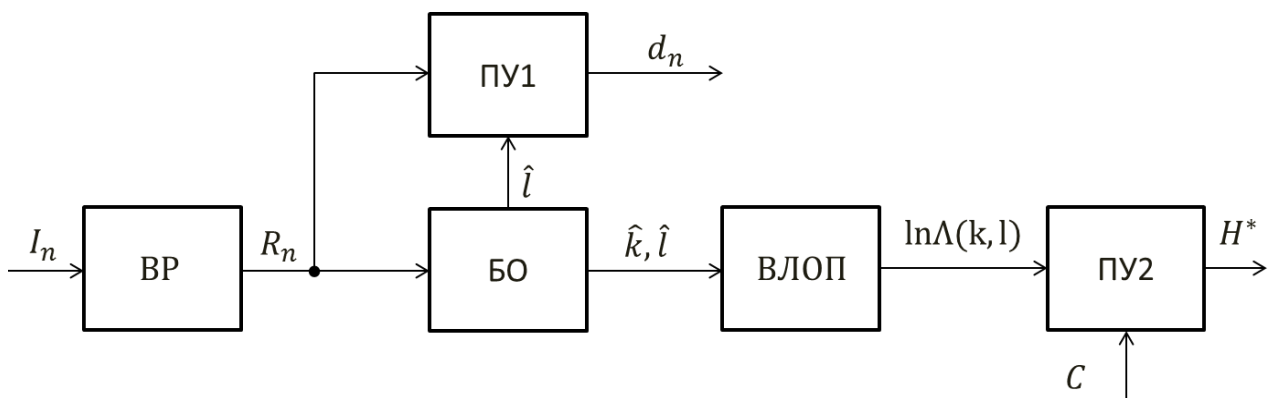


Рис. 1. Схема рангового алгоритма:

ВР – вычислитель рангов, БО – блок оценки кол-ва элементов фона, ВЛОП – вычислитель логарифма отношения правдоподобия, ПУ – пороговые устройства



Пример сегментации. Цифровое тепловизионное изображение размером 320x240 приведено на (рис. 2).



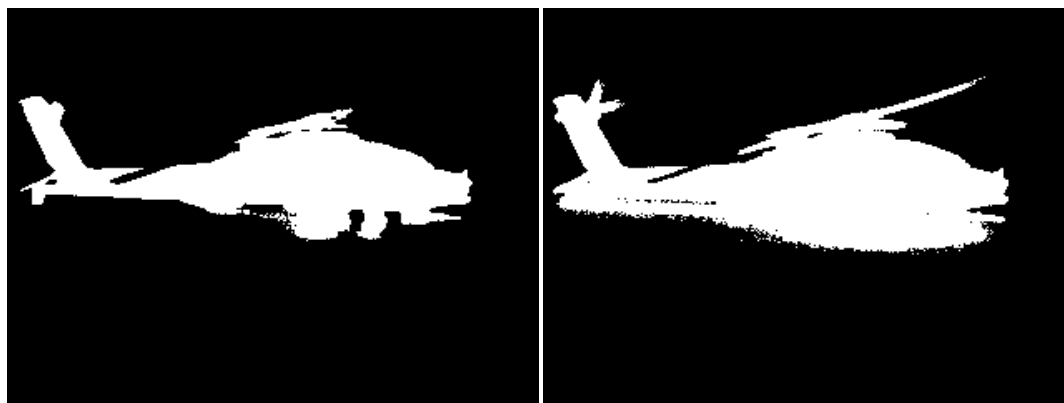
Рис. 2. Исходное изображение

В ранжированном изображении яркость заменена рангами от 1 до 76800. Таково число точек на изображении. Рабочая выборка формируется из части отсчётов ранжированного изображения, для чего оно разбивается на блоки 48x64, ( $m = 3072$ ) Для каждого блока строится вариационный ряд из рангов отсчётов. Далее в каждом  $i$ -м блоке вычисляются МП оценки  $k_i$  и  $l_i$  (кол-ва элементов фона) в соответствии с формулами (4), (5).

Результирующая оценка  $\hat{l}$  выбирается из блока с максимальным правдоподобием:

$$\hat{l} = l_i, \min_i C_{l_i}^{k_i} C_{n-l_i}^{m-k_i}. \quad (9)$$

То значение порога  $\hat{l} = 62554$ , которое было получено в этом блоке, применяем ко всему изображению (рис. 3).



а)

б)

Рис. 3. Сегментированные изображения:

а) метод Оцу, б) ранговый метод

Для проверки гипотезы однородности изображения отношение правдоподобия (8) сравнивается с порогом  $C$ . Однако для уже сравнительно небольших изображений ( $n > 100$ ) становится проблематичным вычисление ФР, как и перебор всевозможных ранговых векторов. Чтобы вычислить функцию распределения отношения правдоподобия при гипотезе  $F_0(\Lambda)$ , и, соответственно, порог  $C$  (по критерию Неймана-Пирсона) можно использовать эмпирическую функцию распределения, полученную с помощью метода Монте-Карло в результате статистического моделирования изображения.

На рис. 4 изображены ФР, а также отмечен вертикальной линией порог  $C = 9,3183$ , соответствующий уровню вероятности ложной тревоги  $\alpha = 0,05$ . Для конкретного изображения (рис. 3), вычисленное значение отношения правдоподобия составляет  $\ln(\Lambda) = 5345,8$ , что значительно превышает порог принятия решения и, следовательно, данное изображение будет классифицировано как неоднородное (при заданном уровне  $\alpha$ ).

