

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

ГЕО-СИБИРЬ-2007

Т. 4

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

Ч. 2

Сборник материалов
III Международного научного конгресса

Новосибирск
СГГА
2007

УДК 681.2:006:
С 26

Ответственные за выпуск:

координаторы направления «Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника»

Кандидат технических наук, профессор, директор ИОиОТ СГГА *О.К. Ушаков*
Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор
КТИ НП *Ю.В. Чугуй*

С 26 ГЕО-Сибирь-2007. Т. 4. Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2: сб. матер. III Междунар. научн.
конгресса «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апреля 2007 г., Новосибирск. –
Новосибирск: СГГА, 2007. – 215 с.

ISBN 978-5-87693-229-7

ISBN 978-5-87693-235-8 (т. 4, ч. 2)

В сборнике опубликованы материалы III Международного научного конгресса
«ГЕО-Сибирь-2007» направления «Специализированное приборостроение,
метрология, теплофизика, микротехника».

Печатается по решению Редакционно-издательского совета СГГА

Материалы публикуются в авторской редакции

УДК 681.2:006:

ISBN 978-5-87693-229-7

ISBN 978-5-87693-235-8 (т. 4, ч. 2)

© ГОУ ВПО «Сибирская государственная
геодезическая академия», 2007

УДК 378

А.П. Карпик, О.К. Ушаков, Р.Е. Кашилатый, П.В. Петров

СГГА, Новосибирск

Ю.Г. Головачёв, Н.Б. Придачин, ИФП СО РАН, Новосибирск

Б.В. Поллер, ИЛФ СО РАН, Новосибирск

Ю.В. Чугуй, КТИ НП, Новосибирск

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА «СГГА – СО РАН»

Примеры интеграции науки, образования и производства на базе высших учебных заведений известны с давних пор, имеют место в настоящее время, причём, как правило, за рубежом. В нашей стране создание таких комплексных центров осложняется многими причинами, в том числе различной ведомственной принадлежностью академических институтов, вузов и производственных предприятий. Тем ни менее польза от такого сотрудничества очевидна и взаимна, а возникающие сложности при желании могут быть в той или иной мере разрешены. Понимание важности данной задачи происходит на самом высоком уровне и, в частности, было подчёркнуто в постановлении Правительства Российской Федерации от 17.09.2001 г. № 676 «Об университетских комплексах».

Уникальность нашего города состоит в том, что на его территории сосредоточен мощный научно-образовательный потенциал, состоящий из 39 научно-исследовательских институтов СО РАН, составляющий Новосибирский научный центр, Новосибирского государственного университета (НГУ), а также 17 расположенных в городе государственных и значительного числа негосударственных вузов. Исходя из основополагающих принципов Российской академии наук (РАН), за 50 лет существования Сибирского отделения РАН (СО РАН) сложились тесные интеграционные связи между институтами СО РАН и вузами города, такими как НГУ, НГТУ, СГУПС и другими.

Надо признать, что сотрудничество между институтами СО РАН и Сибирской государственной геодезической академией (СГГА) также имеет свою давнюю историю и положительный опыт. Институты СО РАН всё больше заинтересованы в подготовке инженерных кадров высшей квалификации, в частности специалистов по оптическим технологиям, оптоэлектронным приборам, информационным системам и метрологическому обеспечению, а СГГА стремится повысить качество обучения за счёт вовлечения в учебный процесс ведущих учёных СО РАН.

В постановлении Общего собрания СО РАН от 10.12.2004 г. «О проблемах интеграции и развития науки и высшего образования Сибири», в частности, было рекомендовано «институтам СО РАН принимать активное участие в подготовке кадров для инновационной деятельности, усилив *совместно с вузами* внимание к образовательным программам по дисциплинам, направленным на развитие навыков проектной и инженерной деятельности, умения ставить и решать инновационные задачи». В 2005 году администрация Советского района г. Новосибирска организовала ряд совещаний на тему «Роль вузов в формировании инновационного мировоззрения у студентов и в подготовке специалистов для инновационного бизнеса в Советском районе». В

работе совещаний, помимо представителей НГУ и НГПУ, приняли участие и сотрудники СГГА.

В соответствии с обозначенными интеграционными процессами руководство академии, в лице директора Института оптики и оптических технологий (ИОиОТ) Ушакова О.К. и декана факультета прикладной оптико-электроники Кашлатого Р.Е., выступило с инициативой установления более тесных форм сотрудничества с институтами СО РАН. В том же 2005 году было документально оформлено рамочное Соглашение между СГГА и Президиумом СО РАН. Основу данного Соглашения составили двусторонние Договоры между СГГА и некоторыми Институтами СО РАН, такими как:

- Конструкторско-технологический институт научного приборостроения (КТИ НП);
- Институт физики полупроводников (ИФП);
- Институт лазерной физики (ИЛФ);
- Институт автоматики и электрометрии (ИАиЭ).

К слову сказать, на сегодня с академией оформили сотрудничество в образовательной сфере ещё несколько академических институтов:

- Институт экономики и организации промышленного производства (ИЭиОПП);
- Институт химической кинетики и горения (ИХКиГ);
- Институт вычислительной математики и математической геофизики (ИВМ и МГ);
- КТИ прикладной микроэлектроники (КТИ ПМ);
- Институт систем информатики (ИСИ);
- Институт ядерной физики (ИЯФ).

Результатом Соглашения явилось создание Научно-образовательного центра (НОЦ) «СГГА – СО РАН» при Советском отделении факультета прикладной оптико-электроники ИОиОТ СГГА. Идея организации НОЦ получила поддержку главы администрации Советского района Гордиенко А.А. и заместителя главы администрации Новосибирской области Сапожникова Г.А. Развёртывание НОЦ явилось актуальной задачей для удаленного от центра города района, и решало тем самым не только образовательные, но и социальные проблемы. Появилась возможность получения профессиональной подготовки инженеров и последующего трудоустройства выпускников по месту жительства, снималась проблема обеспеченности жильём, появлялась возможность целевой подготовки специалистов под конкретные рабочие места.

Деятельность НОЦ, с момента создания, управляется научно-методическим советом, в состав которого от академии вошли руководители Института оптики и оптических технологий, а со стороны СО РАН – руководители и представители академических институтов. Координатором деятельности НОЦ со стороны СО РАН назначен Ю.Г. Головачёв, зам. директора ИЛФ СО РАН. Координатором деятельности НОЦ от СГГА является О.К. Ушаков, директор ИОиОТ.

В структуру НОЦ входят на сегодня 7 филиалов кафедр академии, базирующиеся в институтах СО РАН:

- Филиал кафедры физики, совместно с ИЛФ (заведующий – профессор, д.т.н. Поллер Б.В., зав. лабораторией ИЛФ СО РАН);
- Филиал кафедры оптических приборов, совместно с ИАиЭ (заведующий – профессор, д.т.н. Потатуркин О.И., зам. директора ИАиЭ СО РАН по науке);
- Филиал кафедры оптоэлектронных приборов, совместно с ИФП (заведующий – доцент, к.ф.-м.н. Придачин Н.Б., учёный секретарь ИФП СО РАН);
- Филиал кафедры технологии оптического производства (по направлению «оптические измерительные технологии»), совместно с КТИ НП (заведующий – профессор, д.т.н. Чугуй Ю.В., директор КТИ НП СО РАН);
- Филиал кафедры экономики недвижимости и землеустройства, совместно с ИЭ и ОПП (заведующий – профессор, чл.-корр. РАН Суслов В.М., зам. директора ИЭ и ОПП СО РАН);
- Филиал кафедры экологии и природопользования, совместно с Институтом почвоведения;
- Филиал кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, совместно с ИВМ и МГ.

По данным 2006 года в Советском отделении СГГА, на базе которого создан НОЦ, работали сотрудники 13-ти институтов СО РАН. Работа над выполнением дипломных проектов и работ проводилась в лабораториях 11-ти академических институтов, учебные практики проходили в 9-ти институтах СО РАН. Подписан договор между Институтом ядерной физики СО РАН и СГГА о целевой подготовке бакалавров по профильным специальностям.

В 2005/2006 учебном году, благодаря совместным организационным и финансовым усилиям руководства академии и директора конструкторско-технологического института научного приборостроения, профессора, д.т.н. Ю.В. Чугуя, была создана в институте лаборатория коллективного пользования по измерительной оптике. В институте химической кинетики и горения организована межведомственная учебно-научная лаборатория информационных технологий в гео- и биоэкологии. В 2007 г. планируется создание учебно-научной лаборатории коллективного пользования по информационной технологии в ИЛФ СО РАН.

Третий год подряд учёные СГГА и СО РАН участвуют в организации и проведении в академии крупного международного конгресса «Гео-Сибирь» в рамках направления «Оптическое приборостроение»: организуются совместные секции, готовятся выступления, редактируются и публикуются научные доклады.

Таким образом, в настоящее время наиболее распространенными формами сотрудничества в рамках НОЦ являются:

- Привлечение сотрудников СО РАН к проведению учебных занятий со студентами СГГА (на внебюджетной основе);
- Проведение экскурсий и познавательных лекций в лабораториях институтов СО РАН;
- Организация учебных практик и дипломирования на площадях институтов СО РАН;

- Пропаганда и реклама научных знаний, достижений в области образования и научной деятельности, в том числе для обеспечения набора абитуриентов на специальности академии, или в дни российской науки;
- Организация курсов повышения квалификации и получения дополнительного образования в соответствии с лицензией академии;
- Подготовка научных и инженерных кадров для работы в структуре СО РАН и кафедрах СГГА;
- Участие в создании межвузовских учебно-научных лабораторий и аудиторий на площадях СО РАН;
- Совместная подготовка методического обеспечения учебных курсов и дисциплин;
- Совместное участие в крупных научных мероприятиях.

В декабре прошлого года НОЦ участвовал в подготовке заявки СГГА на участие в конкурсе вузовских проектов по внедрению инновационных программ в рамках федеральной образовательной программы «Образование».

В начале 2007 года разработан и утверждён план развития НОЦ на ближайшую перспективу. Согласно плану, определены следующие основные задачи.

1. Продолжить совершенствование структуры НОЦ на уровне подразделений, ответственных исполнителей и их функциональных обязанностей.
2. Продолжить совершенствование материально-технической базы учебного процесса СГГА на площадях Институтов СО РАН.
3. Обеспечить полную комплектность методических материалов для учебного процесса, проводимого академией на площадях СО РАН, включая создание электронных версий учебно-методических комплектов.
4. Определить из числа сотрудников Институтов СО РАН наиболее квалифицированные *преподавательские* кадры, включая научных руководителей выпускных квалификационных работ студентов и магистрантов, а также научных руководителей аспирантов и докторантов СГГА.
5. Разработать план индивидуальной подготовки специалистов СГГА для Институтов СО РАН.
6. Подготовить план проведения совместной инновационной политики с учётом создания технопарковой зоны в районе новосибирского Академгородка.