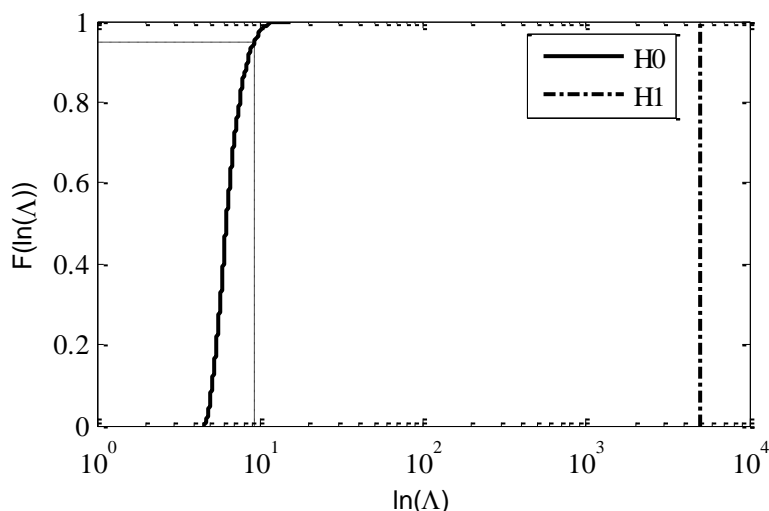


Рис. 4. Функции распределения  $\ln(\Lambda(\hat{R}))$  при гипотезе и альтернативе

В результате работы были:

1. Разработан ранговый алгоритм принятия решения об однородности тепловизионного изображения на основании критерия отношения правдоподобия;
2. Показана эффективность использования данного алгоритма как в результате статистического моделирования, так и, в том числе, для реальных тепловизионных изображений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms //IEEE Transaction on systems, MAN, and CYBERNETICS, Vol. SMC-9, No. 1, 1979. — pp. 62—66.
2. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability, 1967. pp. 281—297.



3. Shapiro L. G., Stockman, G. C. «Computer Vision» — New Jersey, Prentice-Hall, 2001. pp. 279–325.
4. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов, П. А. Бакут, В. А. Богданович и др.; Под ред. П. А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
5. Орлов А.И. О проверке однородности двух независимых выборок // Заводская лаборатория. – 2003. – Т.69. №.1. – С.55-60
6. Райфельд М. А. Непараметрические методы обнаружения и оценивания сигналов и изображений [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.17: защищена 24.12.09: утв. 21.05.10 / Райфельд М. А.; [Новосиб. гос. техн. ун-т]. - Новосибирск, 2009.

© Р. В. Подрезов, 2014

## **ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СЕЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ**

### ***Владимир Павлович Разинкин***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники, тел. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Владимир Александрович Хрусталеv***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор, доктор технических наук, декан факультета радиотехники и электроники, тел. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Павел Геннадьевич Богомолов***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант кафедры общей физики, тел. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Алексей Георгиевич Вихорев***

ООО НПП "Триада-ТВ", 630087, Россия, Новосибирск, ул. Новогодняя, ведущий специалист

В настоящей работе предложен интегральный критерий оценки селективных свойств различного вида полиномиальных фильтров в виде средней крутизны ската амплитудно-частотной характеристики и разработана аналитическая методика его расчета, совместимая с компьютерными математическими программами. Введенный критерий предназначен для использования в автоматизированных системах проектирования фильтров и частотно-избирательных устройств.

**Ключевые слова:** полиномиальные фильтры, автоматизированные системы, полином Чебышева.

## **INTEGRAL CRITERIA EVALUATION OF THE SELECTIVE PROPERTIES OF POLYNOMIAL FILTERS**

### ***Vladimir P. Razinkin***

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, etc. Marx, 20, Ph.D., professor of theoretical foundations of Radio, tel. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Vladimir A. Khrustalev***

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, etc. Marx, 20, Doctor of Technical Sciences, Professor Ph.D., Dean of the Faculty of Radio Engineering and Electronics, tel. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Paul G. Bogomolov***

Novosibirsk State Technical University, 630073, Russia, Novosibirsk, etc. Marx, 20, a graduate student of the department of general physics tel. (383)346-08-34, 8953-780-54-74

### ***Alexey G. Vihorev***

ООО НПП «Триада-ТВ» 630087, Russia, Novosibirsk, Novogodnja

In this paper we propose an integral criterion for evaluating the selective properties of various types of polynomial filters in the form of average steepness of the slope of amplitude-frequency characteristic and developed analytical technique of its calculation, compatible with computer mathematical programs. Introduced criterion is intended for use in automated systems designing filters and frequency-selective devices.

**Key words:** polynomial filters, automated systems, Chebyshev polynomial.

В настоящее время при синтезе полиномиальных фильтров нижних и верхних частот, а также полосно-пропускающих фильтров важным аспектом является определение порядка фильтра, который обеспечивает требуемую селективность. В большинстве известных методик синтеза фильтров [1-2] для этого используются графические методы, которые неприемлемы при работе в современных компьютерных системах автоматизированного проектирования (САПР). В связи с этим актуальной задачей является формулировка интегрального критерия селективных свойств полиномиальных фильтров и разработка аналитической методики его расчета, что позволит осуществить их автоматизированный синтез в компьютерных САПР.

Для разработки методики оценки селективных свойств различного типа полиномиальных фильтров, выполненных на сосредоточенных элементах, воспользуемся описанием частотных зависимостей их коэффициента передачи по мощности на основе полиномов Баттерворта или Чебышева. Это дает возможность в аналитическом виде провести сравнение селективных свойств фильтров данного типа любого порядка без нахождения конкретных значений элементов колебательных систем и проведения схемотехнического моделирования в частотной области. Отметим, что при согласованных нагрузках на входе и выходе фильтра, коэффициент передачи по мощности и по напряжению, выраженные в дБ, численно равны друг другу. Исходя из сказанного, запишем соответственно соотношения для коэффициента передачи по мощности (дБ) соответственно нормированного низкочастотного Баттервортовского и Чебышевского фильтра-прототипа:

$$K_P(\Omega) = 10 \cdot \lg \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot \Omega^2} \quad (\text{фильтр Баттерворта}), \quad (1)$$

$$K_P(\Omega) = 10 \cdot \lg \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot T_n^2(\Omega)} \quad (\text{фильтр Чебышева}), \quad (2)$$

где  $T_n(\Omega)$  - полином Чебышева первого рода  $n$ -го порядка;  $\varepsilon$  - уровень пульсации коэффициента передачи в полосе пропускания;  $\Omega = \frac{\omega}{\omega_c}$  - нормированная частота;  $\omega_c$  - частота среза фильтра нижних частот.