© А.П. Карпик, О.К. Ушаков, Р.Е. Кашлатый, П.В. Петров, Ю.Г. Головачёв, Н.Б. Придачин,
Б.В. Поллер, Ю.В. Чугуй, 2007

УДК 519.8; 536.521

В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, Д.С. Слюсарев
СГГА, Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОМЕТРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХ НЕОДНОРОДНОГО ФОНА

В работах [1, 2] нами разработана математическая модель и методика расчета температурной чувствительности пирометра, работающего по

собственному излучению объектов с учетом отраженного излучения окружающего фона и излучения оптических элементов схемы, которая описывается следующим выражением

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\mu K_3 (1 + U_o/U_{\text{п.э.}} + U_{\text{фон}}/U_{\text{п.э.}}) \sqrt{ab\Delta f}}{A\omega D^* c_2 \left[\left(\frac{1}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_f(\lambda) \varepsilon(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T) d\lambda \right) + \left(\frac{1}{T_{\text{фон}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_f(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, T_{\text{фон}}) d\lambda \right) \right]}, \quad (1)$$

где μ – отношение «сигнал/шум»;

K_3 – коэффициент использования приемником излучения эталонного источника;

$U_{\text{п.э.}}$ – сигнал помехи, эквивалентный электрическому шуму;

U_o и $U_{\text{фон}}$ – интегральные сигналы внутренней оптической и внешней фоновой помех;

a, b – линейные размеры чувствительной площадки приемника излучения;

Δf – полоса частот приемника излучения;

A – площадь входного зрачка объектива пирометра;

ω – телесный угол поля зрения объектива;

D^* – удельная обнаружительная способность приемника излучения;

c_2 – вторая постоянная формулы Планка;

T – термодинамическая (абсолютная) температура поверхности объекта;

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения;

$\tau_o(\lambda), \tau_a(\lambda), \tau_f(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания соответственно объектива, слоя атмосферы и спектрального фильтра;

$\varepsilon(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения поверхности объекта;

λ – длина волны;

$M_e(\lambda, T)$ – спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ);

$T_{\text{фон}}$ – абсолютная температура фона (окружающей среды);

$\rho(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения поверхности исследуемого объекта;

$\varepsilon_o(\lambda)$ – спектральный коэффициент теплового излучения поверхности оптических элементов;

$M_e(\lambda, T_{\text{фон}})$ – спектральная плотность энергетической светимости фона.

В том случае, когда поле температур по поверхности фона неоднородно, то в формуле (1) под $U_{\text{фон}}$ следует понимать среднеквадратическое значение

сигнала помехи $\overline{\Delta U_{\text{фон}}} = \sqrt{\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}} = \sqrt{\overline{(U - U_{\text{фон}})^2}}$, а $T_{\text{фон}}$ и $M_e(\lambda, T_{\text{фон}})$ будут иметь смысл математического ожидания соответственно поля температур фона $\overline{T_{\text{фон}}}$ и функции Планка для светимости АЧТ с температурой $\overline{T_{\text{фон}}}$.

Рассмотрим методику учета влияния неоднородности фонового теплового излучения на температурную чувствительность пирометра истинной температуры [3].

Допустим, что функция распределения поля температур по поверхности фона есть некоторая функция $P(T_{\text{фон}})$. Тогда имеют место следующие соотношения:

$$\overline{T_{\text{фон}}} = \int_{T_{1\text{фон}}}^{T_{2\text{фон}}} T_{\text{фон}} P(T_{\text{фон}}) dT_{\text{фон}}; \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \overline{(T_{\text{фон}} - \overline{T_{\text{фон}}})^2} = \int_{T_{1\text{фон}}}^{T_{2\text{фон}}} (T_{\text{фон}} - \overline{T_{\text{фон}}})^2 P(T_{\text{фон}}) dT_{\text{фон}}. \quad (3)$$

В свою очередь, среднеквадратическое значение сигнала помехи $\sqrt{\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}}$ получится в виде:

$$\overline{\Delta U_{\text{фон}}} = \sqrt{\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}} = \frac{U_{\text{п.э.}} A \varpi D}{K_3 \pi \sqrt{ab \Delta f}} \left(\frac{c_2 \Delta T_{\text{фон}}}{\overline{T_{\text{фон}}^2}} \right) \times \quad (4)$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) d\lambda.$$

В конечном итоге, по аналогии с формулой (1), выражение для температурной чувствительности пирометра истинной температуры при наличии неоднородности поля температур излучения фона, получится в виде:

$$\Delta T_{\text{пор}}^{(\text{н})} = \frac{\pi K_3 \left(1 + U_o / U_{\text{п.э.}} + \sqrt{\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}} / U_{\text{п.э.}} \right) \sqrt{ab \Delta f}}{A \varpi D * c_2 \left[\left(\frac{1}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \epsilon(\lambda) \lambda^{-1} \times \right. \right.} \quad (5)$$

$$\times \frac{1}{\left. \times M_e(\lambda, T) d\lambda \right) + \left(\frac{1}{\overline{T_{\text{фон}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \rho(\lambda) \lambda^{-1} M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) d\lambda \right) \left. \right]}.$$

Рассмотрим случай, когда функция распределения поля температур фона подчиняется нормальному закону:

$$P(T_{\text{фон}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{\text{фон}} - \overline{T_{\text{фон}}})^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Методика расчета температурной чувствительности пирометров при наличии неоднородного поля теплового излучения фона согласно предлагаемой математической модели следующая:

1. Задается диапазон изменения температур фона $\Delta T_{\text{фон}} = T_{\text{фон1}} - T_{\text{фон2}}$.

2. По формуле (2) вычисляется математическое ожидание $\overline{T_{\text{фон}}}$.

3. Полученное значение $\overline{T_{\text{фон}}}$ подставляется в выражение для светимости АЧТ:

$$M_e(\lambda, \overline{T_{\text{фон}}}) = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2 / \lambda \overline{T_{\text{фон}}}} - 1}. \quad (7)$$

4. По формуле (4) определяется среднеквадратическое значение сигнала помехи от фона $\sqrt{\Delta U_{\text{фон}}^2}$.

5. В конечном итоге, по формуле (5), с учетом данных из работ [1, 2] и данных полученных в пп.1–4, определяется значение $\Delta T_{\text{пор}}^{(H)}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тымкул В.М. К расчету температурной чувствительности пирометра с учетом собственного излучения объекта / В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, Н.С. Лебедев // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, №12. – С. 48–52.
2. Математическая модель температурной чувствительности пирометра истинной температуры. ГЕО-Сибирь-2006 / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Д.С. Шелковой, Н.С. Лебедев // Т.4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника: сб. материалов междунар. научн. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24–28 апр. 2006 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 148.
3. Пат. РФ 2219504, МКИ G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры / В.М. Тымкул, Н.С. Лебедев, Д.С. Шелковой, С.А. Воронин /РФ/ – № 2002104325/28; заяв. 18.02.2002; опубл. 20.12.2003; Бюл. №35.

© В.М. Тымкул, Д.С. Шелковой, Д.С. Слюсарев, 2007

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПИРОМЕТРА ДВОЙНОГО ОТНОШЕНИЯ

В настоящее время в оптической пирометрии [1, 2] известен метод двойного спектрального отношения (ДСО) для дистанционного измерения температуры объектов. В основе данного метода лежат два спектральных отношения интенсивностей теплового излучения объекта или цветовых температур, что позволяет существенно снизить влияние излучательной способности на результаты определения теплового состояния тел [1]. При этом значения интенсивностей I_i регистрируются на трех длинах волн λ_1 , λ_2 , λ_3 . Здесь λ_1 , λ_2 , λ_3 берутся таким образом, чтобы выполнялось равенство (1):

$$\lambda_3 - \lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda, \quad (1)$$

$$\begin{array}{c} | \text{-----} | \text{-----} | \\ \lambda_1 \quad \Delta\lambda \quad \lambda_2 \quad \Delta\lambda \quad \lambda_3 \end{array}, \text{ т. е. } \lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda = \lambda_1 + 2\Delta\lambda.$$

Отличие данного метода определения термодинамического состояния тел от других, заключается в том, что здесь необходимая информация о температуре и излучательной способности объекта (материала), берется из регистрируемой монохроматической компоненты спектра излучения и не требует введения дополнительной априорной информации. Это значительно упрощает эксплуатацию прибора и не требует от оператора каких-либо справочных данных.

Выражение для определения термодинамической температуры T наблюдаемой поверхности представляется в виде [1]:

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2\Delta\lambda^2 c_2} \cdot \ln \left(\frac{I_2 / I_1}{I_3 / I_2} \right), \quad (2)$$

$$\text{где } I_i = \frac{1}{\pi} \omega A_o c_1 \lambda_i^{-5} \cdot \frac{\varepsilon(\lambda_i)}{e^{\frac{c_2}{\lambda_i T}} - 1}, \quad (3)$$

A_o – площадь входного зрачка оптической системы;

ω – телесный угол поля зрения;

c_1 и c_2 – 1-я и 2-я постоянные в формуле Планка;

$\varepsilon(\lambda_i)$ – спектральный коэффициент излучения наблюдаемой поверхности на длине волны λ_i .

В том случае, когда регистрируются электрические сигналы $U(\lambda_i)$ на указанных длинах волн, то температура T получается из выражения (4):

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2\Delta\lambda^2 c_2} \cdot \ln \left[\frac{U(\lambda_2) / U(\lambda_1)}{U(\lambda_3) / U(\lambda_2)} \right], \quad (4)$$

где

$$U(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_o(\lambda_i) \cdot \tau_a(\lambda_i) \cdot \varepsilon(\lambda_i) \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i \cdot T} - 1}}. \quad (5)$$

Целью настоящей работы является развитие теории и математической модели работы пирометра двойного отношения в условии воздействия внешней «помехи» излучения фона и внутренней «помехи» излучения оптических элементов схемы прибора.

В этой связи необходимо учитывать, что сигнал, регистрируемый приемником оптического излучения, формируется не только собственным излучением объекта, но и излучением «помех» фона и оптической системы прибора. Влияние фона описывается выражением (6):

$$U_\phi(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot \beta \cdot S(\lambda_i) \cdot \tau_o(\lambda_i) \cdot \tau_a(\lambda_i) \cdot \rho \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i \cdot T_\phi} - 1}}; \quad (6)$$

а оптической системы, выражением (7):

$$U_o(\lambda_i) = \frac{1}{\pi} \cdot A_o \cdot \omega \cdot S(\lambda_i) \cdot \varepsilon_o(\lambda_i) \cdot c_1 \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \frac{1}{\frac{c_2}{e^{\lambda_i \cdot T_o} - 1}}. \quad (7)$$

Таким образом, общий (суммарный) сигнал, который регистрируется приемником оптического излучения, будет составлять сумму сигналов от объекта, фона и оптической системы:

$$U_\Sigma(\lambda_i) = U(\lambda_i) + U_o(\lambda_i) + U_\phi(\lambda_i). \quad (8)$$

Тогда, принимая во внимание влияние «помех», выражение для моделирования работы пирометра двойного отношения примет следующий вид:

$$\frac{1}{T_m} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2 \Delta \lambda^2 c_2} \cdot \ln \left(\frac{U_\Sigma(\lambda_2)}{U_\Sigma(\lambda_1)} \cdot \frac{U_\Sigma(\lambda_3)}{U_\Sigma(\lambda_2)} \right). \quad (9)$$

В формулах (5)–(9) приведены следующие обозначения:

$S(\lambda_i)$ – спектральная чувствительность приемника оптического излучения;

T_o и T_ϕ – температура оптической системы и окружающего фона;

ρ – коэффициент отражения поверхности;

$\tau_o(\lambda_i)$, $\tau_a(\lambda_i)$ – коэффициенты пропускания оптической системы и атмосферы;

β – коэффициент габаритной яркости объекта;

T – задаваемая температура поверхности объекта.

T_m – моделируемая температура поверхности объекта.

Для моделирования работы пирометра ДСО необходимо определить условия работы и задать исходные параметры оптической системы, приемника оптического излучения и материала исследуемого объекта.