Графики зависимостей (1) и (2), представляющие собой амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), для баттервортовских и чебышевских низкочастотных фильтров-прототипов различного порядка приведены на рис. 1. Из

анализа графиков рис. 1 следует, что, например, для фильтров 5 порядка ( $n=5$ ) при одинаковой электрической принципиальной схеме чебышевский метод синтеза параметров элементов фильтра для области частот  $\Omega > 2$  позволяет получить выигрыш по селективным свойствам или фильтрации порядка 15-20 дБ.

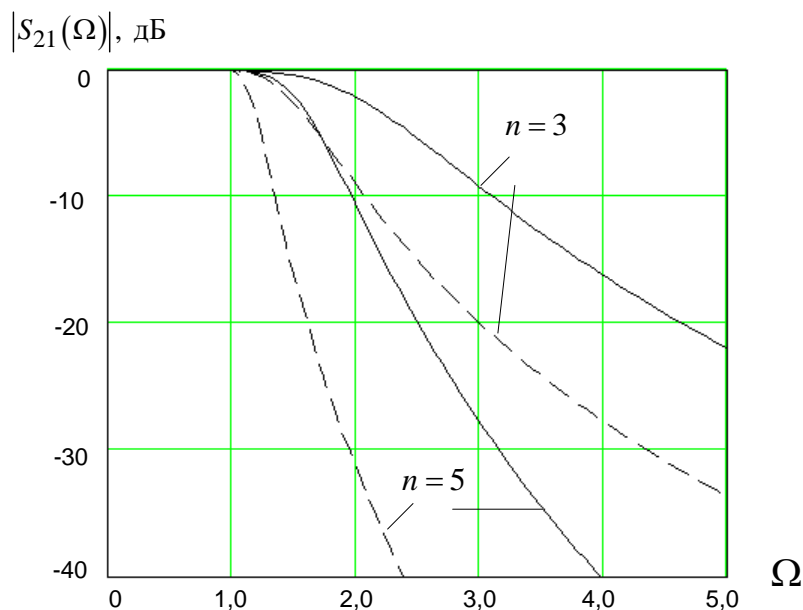


Рис. 1. АЧХ чебышевского и баттервортовского низкочастотных фильтров-прототипов (пунктирная и сплошная линии соответственно)

Поскольку работа с графиками является наглядной, но неудобной и трудоемкой, для оценки селективных свойств фильтров целесообразно использовать крутизну ската АЧХ. Так как крутизна скатов АЧХ определяется за полосой пропускания ( $\Omega > 1$ ), то в соотношении (2) подставим полином Чебышева, выраженный через гиперболические функции:

$$T_n(\Omega) = ch(n \cdot arcch(\Omega)). \quad (3)$$

Выражение для крутизны ската АЧХ соответственно баттервортовского и чебышевского нормированного низкочастотного фильтра-прототипа имеет вид:

$$S_b(\Omega) = 10 \log \frac{1 + \varepsilon^2 \cdot \Omega^{2n}}{1} \varepsilon^2 \cdot \Omega^{2n-1} \cdot \frac{2n}{(1 + \varepsilon^2 \cdot \Omega^{2n})^2}, \quad (4)$$

$$S_c(\Omega) = 10 \log \frac{1}{(1 + \varepsilon^2 \cdot T_n(\Omega)^2)^1} \cdot 2 \cdot T_n(\Omega) \cdot \varepsilon^2 \cdot sh(n \cdot arcch(\Omega)) \cdot n \cdot \frac{1}{\sqrt{\Omega^2 - 1}}. \quad (5)$$

Результаты расчета частотной зависимости крутизны ската АЧХ по соотношениям (4) и (5) для баттервортовских и чебышевских низкочастотных фильтров-прототипов приведены на рис. 2.

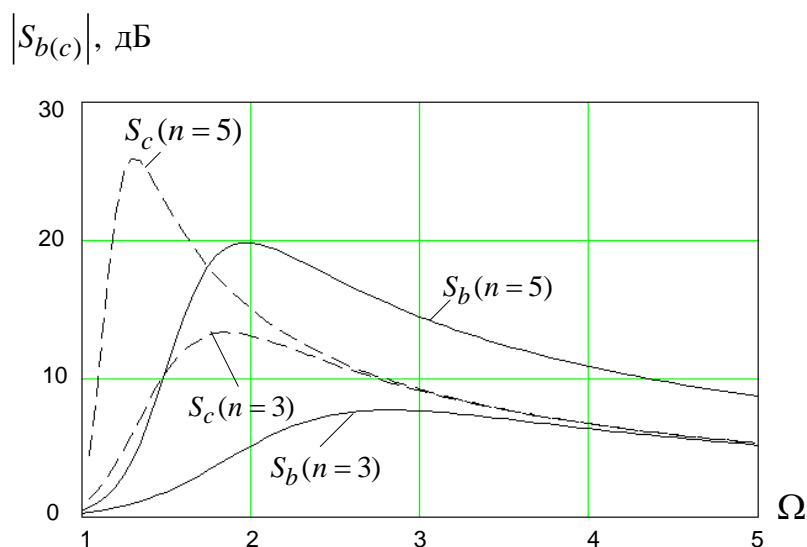


Рис. 2. Частотная зависимость крутизны ската АЧХ для баттервортовских (сплошная линия) и чебышевских (пунктирная линия) низкочастотных фильтров-прототипов

Как видно из рассмотрения рис. 3, при условии  $\Omega \gg 1$  крутизна ската АЧХ рассматриваемых видов фильтров с монотонной формой АЧХ в полосе заграждения имеет максимум, а затем асимптотически стремится к нулю. Поэтому в качестве интегрального критерия для оценки селективных свойств полиномиальных баттервортовских и чебышевских фильтров различного порядка используем среднее значение крутизны ската АЧХ в диапазоне частот ее существенного изменения

$$S_{0b(c)} = \frac{1}{\Omega_{\max}(n)-1} \int_1^{\Omega_{\max}(n)} S_{b(c)}(\Omega) d\Omega, \quad (6)$$

где  $\Omega_{\max}(n) = \frac{A}{n}$  - максимальная частота, которая задает полосу частот для определения среднего значения крутизны ската АЧХ ( $A = 10 \div 20 = const$ ).