При расчете были использованы следующие параметры материала объекта и характеристики пирометра:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 &= 8 \text{ мкм}, & S(\lambda_1) &= 0.91, & \varepsilon(\lambda_1) &= 0.723, \\
 \lambda_2 &= 9 \text{ мкм}, & S(\lambda_2) &= 0.97, & \varepsilon(\lambda_2) &= 0.728, \\
 \lambda_3 &= 10 \text{ мкм}, & S(\lambda_3) &= 0.98, & \varepsilon(\lambda_3) &= 0.725, \\
 \tau_a(\lambda_i) &= \tau_o(\lambda_i) = 1, & \beta &= 1, \\
 A_o &= 27.7 \text{ мм}^2, & \omega &= 3.1 \times 10^{-4} \text{ ср}, \\
 c_1 &= 3.74 \times 10^4 \text{ Вт} \times \text{мкм}^4 \times \text{см}^{-2}, & c_2 &= 1.438 \times 10^4 \text{ мкм} \times \text{К}.
 \end{aligned}$$

В качестве приемника оптического излучения использовался пироэлектрический приемник МГ-32. Диапазон задаваемых температур составляет от -100°C до 100°C . Температура фона и оптической системы принята отличной от задаваемой на 5°C .

Результаты моделирования приведены в таблице и на рис. 1 и 2.

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Использование метода пирометрии ДСО при воздействии «помех» вполне может быть реализовано в приборах дистанционного определения температуры объекта в диапазоне температур от -100°C до $+100^\circ\text{C}$ с минимальной погрешностью;

2. Данный метод действителен для исследования температуры большинства материалов с различным видом графика спектрального коэффициента излучения.

Таблица. Результаты математического моделирования работы пирометра ДСО

Задаваемая температура, ° С	Моделируемая температура объекта, ° С	Моделируемая температура с учетом "помех", ° С
-100	-100.491	-97.665
-90	-90.397	-88.481
-80	-80.314	-79.122
-70	-70.24	-69.578
-60	-60.176	-59.857
-50	-50.122	-49.994
-40	-40.078	-40.044
-30	-30.044	-30.042
-20	-20.02	-20.02
-10	-10.005	-10.005
10	9.995	9.995
20	19.98	19.98
30	29.956	29.956
40	39.922	39.938
50	49.878	49.967
60	59.825	60.072
70	69.761	70.306
80	79.689	80.726
90	89.606	91.357
100	99.514	102.203

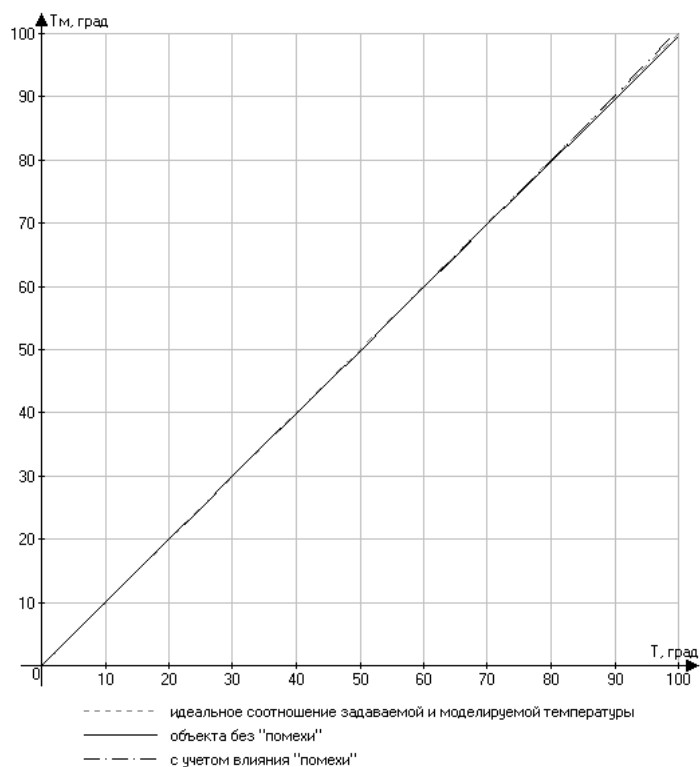


Рис. 1. График сопоставления задаваемой и моделируемой температур

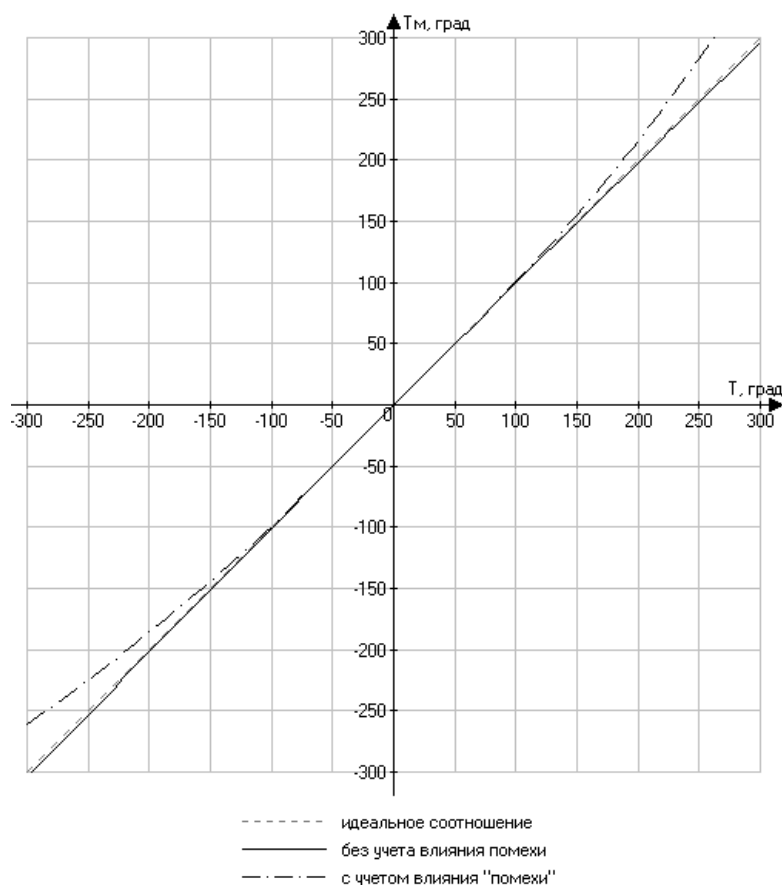


Рис. 2. График сопоставления температур в интервале от -300° до $+300^{\circ}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Снопко, В.Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности / В.Н. Снопко. – Минск: Наука и техника, 1988. – 152 с.
2. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. – М., 1982. – 296 с.

© В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько, 2007

УДК 535.24

Л.В. Тымкул

СГГА, Новосибирск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Вопросам разработки теории и математических моделей работы приборов ночного видения (ПНВ) посвящен ряд работ [1–3]. Так, в работе [1] рассмотрена теория яркости изображений объектов и фонов на экране ПНВ пассивного и активного типов в приближении геометрической оптики. В этой же работе приведены выражения для абсолютного и относительного контрастов объектов на экране ПНВ. В порядке использования теории линейных систем применительно к ПНВ, в работах [2, 3] нами с позиций физической оптики разработаны теория и математическая модель работы ПНВ активного и пассивного типов. В этих работах получены математические модели

пространственно-частотных спектров яркости изображений и фонов, а также аналогичные спектры абсолютного и относительного контрастов, на основании которых представлена методика расчета дальности действия и разрешения.

Интерес к анализу возможностей поляризационных ПНВ вызван, в основном, двумя факторами. Первый фактор связан с возможностью повышения наблюдаемого контраста в поляризованном свете за счет подавления поляризационным фильтром уровня излучения фона. Это позволяет увеличить дальность действия и разрешения ПНВ. Однако, имеет место и другой, противоположный фактор, который заключается в потере энергии оптического излучения объекта при прохождении через поляризационный фильтр в виде линейных поляризаторов или фазовых пластинок. Этот фактор может привести к уменьшению дальности действия и разрешения. Очевидно, что сопоставление этих двух противоположных факторов и формирует суммарный положительный или отрицательный эффект функционирования поляризационных ПНВ.

Целью настоящей работы является разработка математической модели работы ПНВ в поляризованном свете и анализ возможностей повышения их дальности действия и разрешения.

Поставленная цель достигается на основе вектор-параметрического представления Стокса прохождения произвольно поляризованного излучения через оптические элементы ПНВ и формирования в поляризованном свете пространственно-частотных спектров яркости (в дальнейшем спектров) изображений объектов и фонов, а также наблюдаемых относительного и абсолютного контрастов объектов на экране ПНВ.

С использованием результатов работ [2, 3] модули спектра яркости изображений объекта и фона в поляризованном свете можно выразить для ПНВ пассивного типа в виде:

$$L_0(v, \mu) = \{ [L_{0H}(v, \mu) + L_{0L}(v, \mu)][1 + P_0 \cos 2(t_0 - \alpha)] + L_C(v, \mu)[1 + P_\Phi \cos 2(t_\Phi - \alpha)] \} \tau_n h_0(v, \mu) h_\Phi(v, \mu) + L_\Phi(v, \mu); \quad (1)$$

$$L_\Phi(v, \mu) = \{ [L_{\Phi H}(v, \mu) + L_{\Phi L}(v, \mu)][1 + P_\Phi \cos 2(t_\Phi - \alpha)] + L_C(v, \mu)[1 + P_0 \cos 2(t_0 - \alpha)] \} \tau_n h_0(v, \mu) h_\Phi(v, \mu) + L_0(v, \mu). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) приняты следующие обозначения:

$L_{0H}(v, \mu)$ и $L_{0L}(v, \mu)$ – спектр яркости изображения объекта на экране электронно-оптического преобразователя (ЭОП) ПНВ, формирующегося за счет подсветки объектом излучения соответственно ночного неба и Луны;

$L_{\Phi H}(v, \mu)$ и $L_{\Phi L}(v, \mu)$ – тоже самое для изображения фона;

P_0, t_0, P_Φ, t_Φ – степень и азимут поляризации излучения соответственно объекта и фона;

α – азимут поляризации линейного поляризатора, установленного перед объективом ПНВ;

τ_n – коэффициент пропускания поляризатора;

$h_0(v, \mu), h_\Phi(v, \mu)$ – частотно-контрастная характеристика соответственно оптической системы и ЭОПа ПНВ;

v, μ – пространственные частоты по координатам X и Y в спектре изображений на экране ПНВ;

$L_{\Sigma}(v, \mu)$ – спектр яркости темнового свечения экрана ПНВ.

В свою очередь, спектры абсолютного и относительного контрастов в изображении объекта на экране ПНВ представляются в виде:

$$\Delta L(v, \mu) = |L_0(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu)|, \quad (3)$$

$$K(v, \mu) = |[L_0(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu)]/[L_0(v, \mu) + L_{\Phi}(v, \mu)]|. \quad (4)$$

Анализ работы ПНВ показывает, что физически процесс функционирования ПНВ сопровождается формированием как определенной яркости изображения объекта и фона, так и наблюдаемых относительного и абсолютного контрастов в изображении объектов. Поэтому выражения (1–4) представляют математическую модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном свете.