Выбор конкретного значения константы  $A$  в соотношении (6) позволяет задать область частот в полосе задержания, где происходит существенное изменение крутизны ската АЧХ. Анализ большого числа проведенных расчетов показал, что для фильтров, выполненных на сосредоточенных элементах, то есть выполненных в сосредоточенном элементном базисе целесообразно выбирать  $A \approx 15$ .

Как следует из соотношения (6), средняя крутизна ската АЧХ  $S_{0b(c)}$  с математической точки зрения представляет собой функционал и является интегральной оценкой селективных свойств выбранного фильтра-прототипа. Отметим, что для конкретного нахождения  $S_{0b(c)}$  в виде определенного интеграла целесообразно воспользоваться методами численного интегрирования, которые хорошо представлены в современных математических компьютерных программах. При необходимости может быть проведено аналитическое интегрирование соотношения (6). Для нормированного низкочастотного фильтра-прототипа средняя крутизна ската АЧХ  $S_{0b(c)}$  имеет размерность [дБ]. Если для ФНЧ задано конкретное значение частоты среза  $f_c$ , то средняя крутизна ската АЧХ равна

$$S_{ФНЧ} = \frac{S_0}{f_c} \left[ \frac{\text{дБ}}{\Gamma_{ц}} \right].$$

Поскольку АЧХ полосно-пропускающих фильтров на распределенных резонаторах описываются в полосе пропускания и ближней зоне заграждения с помощью полиномов Чебышева или Баттерворта, к ним в полной мере применим предложенный интегральный критерий селективности в виде средней крутизны ската АЧХ.

Сравнительный анализ численных значений средней крутизны ската АЧХ различного типа фильтров показывает, что с ростом порядка фильтра существенным преимуществом по фильтрующим свойствам обладают чебышевские фильтры, которые имея точно такую же схемотехническую реализацию, как и баттервортовские фильтры. Например, они обеспечивают увеличение средней крутизны ската АЧХ нормированного низкочастотного фильтра-прототипа на 18,6 дБ при  $n=5$ .

Для эллиптических (кауэровских) фильтров, имеющих пульсирующую форму АЧХ в полосе заграждения, в соответствии с введенным критерием средняя крутизна скатов АЧХ  $S_{0e}$  в первом приближении определяется на основе значений критической частоты  $\Omega_s$ , взятых из таблиц [1]. Конкретные значения средней крутизны скатов АЧХ эллиптических фильтров рассчитываются по следующему соотношению:

$$S_{0e} \cong \frac{A_s}{\Omega_s - 1}, \quad (7)$$

где  $A_s$  - уровень пульсации АЧХ в полосе заграждения.

В заключении отметим, что выражение (7) применимо и для квазиэллиптических фильтров с заданными частотами режекции в полосе заграждения, описанных в [3-5], которые обладают повышенной крутизной скатов АЧХ.

**Выводы.**

1. В аналитическом виде определена текущая крутизна ската АЧХ для баттервортовских и чебышевских фильтров полиномиального типа, выполненных как в сосредоточенном, так и распределенном элементном базисе.

2. Предложен интегральный критерий оценки селективных свойств различного типа фильтров в виде средней крутизны ската АЧХ, основанный на определении частотного диапазона существенного изменения текущей крутизны ската АЧХ.

3. Полученные результаты позволяют проводить автоматизированный синтез.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров / США. Пер. с англ., под ред. А.Е. Знаменского / М.: Сов. радио 1974. - 288 с.

2. Абросимов А.А. Полосовые фильтры с эллиптическими характеристиками / А.А. Абросимов, В.П. Разинкин // Научный вестник НГТУ №1(46) 2012 г., С. 149-156.

3. Абросимов А.А. Высокоизбирательные фильтры на спиральных резонаторах / А.А. Абросимов, В.П. Разинкин // Радиопромышленность. Вып. № 1, 2012, С. 21-31.

4. Пат. №2414024 РФ, МКИ 6: H01P 1/100/ Узкополосный фильтр / В.П. Разинкин, В.Н. Удалов, Д.С. Матвеев // Оpubл. 10.03. 11. – Бюл. №7.

5. Абросимов А.А. Эллиптические фильтры на сосредоточенных элементах / А.А. Абросимов, В.П. Разинкин // Доклады ТУСУР, № 2, часть 2, 2012. С. 29-31.

© В. П. Разинкин, В. А. Хрусталева, П. Г. Богомолов, А. Г. Вихорев, 2014

## **ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ И ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ**

*Валерий Григорьевич Эдвабник*

ОАО «НИИ Электронных Приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, заместитель генерального директора по развитию, тел. (383)216-05-52, e-mail: niiep@oaoniiер.ru

Работа посвящена выводу и установлению параметров широкополосной случайной и гармонической вибрации, вызывающих идентичные реакции испытываемой бортовой электронной аппаратуры. Получены аналитические выражения двух критериев адекватности испытательных режимов по параметрам перегрузки и времени испытаний.

**Ключевые слова:** вибрация гармоническая, широкополосная, случайная, испытания, эквивалентность испытательных режимов.

## **THE EQUIVALENT BROADBAND RANDOM VIBRATION TESTING EFFECT ON ELECTRONIC EQUIPMENT**

*Valerij G. Edvabnik*

JSC «Research Institute on Electronic Devices», 630005, Russia, Novosibirsk, 53, Pisarev St., Deputy Director on Development, tel. (383)216-05-52, e-mail: niiep@oaoniiер.ru

The broadband random and harmonic vibration testing parameters were determinate in this article. The analytical expressions of two testing regime adequacy criteria (testing time and g-load) were obtain.