Рассмотрим методику расчета дальности действия и разрешения, основанную на приведенную математическую модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном свете. На основании работы [2], примем, что составляющие спектра яркости изображений объекта и фона равны:

$$L_{0H} = \frac{\kappa \eta_0 \tau_0 L_H d^2 \rho_0 \beta_0}{4(f')^2 g^2} e^{-\beta_{\alpha} l}; \quad (5)$$

$$L_{0Л} = \frac{\kappa \eta_0 \tau_0 E_{Л} d^2 \rho_0 \beta_0 (\alpha_{Л}) \cos \alpha_{Л}}{4\pi (f')^2 g^2} e^{-\beta_{\alpha} l}; \quad (6)$$

$$L_C = \frac{\kappa \eta_0 \tau_0 L_H d^2}{4(f')^2 g^2} (1 - e^{-\beta_{\alpha} l}); \quad (7)$$

$$L_{\Sigma} = \frac{\kappa \eta_0 j}{\kappa_0 \pi \rho g^2}; \quad (8)$$

$$L_{\Phi H} = \frac{\kappa \eta_0 \tau_0 L_H d^2 \rho_{\Phi} \beta_{\Phi}}{4(f')^2 g^2} e^{-\beta_{\alpha} l_{\Phi}}; \quad (9)$$

$$L_{\Phi Л} = \frac{\kappa \eta_0 \tau_0 E_{Л} d^2 \rho_{\Phi} \beta_{\Phi} (\alpha_{Л}) \cos \alpha_{Л\Phi}}{4\pi (f')^2 g^2} e^{-\beta_{\alpha} l_{\Phi}}. \quad (10)$$

В этих выражениях приняты следующие обозначения:

L_H – яркость ночного неба;

$E_{Л}$ – освещенность, формируемая излучением Луны в месте расположения объекта;

κ, κ_0 – коэффициент использования излучения соответственно системой «прибор-глаз» и фотокатодом ЭОП;

d, f' – диаметр входного зрачка и заднее фокусное расстояние объектива;

η_0, θ – коэффициент преобразования и линейное увеличение ЭОП;

ρ_0, ρ_{Φ} – коэффициенты отражения объекта и фона;

β_0, β_{Φ} – коэффициенты яркости поверхности объекта и фона в направлении наблюдения при полусферическом освещении ночным небом;

$\beta_0(\alpha_{Л}), \beta_{\Phi}(\alpha_{Л\Phi})$ – тоже самое при направленном освещении излучением Луны;

τ_0 – интегральный коэффициент пропускания оптической системы ПНВ;

σ – показатель ослабления слоя атмосферы между объектом и прибором;

l, l_Φ – дальность соответственно до объекта и фона;

J – плотность тока термоэлектронной эмиссии ЭОПа;

Φ – интегральная чувствительность фотокатода ЭОПа;

$\alpha_L, \alpha_{L\Phi}$ – угол между нормалью к наблюдаемому участку соответственно объекта и фона и направлением на Луну.

На основании работы [2] ЧКХ оптической системы и ЭОПа выразим в виде:

$$h_0(\nu, \mu) = e^{-2\delta_0(\nu^2 + \mu^2)}; \quad (11)$$

$$h_3(\nu, \mu) = e^{-2\delta_3(\nu^2 + \mu^2)}, \quad (12)$$

где δ_0, δ_3 – диаметр пятна рассеяния соответственно объектива и ЭОПа ПНВ.

Следует отметить, что частоты ν и μ можно связать с размером разрешаемого элемента в пространстве изображений следующим образом:

$$\nu = 1 / a_{1x}; \mu = 1 / a_{1y}, \quad (13)$$

где a_{1x}, a_{1y} – размеры разрешаемого элемента в пространстве изображений соответственно по координате x и y . Так как размеры изображения a_{1x} и a_{1y} связаны с размерами a_x и a_y в пространстве предметов по формулам:

$$a_{1x} = \frac{a_x f' g}{l}; a_{1y} = \frac{a_y f' g}{l}, \quad (14)$$

то получим:

$$\nu = \frac{l}{a_x f' g}; \mu = \frac{l}{a_y f' g}. \quad (15)$$

Сущность методики расчета дальности разрешения ПНВ пассивного типа в поляризованном свете заключается в следующем:

1. Выражения (3) и (4) представляются в виде:

$$\Delta L(\nu, \mu) = |L_0(\nu, \mu) - L_\Phi(\nu, \mu)| \geq m L_3(\nu, \mu); \quad (16)$$

$$K(\nu, \mu) = |[L_0(\nu, \mu) - L_\Phi(\nu, \mu)] / [L_0(\nu, \mu) + L_\Phi(\nu, \mu)]| \geq K_n, \quad (17)$$

где m – отношение сигнал / шум в изображении объекта на экране ЭОПа ПНВ;

K_n – пороговый контраст глаза наблюдателя;

2. Значения m и K_n обычно задаются заказчиком и считаются известными;

3. На основании формул (16, 17) и с учетом соотношений (5–15) проводится расчет абсолютного и относительного контрастов на экране ПНВ, организовав цикл по $l = l_\Phi$ до тех пор, пока рассчитанные значения $\Delta L(\nu, \mu)$ и $K(\nu, \mu)$ не будут удовлетворять условиям:

$$\Delta L(\nu, \mu) = m L_3(\nu, \mu); \quad (18)$$

$$K(\nu, \mu) = K_n; \quad (19)$$

4. Искомая дальность разрешения $l_{\text{разр.}}$ будет равна тому значению l , для которого выполняются условия (18) и (19):

$$l_{\text{разр.}}(\nu, \mu) = l(\nu, \mu) \left| \begin{array}{l} \Delta L(\nu, \mu) = m L_3(\nu, \mu) \\ K(\nu, \mu) = K_n \end{array} \right. \quad (20)$$

Для анализа возможности повышения дальности действия ПНВ пассивного типа, на основе соотношений (16) была получена следующая функциональная связь дальности действия l_n ПНВ в поляризованном свете с дальностью действия l в неполяризованном свете:

$$I_{\Pi} = 1 \sqrt{\tau_n \cdot \left[1 + \frac{\rho_0 \cdot P_0 \cdot \cos 2(t_0 - \delta)}{|\rho_0 - \rho_{\phi}|} + \frac{\rho_{\phi} \cdot P_{\phi}}{|\rho_0 - \rho_{\phi}|} \right]}. \quad (21)$$

Выражение (21) получено для условий работы прибора в безлунную ночь и наличии частичной поляризации отраженного излучения объекта и фона. При этом для частичной компенсации излучения фона принималось, что $(t_{\phi} - \delta) = 90^{\circ}$.

Анализ этого выражения показывает, что при низких значениях степени поляризации объекта и фона ($\rho_0 = \rho_{\phi} = 0,3$) и типичных значениях их коэффициентов отражения ($\rho_0 = 0,5$; $\rho_{\phi} = 0,4$), значения дальности действия I_{Π} ПНВ в поляризованном свете в 1,77 раза больше, чем дальность I в неполяризованном свете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухопаров С.А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения [Текст] / С.А. Сухопаров, Б.А. Пизюта // Труды НИИГАиК / НИИГАиК. – 1974. – Т.32. – С. 45–48.
2. Тымкул В.М. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета [Текст] : учеб. пособие / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.
3. Тымкул Л.В. Оптико-математическая модель приборов ночного видения пассивного типа [Текст]: сб. тез. докл. междунар. конф. "Прикладная оптика-2000" / Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул. – СПб, 2000.

© Л.В. Тымкул, 2007

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ
ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ФОВЕАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГЛАЗА**

Многочисленные гипотезы работы пространственно-частотных (ПЧ) фильтров сетчатки предполагают одновременное действие обоих видов рецепторов (палочек и колбочек). Однако еще в 1936 г. на первой конференции по физиологической оптике в Москве было представлено доказательство того, что палочковое зрение, практически, не функционирует при достаточно высоких уровнях освещенности и широком угле поля зрения. С другой стороны, колбочковое зрение наоборот отсутствует при низких уровнях освещенности. Это явление возникает в результате взаимосвязи аппаратов колбочкового и палочкового зрения, имеющих взаимотормозящее действие. В условиях средних освещенностей и углов поля зрения трудно с достаточной достоверностью определить точную степень взаимного торможения и, соответственно, оценить степень активности в передаче сигнала одного вида рецепторов относительно другого. Но даже если это возможно, то следующим шагом станет необходимость учитывать в математической модели сетчатки глаза топологию взаиморасположения палочек и колбочек. Такая сепарация трудноосуществима, если еще учесть и различие размеров рецепторов в зависимости от их расположения в пределах глазного дна.

Задача упрощается, если рассматривать математические модели ПЧ-фильтров сетчатки, имея в виду только один вид рецепторов, локализованных в четко определенном месте. Очевидно, что такой расчет возможен либо для периферической части сетчатки, где полностью отсутствуют колбочки, либо для центральной части *fovea centralis*, где отсутствует аппарат палочкового зрения и, кроме того, каждая клетка-рецептор является независимым приемником информации, т.е. имеет свое, отдельное, нервное волокно, приобретая в этом сходство с матрицей приемных элементов оптико-электронных приборов.

Структура *fovea* играет исключительную роль в механизме раннего этапа обработки информации в зрительной системе. Число фоторецепторов глаза приблизительно 130 млн., на которые приходится всего около 1 млн. волокон в оптическом нерве. Такое уменьшение пропускания информационного тракта обусловлено отбрасыванием высоких пространственных частот на периферии поля зрения. Эволюция создала область повышенного разрешения в центре сетчатки. Для того, чтобы это разрешение охватывало каждый участок наблюдаемой сцены, глазодвигательная система осуществляет фовеацию – наведение области *fovea* на цель. Таким образом, развитие знания о механизме первичной обработки оптического сигнала фовеальной областью сетчатки представляет большой интерес.

Существующие офтальмологические данные о взаиморасположении отдельных клеток чувствительных рецепторов *fovea* позволяют определить ее топологию как гексагональную решетку с равномерным периодом и распределением одномерных рецепторов (колбочек) в ее узлах (т. н. сотовое

расположение) [1]. Геометрическая модель области чувствительности фовеальной части сетчатки человеческого глаза приведена на рис. 1.

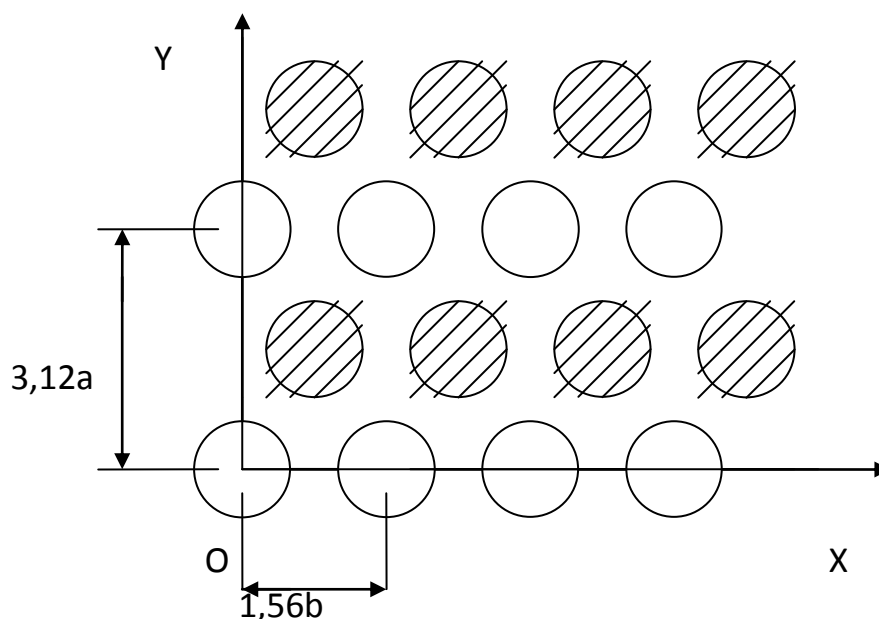


Рис. 1. Геометрическая модель fovea

Заштрихованные и пустые элементы на рисунке можно представить в виде двух массивов (две прямоугольные решетки) чувствительных рецепторов, как бы вложенных один в другой. Такое обозначение необходимо в дальнейшем для упрощения математических расчетов. Согласно [2] область центральной ямки, свободная от палочек (собственно fovea), имеет размер 0,6мм по горизонтали и 0,4мм по вертикали, что составляет соответственно $1,5^\circ$ и 1° поля зрения при аккомодации глаза на бесконечность ($f'_{\text{гл}} = 22,8$ мм). В фовеальной области находятся 25 000 колбочек диаметром 2 мкм, плотность колбочек составляет 100 000 на мм^2 .