**Key words:** harmonic, random, broadband vibration testing, testing regime equivalency.

Согласно требованиям современных стандартов, основным видом вибрационных воздействий при испытаниях бортовой электронной аппаратуры (БЭА) является широкополосная случайная вибрация (ШСВ). В то же время на стадиях отработки конструкции изделий и при анализе отказов в процессе производства разработчику и испытателю понадобятся исследования поведения БЭА (снятие амплитудно-частотных характеристик) до, в процессе и после вибрационного воздействия. И здесь, как правило, основным и эффективным инструментом анализа является гармоническая вибрация (ГВ) с плавно изменяющейся частотой.

В научно-технической литературе встречается немало работ, посвященных проблеме установления эквивалентности нагрузок при различных динамических воздействиях (ГВ, ШСВ, многократные и одиночные удары и т.д.). Серьезные обобщения такого типа исследований приведены в [1].

На наш взгляд, теория абсолютной эквивалентности разных режимов испытаний – не более, чем попытка как-то обосновать «замену» одних испытаний другими, что, вообще говоря, актуально для практики. Но, употребляя термин «эквивалентные испытания», необходимо понимать и помнить, что для различ-



ных видов воздействий **полная** (или абсолютная) **эквивалентность недостижима**. Действительно, если считать условиями полной эквивалентности равенство предельных значений ускорения и времени воздействия максимальных перегрузок, то **никогда** не будет достигнута эквивалентность двух различных режимов даже при одном и том же виде испытаний, например, по принципу «меньше время воздействия, но больше значение перегрузки».

В упомянутой работе [1] указаны соотношения эквивалентности различных видов воздействий для случаев, когда нагрузки близки к предельно допустимым для материалов и элементов конструкции. Тогда используется гипотеза накопленных повреждений Майнера и линии Велера, связывающие количество циклов нагрузки с напряжениями в материале в промежутке от предела текучести до предела прочности. Такие методы, по-видимому, правомерны в случаях исследования поведения каких-либо инженерных сооружений либо при исследовании прочности (пределов прочности) конструкций БЭА, работающих в экстремальных режимах (например, БЭА артиллерийских снарядов, БЭА разделяющихся боевых частей и т.п.). Для большинства же классов аппаратуры динамические нагрузки, как правило, не опасны с точки зрения прочности, а задачи обеспечения вибро- и удароустойчивости являются чрезвычайно актуальными.

Изменение выходных электрических параметров БЭА вследствие динамических воздействий принято называть виброшумами.

Представим себе испытываемое изделие (ИИ) как черный ящик (рис.1), подвергающийся внешнему воздействию ( $V_{нВ}$ ). Условимся называть эквивалентными испытания с такими режимами, при которых реакция ( $R$ ) испытываемого изделия будет адекватной.

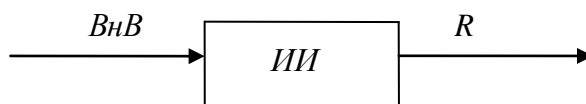


Рис. 1. Идеализация испытываемого изделия (ИИ) как черного ящика с реакцией  $R$  на внешнее воздействие ( $V_{нВ}$ )

Проявление виброшумов – паразитные сигналы, их уровень, всевозможные разбалансы, ложные срабатывания и т. п. в пределах большого запаса прочности (т. е. при мизерных накопленных повреждениях) связаны с амплитудой вибрационного воздействия – об этом свидетельствует практика отработки БЭА. Чем больше амплитуда вибровоздействия, тем менее устойчиво ведет себя БЭА: "дрожание" штыревых элементов в СВЧ-фильтрах, возрастание величин контактных сопротивлений, микроперемещения сердечников в катушках индуктивности и т. д. - всё это влечёт за собой снижение добротности полосовых фильтров, увеличивает расстройку контуров, что отрицательно влияет на

устойчивость работы БЭА. Поэтому в качестве основного параметра сопоставления режимов ГВ и ШСВ для оценки их влияния на виброустойчивость БЭА выбрано *максимальное значение виброускорения*.

Пусть при ГВ максимальное амплитудное значение перегрузки равно  $n_{ГВ}$ . При ШСВ с достаточной точностью можно полагать максимальное значение виброперегрузки, равное  $3\sigma$ , где среднеквадратичное значение ускорения  $\sigma$ , выраженное в единицах "g" (g - ускорение свободного падения), определяется как

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (1)$$

где D – дисперсия виброускорения при ШСВ.

Таким образом, первый критерий адекватности ("эквивалентности") воздействующих на БЭА ГВ и ШСВ выглядит следующим образом:

$$n_{ГВ} = 3\sigma_{ШСВ} \quad (2)$$

С учётом (1) выражение для *первого критерия адекватности* режимов ГВ и ШСВ при испытаниях БЭА может иметь следующий вид:

$$D_{ШСВ} = \frac{n_{ГВ}^2}{9} \quad (3)$$

Для стационарных и эргодических случайных процессов распределение мгновенных значений виброускорений подчиняется нормальному закону. Значит, интервал значений ускорений при ШСВ от  $2\sigma$  до  $3\sigma$  "живёт" примерно 5 % от общего времени ШСВ (для нормального закона распределения интервал от 0 до  $\pm 2\sigma$  "накрывает" 95,6 % возможных реализаций, а от 0 до  $\pm 3\sigma$  - 99,7 % реализаций, т. е. по сути практически 100 % реализаций; 100 % - 95,6 % < 5 %).

Тогда время воздействия ШСВ  $t_{ШСВ}$  в полосе частот  $\Delta f$  при наличии треть-октавных фильтров в аппаратуре формирования ШСВ при виброиспытаниях в количестве  $d_{1/3}$  связано со временем  $t_{ГВ}$  прохождения методом ГВ этого же диапазона частот  $\Delta f$  так:

$$t_{ШСВ} = 20 \frac{t_{ГВ}}{d_{1/3}} \quad (4)$$

Условие (4) можно считать *вторым критерием адекватности* режимов ГВ и ШСВ.