Исходя из этих данных, нетрудно определить число рецепторов (период решетки) по двум осям координат X и Y (см. рис. 1) для каждого массива. Период одной из прямоугольных решеток по оси OX составляет $1,56b$, где b – размер рецептора по горизонтали. По оси OY период равен $3,12a$, где a – размер рецептора по вертикали. Смещение каждого следующего ряда рецепторов относительно предыдущего (смещение заштрихованной решетки относительно пустой) составляет $0,78b$ по оси OX и $1,56a$ по оси OY. В дальнейшем можно принять, что a равен b , то есть рецептор имеет округлую форму.

Число рецепторов, использованных в модели, выбрано с таким расчетом, чтобы размер решетки как по одной, так и по другой оси координат соответствовал размеру центральной ямки. Пусть M – число элементов по оси OX, N – число элементов по оси OY, соответственно равные 200 и 100 для того и другого массива рецепторов.

Найдем пространственно-частотную передаточную функцию (ПЧПФ) области чувствительности. Начало системы координат будет расположено в центре фовеальной области. Преобразование Фурье функции одного чувствительного элемента радиусом R , расположенного в начале системы координат YOX, можно представить формулой [3]:

$$W_0(\mu, \nu) = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{I_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2})}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2}}, \quad (1)$$

где I_1 – функция Бесселя первого порядка; μ , ν – пространственные частоты по осям ОУ и ОХ соответственно.

Выражение (1) представляет собой модуль комплексной передаточной функции данного чувствительного элемента. Каждый последующий элемент смещен относительно предыдущего по оси ОХ на расстояние $1,56mb$, где $m = 0, 1, 2, \dots, M$.

На основании теоремы сдвига преобразование Фурье функции для ряда чувствительных элементов с координатами центров $y = 0$, $x = \pm 1,56mb$ (на рис. 1 – незаштрихованный ряд в начале системы координат по оси ОУ) выполняется по формуле [3]:

$$W_1(\mu, \nu) = W_0(\mu, \nu) \cdot \left[\begin{array}{c} 1 + e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot 1,56b)} + e^{i(2\pi \cdot \nu \cdot 1,56b)} + \\ + e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot 3,12b)} + e^{i(2\pi \cdot \nu \cdot 3,12b)} + \dots \\ \dots + e^{i(2\pi \cdot \nu \cdot (M-1)1,56b)} + e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot M \cdot 1,56b)} \end{array} \right], \quad (2)$$

где выражение в скобках представляет собой две геометрические прогрессии, суммы членов которых определяются по формуле.

$$W_1(\mu, \nu) = \frac{1 - [e^{i(2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56b)}]^M}{1 - e^{i(2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56b)}} + \\ + \frac{e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56b)} - [e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56b)}]^M}{1 - e^{i(-2\pi \cdot \nu \cdot m \cdot 1,56b)}} \cdot M^{-1}. \quad (3)$$

Чувствительные элементы второго ряда (на рис. 1 это следующий заштрихованный ряд) смещены относительно первого по оси ОХ на величину $0,78b$, а по оси ОУ на величину $1,56a$. Преобразование Фурье функции для двух рядов решетки запишется в виде формулы:

$$W_2(\mu, \nu) = W_1(\mu, \nu) \cdot \left[1 + e^{i(2\pi \cdot (\mu \cdot 1,56a + \nu \cdot 0,79b))} \right]. \quad (4)$$

Центральные два ряда элементов чувствительной фовеальной области по оси ОУ повторяются с периодом $\pm 3,12a$ в обе стороны от центра. Следовательно, ПЧПФ решетки в целом можно записать в виде формулы:

$$W(\mu, \nu) = W_2(\mu, \nu) \cdot \left[\begin{array}{c} 1 + e^{i(-2\pi \cdot \mu \cdot 3,12a)} + e^{i(2\pi \cdot \mu \cdot 3,12a)} + \\ + e^{i(-2\pi \cdot \mu \cdot 6,24a)} + e^{i(2\pi \cdot \mu \cdot 6,24a)} + \dots \\ \dots + e^{i(2\pi \cdot \mu \cdot (N-1)3,12a)} + e^{i(-2\pi \cdot \mu \cdot M \cdot 3,12a)} \end{array} \right]. \quad (5)$$

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты моделирования для решетки чувствительных элементов фовеальной области сетчатки размером $0,6mm$ по горизонтали и $0,4$ по вертикали.

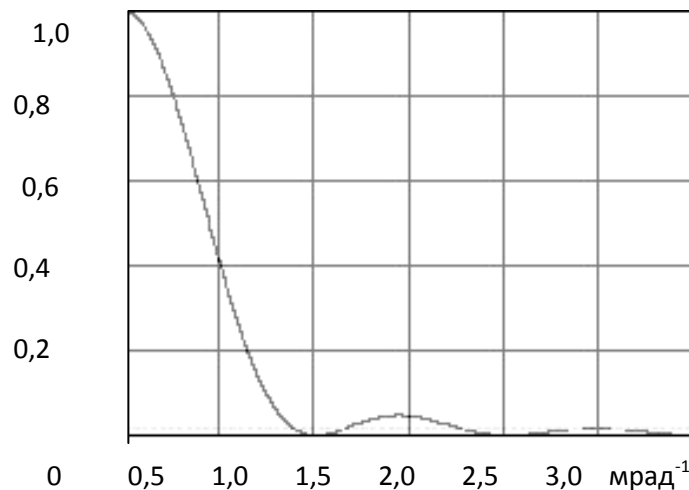


Рис. 2. ПЧПФ решетки при заданных размерах фовеальной области

Имея математическую модель фовеальной области сетчатки, можно представить для нее случай, когда часть элементов сетчатки не функционирует. Для этого достаточно произвести в формулах (3) и (5) несложные изменения с тем, чтобы ряд геометрической прогрессии прерывался на каком-то члене и возобновлялся через некоторый промежуток. Этот эксперимент может иметь конкретное прикладное медицинское значение для моделирования некоторых травматических последствий, приводящих к изменению структуры сетчатки (отслоение) или различных болезненных проявлений (катаракта). Для случая, когда центр решетки «лишен» некоторого массива элементов (удалено 40 % от их общего количества) ПЧПФ принимает вид, представленный на рис. 3.

В дальнейшем, при увеличении размера удаленного массива элементов максимум частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) сдвигается в область более высоких частот, так как второй максимум в районе частоты 1 мрад⁻¹ на рис. 3 становится выше первого, расположенного в районе нулевой частоты.

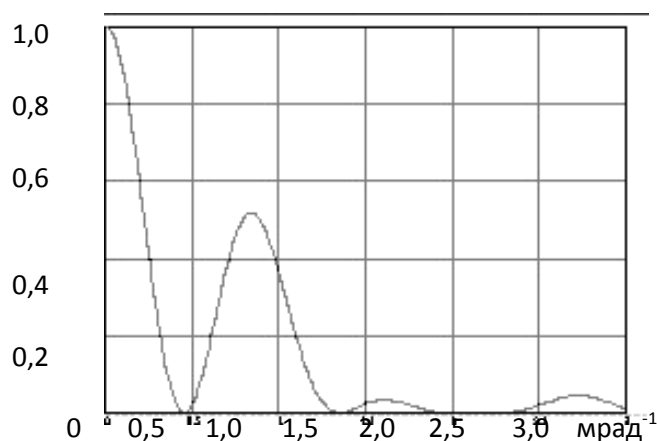


Рис. 3. ПЧПФ с исключением массива элементов

Следует отметить, что на факт смещения максимума ЧКХ для всего глаза из нулевой области в область более высоких частот указано рядом исследователей. В частности, М.А. Островская [4] отмечает существенный спад ЧКХ глаза в районе частот от 0 до 0,25 радиан. Н.Н. Красильников [5] объясняет

снижение ЧКХ в области низких частот действием внутренних шумов на частотах, близких к нулевой. Исходя из результатов исследования представленной модели, можно предположить, что это снижение может быть вызвано наличием в центральной зоне сетчатки так называемого слепого пятна – места, откуда исходит пучок нервных волокон. Это слепое пятно не имеет рецепторов для восприятия света. Таким образом, происходит то самое исключение массива элементов из зоны решетки, близкой к центральной, которое, как уже было показано, вызывает повышение контраста на высоких частотах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел. – М.: Мир, 1990. – 239 с.
2. Луизов А.В. Глаз и свет / А.В. Луизов. – Л.: Наука, 1983. – 275 с.
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. Радио, 1978. – 400 с.
4. Островская М.А. Частотно-контрастная характеристика глаза / М.А. Островская // ОМП. – 1969. – № 2. – С. 45–54.
5. Красильников Н.Н. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека / Н.Н. Красильников // Опт. журн. – 1999. – № 3. – С. 17–23.

© А.Н. Поликанин, 2007

ПРИЦЕЛ-ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ГАЛИЛЕЯ

Известные отличия зрительной системы Галилея по сравнению с земной зрительной трубой [1] включают отсутствие промежуточного изображения, в плоскости которого традиционно размещались прицельные сетки. Именно это до недавнего времени не позволяло создавать прицелы и целеуказатели на основе систем Галилея. В [2] предложено использовать голограмму для формирования изображения прицельной сетки в системе Галилея. В этом случае отсутствие промежуточного изображения не является препятствием. Голограмма позволяет формировать действительное изображение в любой оптической системе, не используя плоскостей с промежуточными изображениями. Схемы записи таких голограмм могут быть различными в зависимости от плоскости, в которой голограмма будет располагаться внутри системы Галилея (или вблизи её передней, или задней оптической поверхности).

Решив проблему внесения прицельной сетки в телескопе Галилея, мы получаем ряд практических преимуществ нового прицела. Это, прежде всего, существенно меньшие габариты и малый вес прибора в целом, по сравнению с традиционными прицелами. Наряду с этим, следует обратить внимание и на тот факт, что зрачок глаза наблюдателя, помещаемый за отрицательным окуляром, фактически является апертурной диафрагмой и выходным зрачком. Следствием этого является отсутствие виньетирования изображения при смещении зрачка в плоскости, перпендикулярной оптической оси, а также отсутствие каких-либо серьёзных ограничений при перемещении зрачка наблюдателя вдоль оптической оси, чего никогда не могло бы быть в традиционном прицеле на основе земной зрительной трубы.