Из (4) видно, что, если в полосе  $\Delta f$  аппаратура формирования ШСВ содержит более одного третьоктавного фильтра (а так бывает всегда, ибо при  $d_{1/3} = 1$  мы имеем дело фактически с узкополосной случайной вибрацией), то общее время воздействия ШСВ **МЕНЬШЕ** суммарного времени испытаний на ГВ методом изменяющейся частоты гармонических колебаний в том же диапазоне частот, что и при ШСВ.

В принципе даже при условиях (3) и (4) режим ШСВ не "слабее" режима ГВ, т. к. в полосе частот  $\Delta f$  нами рассматривались лишь случайные колебания более  $2\sigma$ , а частичные повреждения от действия виброускорений амплитудой  $\sigma$ ,  $2\sigma$  и других промежуточных значений, меньших  $2\sigma$ , нами вообще не учитывались. Хотя, конечно, режим ГВ в полосе частот конструктивного резонанса элемента может вызвать более "чувствительную" реакцию, чем ШСВ (вплоть до разрушения).

Критерий адекватности (3), на наш взгляд, довольно просто и логично обоснован. Однако в некоторых литературных источниках, например в [2], без достаточного обоснования приводится критерий адекватности режимов ГВ и ШСВ в виде  $n_{ГВ} = \sqrt{D_{ШСВ}} = \sigma_{ШСВ}$ . Понятно, что в этом случае режим испытаний на ШСВ станет много жестче, чем по критерию (3), т. к. виброускорения до  $3\sigma_{ШСВ}$ , которые, как уже отмечалось, достаточно долго "живут" и ощутимо повлияют не только на устойчивость БЭА, но и на прочность некоторых конструктивных элементов. Поэтому не только неправильно, но и вредно просто приравнять амплитудные значения виброускорений на ГВ и среднеквадратические значения ускорений при ШСВ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ленк А., Ремитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. / Пер. с нем. П.С. Богусловского под ред. д.т.н., проф. П.И. Буковского. – М.: Мир, 1976. – 270 с.
2. Карпушин В.Б. Виброшумы радиоаппаратуры. – М.: Сов. Радио, 1977. – 318 с.

© В. Г. Эдвабник, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

1. <i>Б. С. Могильницкий, И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов.</i> Призма в мире импульсов .....	3
2. <i>А. С. Толстиков, А. А. Карауш, Е. А. Ханькова.</i> Оценивание эфемеридно-временных параметров орбитальной группировки ГЛОНАСС .....	8
3. <i>Б. С. Могильницкий, И. В. Минин, О. В. Минин, Г. В. Шувалов.</i> О разрешении импульсной Фурье-спектроскопии .....	14
4. <i>Н. А. Вихарева, В. Я. Черепанов.</i> Радиационно-калориметри- ческий метод определения термодинамической температуры репер- ных точек.....	19
5. <i>Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин, О. В. Минин, И. В. Клековкин, А. П. Ильин, О. А. Ясырова.</i> Оценка термической без- опасности нанопорошков металлов, используемых в качестве добавок в нефтепродуктах.....	25
6. <i>А. Д. Зонова, В. Я. Черепанов.</i> Неразрушающий метод оценки показателя эффективности тепловой защиты помещений .....	31
7. <i>Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин, О. В. Минин, И. В. Клековкин, О. А. Ясырова.</i> Разработка и исследование прибора для определения температуры вспышки нефтепродуктов.....	37
8. <i>А. С. Толстиков, А. Р. Безродных.</i> Синхронизация простран- ственно-разнесенных часов на основе псевдодальномерных фазовых измерений.....	42
9. <i>Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Минин, О. В. Минин, А. А. Мамонов, И. В. Клековкин, О. А. Ясырова.</i> Исследование пара- метров емкостного уровнемера установки для определения темпера- турного коэффициента объемного расширения нефтепродуктов.....	47
10. <i>Г. В. Симонова, Е. П. Хлебникова, Д. П. Симонов.</i> Автоматиза- ция контроля качества поверхностей на основе анализа статистиче- ских характеристик их цифровых изображений.....	54
11. <i>Л. Б. Воробьева, А. Д. Зонова, С. А. Степанова.</i> Оценка по- грешности измерений параметров микроструктуры керамики.....	59
12. <i>А. Ф. Бродников, В. Я. Черепанов.</i> Оптимизация теплового режима при воспроизведении реперных точек температурной шкалы.....	65
13. <i>А. В. Кошелев, А. А. Дубинина, Ю. Г. Костына, В. Л. Неклюдо- ва.</i> Определение показателя преломления в атмосфере по результатам светодальномерных измерений эталонного базиса .....	71
14. <i>В. А. Райхерт, В. В. Чесноков, Д. В. Чесноков.</i> Разработка ме- тодики исследования внешней квантовой эффективности излучения светодиодных кристаллов .....	76

15. <i>А. В. Куликов</i> . Исследование точности лазерного интерферометра перемещений .....	82
16. <i>А. В. Куликов, В. А. Середович</i> . Опыт создания лазерного интерферационного компаратора СГГА .....	88
17. <i>А. В. Трифанов, В. Я. Костюченко, Д. Ю. Протасов</i> . Уменьшение погрешности определения параметров носителей заряда цифровой фильтрацией .....	94
18. <i>Т. В. Ларина, Е. Ю. Кутенкова, В. М. Тымкул, О. В. Минин, И. В. Минин</i> . Математическая модель анализа состояния поверхности конструкционных материалов .....	98
19. <i>Е. Ю. Кутенкова, Т. В. Ларина, В. М. Тымкул, О. В. Минин, И. В. Минин</i> . Математическая модель работы устройства измерения оптических параметров жидких сред .....	104
20. <i>В. М. Тиссен, Е. А. Ханькова</i> . Исследование нестабильностей атомных часов методами имитационного моделирования .....	110
21. <i>Л. Б. Воробьева, А. Д. Зонова, С. А. Степанова</i> . Влияние способа получения оксида магния на микроструктуру форстеритовой керамики .....	115
22. <i>А. Д. Зонова, Г. В. Симонова, Н. К. Шмакова</i> . Прикладные аспекты метрологического обеспечения для будущей профессиональной деятельности метрологов .....	121
23. <i>В. Н. Матуско</i> . Линейный пьезоэлектрический электродвигатель .....	125
24. <i>Г. А. Куриленко, Г. В. Григорьева</i> . Повышение точности прогнозирования циклической прочности металлов .....	128
25. <i>В. Н. Белобородов</i> . К вопросу о процессах, вызывающих снижение КПД в машинах ударного действия с непосредственным разгоном ударника продуктами сгорания .....	135
26. <i>И. С. Бутримов, В. С. Айрапетян</i> . Оптико-электронное устройство для контроля параметров прицельной техники в ходе полигонных испытаний .....	139
27. <i>Е. В. Манжос, Н. А. Какуткина, А. А. Коржавин, А. В. Вьюн</i> . Экспериментальное исследование зажигания волн фильтрационного горения газа открытым пламенем .....	145
28. <i>И. В. Минин, О. В. Минин</i> . Перспективы развития кумулятивных снарядов, стабилизируемых вращением .....	152
29. <i>Н. Н. Бардачевский, Е. В. Проскуряков, И. А. Апарин</i> . Расчет смесевых взрывчатых веществ .....	158
30. <i>С. В. Савелькаев, В. С. Айрапетян, В. А. Литовченко</i> . Методика расчета автогенератора СВЧ в пространстве S-параметров .....	164
31. <i>О. В. Матыцин</i> . Подводные навигационные панели ВМФ .....	172
32. <i>О. В. Матыцин, С. А. Кузнецов</i> . Подводные средства буксирования боевых пловцов .....	176

33. <i>С. Г. Губин</i> . Упрощенная математическая модель внутрибаллистических процессов в боеприпасах с отсечкой пороховых газов .....	183
34. <i>С. Г. Губин, В. А. Войновский</i> . Обзор развития разведывательно-боевых комплексов в системе средств обеспечения разведывательно-боевой деятельности подразделений СПН и войсковой разведки сухопутных войск.....	190
35. <i>П. Г. Богомолов, М. Г. Рубанович, В. А. Хрусталева</i> . Исследование распределения заряда в поперечном сечении микрополосковой линии.....	194
36. <i>В. С. Айрапетян, Т. В. Маганакова</i> . Обнаружение и измерение параметров наркотических веществ с помощью перестраиваемого ИК лазера.....	199
37. <i>М. В. Орлова</i> . Исследование сигнала на входе приемника теплового излучения.....	205
38. <i>М. В. Орлова</i> . Исследование сигналов на входе приемника инфракрасного излучения в двух спектральных диапазонах .....	210
39. <i>В. И. Оздобихин, В. Б. Ромодин, Т. В. Ячменева</i> . О проектировании волноводно-щелевых антенн .....	215
40. <i>В. С. Кулик, В. Б. Ромодин</i> . Разработка антенны для мобильных устройств .....	219
41. <i>А. Г. Батурун</i> . Применение амплитудно-базового метода обнаружения в оптоэлектронных датчиках.....	223
42. <i>Г. А. Сырецкий</i> . Мультимодельные многофакторные технологии как одно из возможных направлений будущего аутентификации и идентификации .....	228
43. <i>И. Б. Палымский</i> . Численное моделирование процесса обжаривания реагирующего газообразного дейтерия.....	231
44. <i>И. В. Минин, О. В. Минин</i> . Исследование возможности создания литиевой кумулятивной струи для ионосферных исследований методами космической геодезии .....	236
45. <i>Р. В. Подрезов</i> . Ранговая бинаризация и проверка однородности тепловизионных изображений .....	240
46. <i>В. П. Разинкин, В. А. Хрусталева, П. Г. Богомолов, А. Г. Вихорев</i> . Интегральный критерий оценки селективных свойств .....	246
47. <i>В. Г. Эдвабник</i> . Об эквивалентности испытаний бортовой электронной аппаратуры на воздействие гармонической и широкополосной случайной вибрации.....	252

## CONTENTS

1. <i>B. S. Mogilnitsky, I. V. Minin, O. V. Minin, G. V. Shuvalov.</i> Prism in the world of impulses .....	3
2. <i>A. S. Tolstikov, A. A. Karaush, E. A. Hanikova.</i> Evaluation ephemeris and time parameters of the GLONASS constellation .....	8
3. <i>B. S. Mogilnitsky, I. V. Minin, O. V. Minin, G. V. Shuvalov.</i> About pulse Fourier spectroscopy permission .....	14
4. <i>N. A. Vikhareva, V. Ya. Cherepanov.</i> A radiation-colorimetric method definitions thermodynamic temperature reference points.....	19
5. <i>G. V. Shuvalov, V. N. Polovinkin, I. V. Minin, O. V. Minin, I. V. Klekovkin, A. P. Ilyin, O. A. Yasyrova.</i> Assessment of thermal safety of nanopowders of the metals used as additives in oil products .....	25
6. <i>A. D. Zonova, V. Ya. Cherepanov.</i> The non-destructive method of the estimation factor to efficiency of heat protection of the premises .....	31
7. <i>G. V. Shuvalov, V. N. Polovinkin, I. V. Minin, O. V. Minin, I. V. Klekovkin, O. A. Yasyrova.</i> Development and device research for determination of temperature of flash of oil products .....	37
8. <i>A. S. Tolstikov, A. R. Bezrodnikh.</i> Synchronization spatially separated clock based on psevdodalnomernyh phase measurements.....	42
9. <i>G. V. Shuvalov, V. N. Polovinkin, I. V. Minin, O. V. Minin, A. A. Mamonov, I. V. Klekovkin, O. A. Yasyrova.</i> Research of parameters of the capacitor level gauge of installation for determination of temperature coefficient of the nefteproduktovov volume expansion .....	47
10. <i>G. V. Simonova, E. P. Khlebnikova, D. P. Simonov.</i> Automation of quality control surfaces based on the analysis the statistical characteristics of their digital images.....	54
11. <i>L. B. Vorobyeva, A. D. Zonova, S. A. Stepanova.</i> Estimating error of the measurements of ceramic microstructure parameters.....	59
12. <i>A. F. Brodnikov, V. Ya. Cherepanov.</i> Optimization of a thermal mode at reproduction of reference points a temperature scale .....	65
13. <i>A. V. Koshelev, A. A. Dubinina, Yu. G. Kostyna, V. L. Neklyudova.</i> Determination of refraction index of the atmosphere through the measurements results with on electronics range – finder of standard basis.....	71
14. <i>V. A. Reichert, V. V. Chesnokov, D. V. Chesnokov.</i> Research technique preparation of external quantum efficacy of led's chip radiation .....	76
15. <i>A. V. Kulikov.</i> Research of laser displacement interferometer accuracy.....	82
16. <i>A. V. Kulikov, V. A. Seredovich.</i> Experience of laser interference comparator development at SSGA.....	88