Этот ранее не замеченный приборостроителями результат приводит к очень существенным практическим преимуществам. Действительно, во-первых, устраняются известные проблемы увеличения удаления зрачка, что необходимо для обеспечения нетравмируемости глаза в момент выстрела. Процесс наведения на цель, при этом, может выглядеть так: оператор вплотную приближает глаз к окуляру, увеличивая, тем самым, поле зрения прицела, затем находит цель, помещает её изображение поближе к центру поля зрения, а глаз располагает поближе к оптической оси, одновременно удаляя его на необходимое расстояние от последней оптической поверхности, сужая поле зрения прицела, что уже и не важно, и совершает прицельный выстрел.

Но это только первое преимущество прицела Галилея. Второе заключается в использовании того факта, что изображение прицельной сетки с помощью голограммы создаётся в виде светового сигнала, формируемого голограммой, освещённой источником света, как правило, это светодиод или полупроводниковый лазер. Если обеспечить работу голограммы в диапазоне углов прицеливания (устранив аберрации и эффект селективности), то можно вводить угловую поправку в положение изображения прицельной сетки в

зависимости от расстояния до цели и баллистики снаряда. Более подробно это описано в [2, 3]. Простейшая принципиальная схема такого прицельно-дальномера приведена на рис. 1.

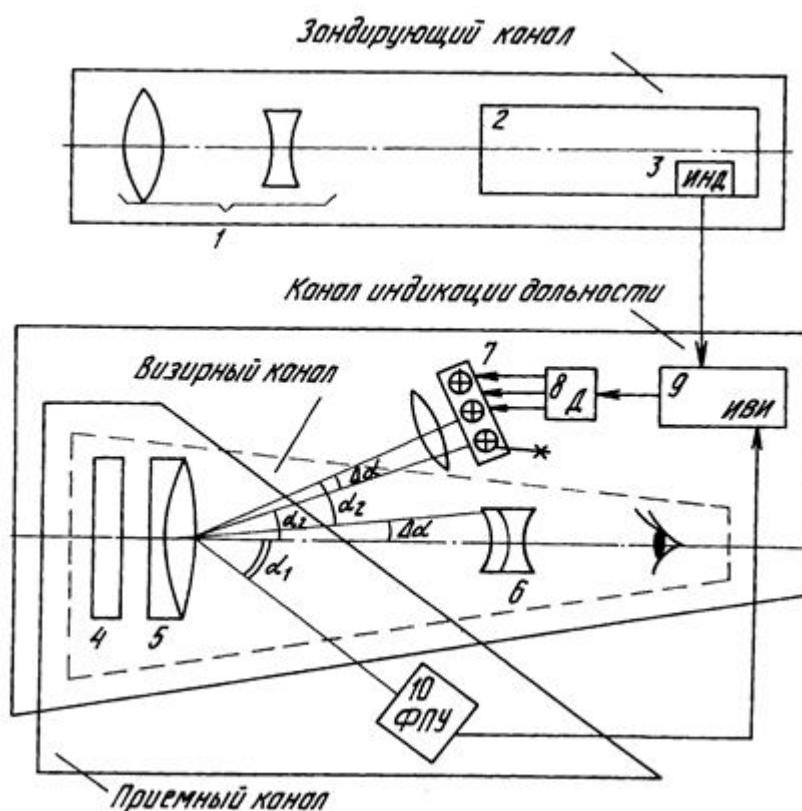


Рис. 1

Такой прибор активного типа наряду с оператором выполняет ряд функций по обработке информации для решения задач поражения противника или других смежных задач. По-видимому, это простейший из известных оптических приборов прицеливания с функциями обработки информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – С. 228.
2. Патент РФ № 2088883 / С.А. Шойдин, Ю.И. Ямщиков и др. 1997.
3. Шойдин С.А. Разработка технологии создания спортивно-охотничьего прицела повышенной стабильности / С.А. Шойдин, В.Ю. Кондаков // Инновац. технологии – 2001 (проблемы и перспективы организации наукоемких производств): материалы Междунар. науч. семинара. Т. 2 / КГУ; под ред. В.И. Кирко, Г.Л. Границкой. – Красноярск, 2001. – С. 54–55.

© С.А. Шойдин, 2007

ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Актуальность возвращения к теме стереодальнометрии обосновывается очередным всплеском интереса к проблеме технического зрения, связанного с быстрым развитием робототехники [1]. Однако широкого применения в системах робототехники техническое зрение ещё не нашло, что связано с большими трудностями обработки больших массивов зрительной информации. Так, в [2] даже уделено специальное внимание замене естественной, окружающей робот среды, на некоторую искусственную среду – её упрощенную модель.

В системах технического зрения для пространственной ориентировки традиционно используются два метода определения расстояния до точки, или "глубины" предмета – это локация и стереодальнометрия [3].

Более универсальным для задач робототехники, не требующим дополнительного оптического канала, является метод стереодальнометрии, в котором для измерения дальности используются два и более изображения наблюдаемого объекта, полученные традиционными оптическими системами "объектив – фотоприемное устройство", причем теми же самыми, что используются и для измерения поперечных размеров. Однако за кажущуюся простоту часто приходится платить большими вычислительными затратами.

Действительно, при наблюдении в стереоскопический дальномер, или компаратор, мы используем вычислительные возможности мозга оператора для выбора точки в вершине угла параллакса. Выбор этой точки происходит на интуитивном уровне, когда глаз наблюдателя видит перед собой цель, объект, на который происходит визирование. Для систем технического зрения такой метод определения точки визирования не подходит. Для её автоматического определения требуется построить вычислительный алгоритм. Прямым решением является вычисление функции автокорреляции. Однако именно такое прямое решение и является очень затратным по объему обрабатываемой информации, поскольку в видимом кадре существует значительная избыточность информации [4].

Для устранения излишней избыточности предлагается сделать процесс обработки изображения двухстадийным. На первом этапе, обрабатывая кадр в целом, можно использовать известные пространственные фильтры и системы оконтуривания, которые широко используются в прицелах и системах определения искусственных объектов на поле естественных, природных объектов [5]. А уже на втором этапе, когда объект наблюдения уже выделен, можно осуществлять автокорреляцию, определяя нужную точку на объекте, или, что чаще бывает на практике, ограничиться произвольной точкой на интересующем объекте. При этом удастся существенно снизить излишнюю избыточность изображений для увеличения скорости определения точки визирования и, тем самым, увеличить быстродействие системы технического

зрения в целом. Таким образом, проблемы информационной избыточности реальных световых полей, несущих информацию о реальной окружающей среде, по-видимому, следует решать именно, разбивая задачу на несколько стадий. Как предложено выше, это фиксация стереоизображения, пространственная фильтрация каждого кадра из стереопары, корреляционная обработка, определение интересующих точек в вершинах углов параллакса и определение всех трёх координат этих точек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солунин В.Л. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / В.Л. Солунин. – М.: ЦНИИ Информатики и гидродинамики, 2007. – 328 с.
2. Теоретические основы робототехники / А.Н. Корендяев и др. – М.: Наука, 2006. – 15 с.
3. Валюс Н.А. Стереоскопия / Н.А. Валюс. – М.: Изд. акад. наук СССР, 1962. – 379 с.
4. Шойдин С.А. Информационная ёмкость голограмм в практических применениях / С.А. Шойдин // Сб. матер. междунар. научн. конгр. "ГЕО-СИБИРЬ 2006". – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 52.
5. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики / Л.М. Сороко. – М.: Мир, 1970. – 486 с.

© С.А. Шойдин, 2007

УДК 681.783

С.А. Шойдин

СГГА, Новосибирск

ВОПРОСЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ СФОРМИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММОЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Информационная емкость голографических изображений не отличается от информационной ёмкости самого оптического сигнала, использованного в качестве объектного пучка для записи голограмм, что, в принципе, следует из первой теоремы о волновом фронте, рассеянном голографической дифракционной решеткой [1]. Однако количество информации, содержащейся в таком голографическом изображении, как правило, существенно превосходит количество используемой как наблюдающим это изображение человеком, так и любым современным техническим средством. В [2] приводились иллюстративные примеры, показывающие, на сколько порядков отличается реальное информационное поле от воспринимаемого, а, тем более, от необходимого для принятия какого – либо решения.

Далеко не всегда мы пользуемся наблюдением за реальным волновым полем, рассеянным предметом. Часто для принятия решения нам достаточно плоского изображения. Например, это происходит при наблюдении за удаленным предметом в телескоп или при наблюдении через телевизионную систему "видеокамера – телеприёмник". Все способы использования человеком объемной зрительной информации собраны и объяснены в [3]. Человек не использует и миллионной доли информации, которую несёт в себе волна, рассеянная реальным объектом или голограммой. Поэтому возникает

необходимость правильной компоновки информации на голограмме, изучения потенциальной возможности уменьшения прямой избыточности на голограмме в пользу увеличения плотности записи полезной информации.

В первую очередь это касается высокого разрешения, присущего голограммам. Их разрешение в видимом диапазоне спектра сравнимо с единицами микрон. Человеческий глаз не способен даже близко подойти к этому пределу. Поэтому возможно сегментирование голограммы, когда разные её участки не сливаются друг с другом непрерывно, а образуют отдельные кластеры, в каждом из которых находится простая дифракционная решетка. Размер кластера должен примерно на порядок превышать период решетки, а расстояние между кластерами должно определяться пределом разрешения человеческого глаза или другого используемого прибора наблюдения. При восстановлении изображения такой голограммой произойдет дифракция на согласованных по фазе кластерах и сформируется нулевой порядок от волны, прошедшей мимо кластеров. Конечно, помимо этой компоненты нулевого порядка, возникнет и дифрагированная на щелях, между кластерами, волна. Это приведет к появлению некоторого шума в изображении, характер которого, впрочем, вполне ясен и может быть достаточно точно вычислен [4].

Высказанная выше гипотеза проверялась на старых голограммах, у которых в процессе старения трескалась и частично отслаивалась от стеклянной подложки желатиновая эмульсия. При этом наблюдался эффект скачкообразного разрушения восстановленного изображения при прохождении через некоторый порог отслоения эмульсии, более чем на размер, на порядок превосходящий период решетки. Это, по-видимому, связано с рассогласованием фаз восстановленных отдельными кластерами волны.

Указанный метод устранения избыточности голограмм может найти применение при разработке синтезированных голограмм и динамических голографических изображений [5], если в качестве кластеров использовать матрицы динамических голографических решеток, например, таких, как акустооптические дефлекторы [6] или др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного излучения / Ю.Н. Денисюк // ДАН СССР. – 1962. – Т. 44. – С. 1275.
2. Шойдин С.А. Информационная ёмкость голограмм в практических применениях / С.А. Шойдин / Сб. материалов междунар. науч. конгр. "ГЕО-СИБИРЬ 2006". – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 52.
3. Гиббсон Дж. Когнитивная психология / Дж. Гиббсон. – М.: Наука, 1977. – 325 с.
4. Соскин С.И. Расчёт оптической системы голографического запоминающего устройства / С.И. Соскин, С.А. Шойдин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44. – № 3. – С. 566-573.
5. Комар В.Г., Серов О.Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф / В.Г. Комар, О.Б. Серов. – М.: Искусство, 1987.
6. Оптическая голография / Р. Кольер и др. – М.: Мир, 1973. – 686 с.

© С.А. Шойдин, 2007

МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОБЪЕМОВ ЧАСТИЦ

1. Теоретическая часть

Интенсивность интерференционной картины, зафиксированной на голограмме, имеет вид:

$$I(x, y) = R(x, y)R^*(x, y) + O(x, y)O^*(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y), \quad (1)$$

где $O(x, y) = o(x, y)\exp(j\varphi_0(x, y))$ и $R(x, y) = r(x, y)\exp(j\varphi_R(x, y))$ –

комплексные амплитуды объектной и опорной волн. Распределение почернения фотоэмульсии физической голограммы либо распределение электрического сигнала цифровой фотокамеры (ПЗС) описывается формулой:

$$h(x, y) = \beta\tau \cdot I(x, y), \quad (2)$$

где β – константа, τ – время экспозиции.

При восстановлении голограммы волной, идентичной опорной, имеет место:

$$R(x, y)h(x, y) = [h_0 + \beta\tau(r^2 + o^2)]R(x, y) + \beta\tau \cdot r^2 O(x, y) + \beta\tau \cdot R^2(x, y)O^*(x, y). \quad (3)$$

Первый член правой части – это нулевой порядок дифракции и соответствует опорному пучку, умноженному на коэффициент; второй член – восстановленная объектная волна, формирующая мнимое изображение; третий член соответствует реальному изображению объекта.

Приближение Френеля

Общая схема установки для записи внеосевой цифровой голограммы показана на рис. 1.1. Плоская опорная и отраженная от объекта волны интерферируют на поверхности ПЗС. Объект является трехмерным телом с диффузно отражающей поверхностью, расположенным на расстоянии d ОП ПЗС.

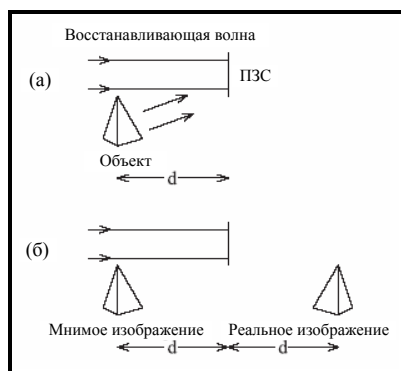


Рис. 1.1. Цифровая голография:
(а) запись, (б) восстановление

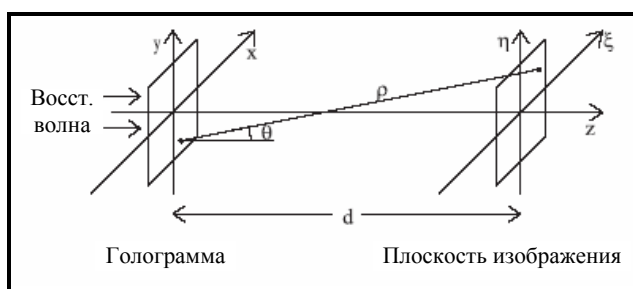


Рис. 1.2. Координатные системы

Дифракция световой волны на голограмме описывается интегралом Френеля-Кирхгофа:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{j}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta\right) dx dy \quad (4)$$

где $h(x, y)$ – функция голограммы; $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$ – расстояние между точкой в плоскости голограммы и точкой в плоскости восстановления; θ – угол между осью z и прямой, соединяющей точку в плоскости голограммы и точку в плоскости восстановления (рис. 1.2), $R(x, y)$ – функция опорной волны.

Формула (4) является основной для цифрового восстановления голограммы. Поскольку восстановленное волновое поле является комплексной функцией, то можно вычислить и интенсивность, и фазу. Эта интересная особенность используется в цифровой голографической интерферометрии.

Интеграл Френеля-Кирхгоффа можно упростить:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) h(x, y) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \quad (5)$$

Эта формула называется *приближением Френеля* или *преобразованием Френеля*. Интенсивность равна квадрату амплитуды $I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2$, фаза вычисляется выражением $\phi(\xi, \eta) = \arctan(\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)] / \text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)])$. Приближение Френеля приводится к *дискретному преобразованию Френеля*:

$$\begin{aligned} \Gamma(m, n) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \\ & \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} R(k, l) h(k, l) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[j2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

где Δx и Δy – это размеры пикселя цифровой голограммы. Дискретное преобразование Френеля может быть вычислено через Быстрое Преобразование Фурье (БПФ).

Восстановление голограммы методом свертки

Прямое вычисление интеграла (4) занимает много времени. Для этой цели более подходит эквивалентная формулировка, называемая здесь *методом свертки*:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathfrak{Z}^{-1} \{ \mathfrak{Z}(h \cdot R) \cdot \mathfrak{Z}(g) \} \quad (7)$$

где $\mathfrak{Z}$ – значок прямого преобразования Фурье, $\mathfrak{Z}^{-1}$ – значок обратного преобразования Фурье, g – импульсный отклик, который в дискретной форме выглядит как:

$$g(k,l) = \frac{j}{\lambda} \frac{\exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2} \right]}{\sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}} \quad (8)$$

Возможно восстановление голограммы методом свертки. Весь процесс требует три операции преобразования Фурье и эффективно выполняется при использовании алгоритма БПФ. Фурье преобразование $g(k,l)$ может быть вычислено и представлено аналитически:

$$G(n,m) = \exp \left\{ -j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \left(n + \frac{N^2 \Delta x^2}{2d\lambda} \right)^2}{N^2 \Delta x^2} - \frac{\lambda^2 \left(m + \frac{N^2 \Delta y^2}{2d\lambda} \right)^2}{N^2 \Delta y^2}} \right\} \quad (9)$$

Это экономит одно Фурье преобразование для процесса восстановления:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathfrak{I}^{-1} \{ \mathfrak{I}(h \cdot R) \cdot G \} \quad (10)$$

Метод свертки может быть применен также для приближения Френеля. Размеры пикселя восстановленного изображения методом свертки равны размеру пикселя голограммы.

2. Экспериментальная часть

2.1. Исследование объемов микрочастиц

Схема установки для записи голограммы объема частиц и распределение интенсивности синтезированной голограммы изображены на рис. 2.1 и 2.2. Объектной волной служит излучение, рассеянное частицами, опорной волной - неискаженное прошедшее излучение.

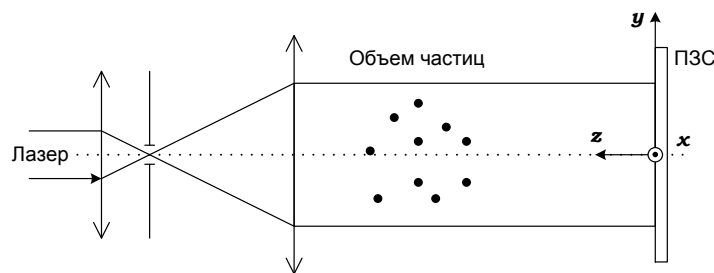


Рис. 2.1. Оптическая схема записи цифровой голограммы объема частиц

Нами синтезирована цифровая голограмма объема частиц с помощью интеграла Френеля-Кирхгоффа, вычисленного через теорему свертки. Применение метода свертки дает возможность получить результаты дифракции от частиц находящихся на одном расстоянии от голограммы. Таким образом,

для получения голограммы от объема частиц при N различных расстояниях частиц от голограммы производится N итераций метода свертки и суммирование результатов каждой из итераций. Размер объекта 1.024 мм по оси x , 1.024 мм по y и 4 мм по z . Расстояние от передней плоскости объекта до плоскости регистрации голограммы равно 10 мм.

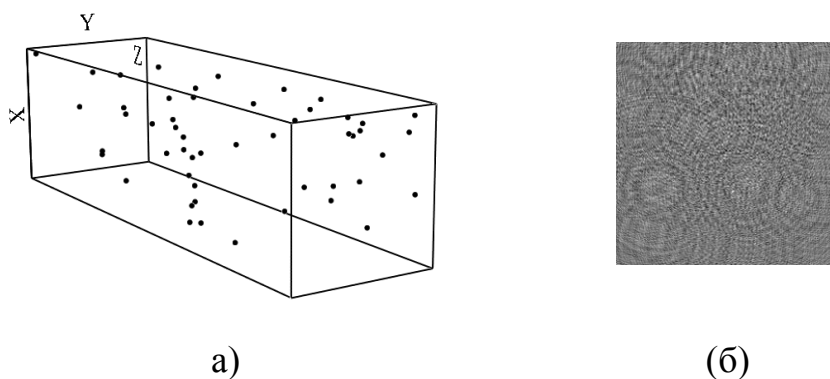


Рис. 2.2. Объем частиц (а), картина интенсивности синтезированной голограммы (б)

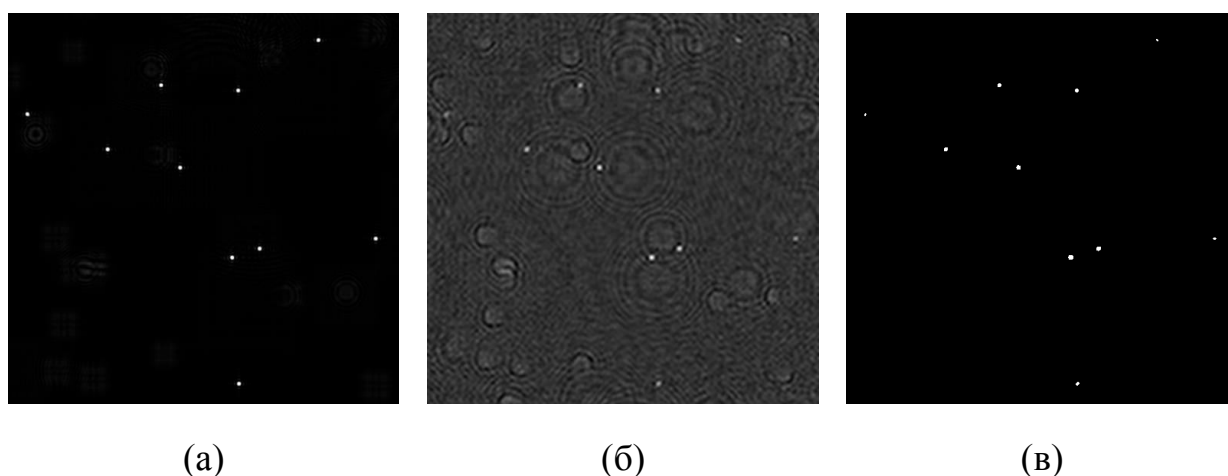


Рис. 2.3. Восстановление голограммы при $d = 13$ мм:

(а) результат восстановления амплитудно-фазовой голограммы, (б) результат восстановления амплитудной голограммы, (в) применение адаптивной пороговой обработки для (б)

На рис. 2.3 представлены результаты вычислений для слоя, находящегося на расстоянии 13 мм от голограммы: (а) восстановление амплитудно-фазовой голограммы, (б) восстановление амплитудной голограммы и (в) применение адаптивной пороговой обработки для (б). В тестовом объекте находилось 50 частиц. Мы использовали 10 восстановлений цифровой голограммы и смогли определить положения всех частиц.

2.2. Восстановление рельефа объекта

Для модельного исследования возможностей цифровой голографии в зондировании рельефа объектов был взят тестовый 3D объект в виде карты высот (рис. 2.4,а). Синтез голограммы (рис. 2.4,в) производился трассировкой лучей при следующих параметрах: размеры объекта по ширине и высоте составляют $2.56 \text{ мм} \times 2.56 \text{ мм}$, расстояние от объекта до голограммы 50 см , длина волны лазера 632.8 нм , разрешение голограммы 512×512 , размер пикселя голограммы $7 \text{ мкм} \times 7 \text{ мкм}$. Эквивалентная оптическая установка показана на рис. 2.4,б. Время расчета голограммы компьютером Intel Celeron 2.4 GHz составило 3 часа.