17. <i>A. V. Trifanov, V. Ya. Kostjuchenko, D. Yu. Protasov.</i> Error reduction parameters determination of charge carriers by digital filtering.....	94
18. <i>T. V. Larina, E. Y. Kutenkova, V. M. Tymkul, O. V. Minin, I. V. Minin.</i> Mathematical model analysis of surface condition konstruksionnyh materials .....	98
19. <i>E. Yu. Kutenkova, T. V. Larina, V. M. Tymkul, O. V. Minin, I. V. Minin.</i> Mathematical model of measuring device, optical parameters liquids.....	104
20. <i>V. M. Tissen, E. A. Hanikova.</i> Study hours unstable atomic simulation methods .....	110
21. <i>L. B. Vorobyeva, A. D. Zonova, S. A. Stepanova.</i> Influence of magnesium oxide method for producing microstructure forsterite ceramics .....	115
22. <i>A. D. Zonova, G. V. Simonova, N. K. Shmakova.</i> Problems of the study of discipline «Metrological provision» for future professional activity metrologes .....	121
23. <i>V. N. Matysko.</i> Linear piezoelectric motor .....	125
24. <i>G. A. Kurilenko, G. V. Grigorieva.</i> The more accurate forecasting cyclic strength of metals.....	128
25. <i>V. N. Beloborodov.</i> On the question of the processes, decreasing the efficiency of internal combustion percussion machines, using direct acceleration of the strike by combustion gas .....	135
26. <i>I. S. Butrimov, V. S. Hayrapetyan.</i> Optical-electronic device for control of parameters of sighting devices during field tests .....	139
27. <i>E. V. Manzhos, N. A. Kakutkina, A. A. Korzhavin, A. V. V'yun.</i> Experimental study of ignition of filtration combustion waves with open flame.....	145
28. <i>I. V. Minin, O. V. Minin.</i> Prospects of development of cumulative shells stabilized by rotation .....	152
29. <i>N. N. Bardachevsky, E. V. Proskuriakov, I. A. Aparin.</i> Calculation of mixed explosives.....	158
30. <i>S. V. Savelkaev, V. S. Hayrapetyan, V. A. Litovchenko.</i> Calculation autogenerators microwave in space S-parameters.....	164
31. <i>O. V. Matytsin.</i> Navy submarine navigational bars .....	172
32. <i>O. V. Matytsin, S. A. Kuznetsov.</i> Underwater equipment of towing military swimmers .....	176
33. <i>S. G. Gubin.</i> The simplified mathematical model intra ballistic protsessov in ammunition with the cut-off of powder gases .....	183
34. <i>S. G. Gubin, V. A. Voynovsky.</i> The reviewof development of prospecting and fighting complexes in system of means of ensuring of prospecting and fighting activity of divisions of spn and army investigation of land forces .....	190
35. <i>P. G. Bogomolov, M. G. Rubanovich, V. A. Khrustalyov.</i> Investigation of charge distribution in the cross section of a microstrip line .....	194
36. <i>V. S. Ayrapetyan, T. V. Maganacova.</i> Detection and measurement of parameters of drugs using tunable IR laser.....	199



37. <i>M. V. Orlova</i> . Investigation of the thermal radiation receptor input signal.....	205
38. <i>M. V. Orlova</i> . Investigation of the input signal from infrared radiation two-channel receptor .....	210
39. <i>V. I. Oznobikhin, V. B. Romodin, T. V. Yachmeneva</i> . About the design of waveguide-slot antenna .....	215
40. <i>V. S. Kulik, V. B. Romodin</i> . Mobile device antenna design .....	219
41. <i>A. G. Baturin</i> . Usage of amplitude-triangulation detection method in optoelectronic sensors .....	223
42. <i>G. A. Syretsky</i> . Multimodel multifactor technology as one of the possible directions the future identification and authentication.....	228
43. <i>I. B. Palymskiy</i> . Numerical simulation of compressing process of gas deuterium with reactions .....	231
44. <i>I. V. Minin, O. V. Minin</i> . Investigation of creation of lithium cumulative jet for ionosphere research by means of cosmic geodesy methods .....	236
45. <i>R. V. Podrezov</i> . Rank based binarization and homogeneity testing of thermal images .....	240
46. <i>V. P. Razinkin, V. A. Khrustalev, P. G. Bogomolov, A. G. Vihorev</i> . Integral criteria evaluation of the selective properties of polynomial filters .....	246
47. <i>V. G. Edvabnik</i> . The equivalent broadband random vibration testing effect on electronic equipment .....	252

Научное издание

X Международные научный конгресс и выставка

# ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2014

Международная научная конференция

## СибОптика-2014

Т. 2

Сборник материалов

Материалы публикуются в авторской редакции

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 22.04.2014. Формат 60 × 84 1/16

Печать цифровая.

Усл. печ. л. 15,23. Тираж 100 экз. Заказ .

Редакционно-издательский отдел СГГА  
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, 108, ул. Плахотного, 8.