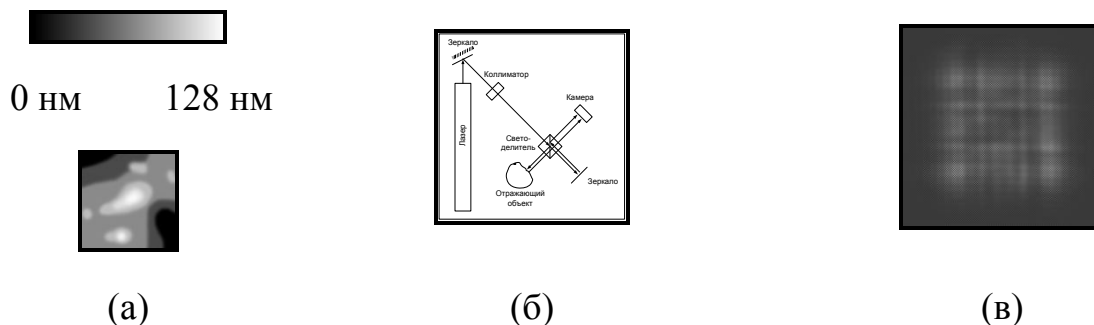


Рис. 2.4. Карта высот исследуемого объекта (а), установка, соответствующая модельной записи голограммы (б) и синтезированная голограмма объекта (в)



Рис. 2.5. Восстановленная фаза объекта при разных параметрах опорной волны:

(а) $kx = cx + 0.0050$, $kx = cy + 0.0050$; (б) $kx = cx + 0.0020$, $ky = cy + 0.0020$; (в) $kx = cx + 0.0005$, $ky = cy + 0.0005$; (г) $kx = cx + 0.0000$, $ky = cy + 0.0000$; где c_x , c_y – найденные параметры опорной волны



Рис. 2.6. Трехмерное изображение исходного объекта (а) и восстановленного объекта (б)

Восстановление фазы объектной волны дает возможность получения рельефа записанного объекта. Амплитудно-фазовая голограмма восстанавливалась при разных параметрах опорной волны (рис. 2.5). В оптическом эксперименте для получения амплитудно-фазовой голограммы можно использовать фазово-сдвиговые методы записи. Рельеф объекта (рис. 2.6,б) строился по распределению фазы, изображенному на рис. 2.5,г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику / Дж. Гудмен. – М: Мир, 1970.
2. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику / Л.П. Ярославский. – М.: Радио и связь, 1987.
3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989.
4. U. Schnars and W. Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. 33, 179–181 (1994).
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006.

© И.Г. Шаталов, Е.Ф. Пен, 2007

УДК 681.3.01 (075.8)

В.С. Кимайкин., Г.А. Сырецкий

НГТУ, Новосибирск

МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Доклад посвящен рассмотрению методов предварительной обработки изображений деталей сложной формы с целью их последующей информационной идентификации. Рассмотрен ряд методов предварительной обработки трехмерных изображений с позиций упрощения и повышения скорости и информативности обработки. В настоящее время во многих отраслях промышленности существует надобность в идентификации заготовок и деталей разной формы с целью контроля в технологическом процессе их наличия в требуемых технологических позициях [1–6] и формирования их технологической, производственной и эксплуатационной информации. Кроме того, существуют производственные ситуации, когда заготовки и детали согласно технологии подвергаются в различных позициях физическим и химическим воздействиям. Для повышения достоверности согласно заданным жестким требованиям к скорости и качеству идентификации необходим анализ внешнего вида детали, представляющей собой трехмерный объект сложной формы. Возникает необходимость в разработке алгоритмов цифровой обработки изображений, которые могут обеспечить информационную идентификацию движущегося объекта с требуемой надежностью на основании морфологических признаков, извлеченных из снимка. Под математической морфологией будем понимать инструмент для извлечения некоторых компонент изображения, полезных для его представления и описания [4].

Для конкретных задач анализа изображений создается множество специализированных методов, которые должны базироваться на строгих математических моделях, что позволит изучать различные алгоритмы в рамках единого подхода, выбирая из них наиболее оптимальные. Знание о проблемной области, т. е. база знаний, может значительно ограничить время анализа изображения.

При решении многих задач анализа изображений (выделения из оцифрованного изображения интересующей информации) используется метод сравнения с эталоном. Реальным подходом реализации данного метода является определение некоторой меры соответствия между частью изображения (деталью на снимке) и эталоном (образцом детали). Пусть $g(i, j)$ – наше дискретное изображение, $t(i, j)$ – эталон и D – область определения эталона, меньшая, чем область определения изображения. Тогда меру соответствия между частью изображения и эталоном можно определить так:

$$M(m, n) = \sum_{\forall i, i-m \in D_m} \sum_{\forall j, j-n \in D_n} |g(i, j) - t(i-m, j-n)|. \quad (6)$$

В качестве метрик могут быть использованы также следующие выражения, удовлетворяющие классу функций, задающему метрики:

$$E(m, n) = \left\{ \sum_i \sum_j [g(i, j) - t(i-m, j-n)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$S(m, n) = \max_{i, j} |g(i, j) - t(i-m, j-n)|, \text{ где } \forall i, j \ (i, j) \in D. \quad (8)$$

Определим функцию взаимной корреляции $R_{gt}(m, n)$ между двумя функциями следующей формулой:

$$R_{gt}(m, n) = \sum_i \sum_j (g(i, j) \cdot t(i-m, j-n)), \quad (9)$$

Эталон и изображение считаются похожими, если взаимная корреляция велика. Альтернативным вариантом к вычислению функции $E^2(m, n)$ является вычисление нормированной функции взаимной корреляции $N_{gt}(m, n)$ по формуле

$$N_{gt}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \sum_j g(i, j)^2}} \cdot R_{gt}(m, n), \quad (10)$$

где $\forall i, j \ (i, j) \in D$.

Согласно неравенству Коши – Шварца,

$$N_{gt}(m, n) \leq \sqrt{\sum_i \sum_j t(i-m, j-n)^2}, \quad (11)$$

причем равенство имеет место лишь в том случае, когда функция интенсивности в интересующей нас области пропорциональна эталонной функции.

Возвращаясь к исходной задаче обнаружения местонахождения детали на изображении и предположив, что уже было выбрано одно из определений расстояния в качестве меры сходства, необходимо спроектировать сам эталон. Проблема в том виде, в котором она поставлена, может быть решена только с помощью целого набора эталонов. Локальные эталоны проектируются таким образом, что они соответствуют различным частям интересующего нас объекта. Работа с бинарным изображением предлагает использовать как минимум два эталона: переход «темное – светлое» и переход «светлое – темное».

При попытке упростить дискретное изображение приходим к методу, называемому анализом областей [6], который заключается в разбиении изображения на множество отдельных областей. Та степень детализации, до которой доводится такое разделение, зависит от решаемой задачи [3]. Сегментация изображений, не являющихся тривиальными, представляет собой одну из самых сложных задач обработки изображений. Идентификация во многом зависит именно от шага разбиения изображения. Для обнаружения линий используется набор масок, выделяющих вертикальные, горизонтальные и диагональные линии. Обнаружение перепадов яркости является общим подходом к нахождению интерпретируемых разрывов на изображении. Можно расширить основные понятия анализа областей, чтобы, кроме интенсивности, включить в анализ и другие характеристики изображений [4]. Одной из наиболее интересных возможностей является разбиение изображения на области в соответствии с цветом. Здесь следует отметить, что имеется возможность использования цвета и в других методах, приведенных в данном обзоре. Например, можно оценивать градиент отдельно по каждой компоненте векторной функции интенсивности предполагаемого изображения детали и затем суммировать значения модулей оценок. Этот процесс подчеркнул бы границы между областями различных цветов даже в случае, когда области на черно-белом изображении имеют одинаковую яркость. Точно так же можно изменить алгоритм сравнения с эталоном, чтобы он мог использовать дополнительную информацию, содержащуюся в векторной функции интенсивности.

В работах по анализу сцен с целью идентификации объектов [1–6] часто повторяется утверждение, что изображение можно упростить, представив объекты на нем в контурной форме. В данном обзоре рассматривается применение градиентных операторов [5]; другой метод, применяющийся для этой же цели, называется прослеживанием контуров [4]. Метод заключается в последовательном вычерчивании границы между объектом и фоном. Границы (контуры) изображения являются элементами, указывающими на резкие изменения свойств изображения. Границы могут отделять светлые и темные области, области с различной текстурой или складки рельефа [6]. Первая производная, взятая при движении вдоль наклонного участка, может использоваться для обнаружения наличия перепада яркости в каждой точке изображения. Аналогично, знак второй производной позволяет определить, лежит ли пиксель, находящийся на перепаде, на темной или светлой его части. Вычисление первой производной цифрового изображения основано на различных дискретных приближениях двумерного градиента. По определению, градиент изображения в точке (x, y) – это вектор

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Направление вектора градиента совпадает с направлением максимальной скорости изменения функции f в точке (x, y) . Важную роль при обнаружении контуров играет модуль этого вектора:

$$\nabla f = |\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (13)$$

Величина ∇f – градиент. Вычисление градиента изображения состоит в получении величин частных производных для каждой точки.

Важной характеристикой является направление вектора градиента[2], которое обозначается как

$$\alpha(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (14)$$

Вернемся к рассмотрению другого метода выделения контуров, который называется прослеживанием контуров. Осуществляется последовательный просмотр изображения до тех пор, пока не будет обнаружена точка, принадлежащая детали. После этого по некоторой кривой начинают просматриваться все точки, лежащие слева от текущей до тех пор, пока проверяемая точка не выйдет за пределы детали. Как только обнаружен выход за границы детали, процесс движения по кривой повторяется вправо. Таким образом, будет прослеживаться граница детали по часовой стрелке. Последовательность точек перехода между деталью и фоном может быть использована для описания контура. Данный алгоритм имеет следующие свойства:

1. Радиус кривизны траектории проверки точек определяет разрешающую способность алгоритма прослеживания контуров. Не получится выделить острые изгибы, контуров, кривизна которых сравнима с кривизной траектории;
2. Если в силуэте детали имеются отверстия рядом с границей, алгоритм может попасть в отверстие, из-за чего возникнут ошибочные точки перехода;
3. Алгоритм в таком виде не совсем определен, так как способ построения центров каждой криволинейной части траектории не был задан.

Данный алгоритм отличается крайней простотой и быстротой работы в большинстве случаев (подразумевается то, что на изображении будет легко прослеживающийся контур детали). В этом алгоритме априорно неизвестное количество операций. В этом можно убедиться, учитывая, что сравниваемый с ним градиентный метод основывается на выполнении нелинейной локальной обработки окном 2×2 по следующей формуле, отличающейся детерминированным количеством вычислений:

$$e(i, j) = \sqrt{[g(i, j) - g(i - 1, j)]^2 + [g(i, j) - g(i, j - 1)]^2}, \quad \text{где} \quad i \in [1; M], \\ j \in [1; N].$$

Расчеты приводятся в табл. 1. При максимально неблагоприятном исходе количество операций для метода прослеживания контуров превышает количество операций метода градиента, но в иных случаях дает ощутимое ускорение в работе.

Таблица 1. Сравнительные характеристики приведенных методов

Метод	Количество операций	Наличие эталона
Эталон 1	$2 \cdot ((M - W_1) \cdot (N - W_2) \cdot W_1 \cdot W_2) + 2 \cdot M \cdot N$	Да
Эталон 2	$7 \cdot ((M - W_1) \cdot (N - W_2) \cdot W_1 \cdot W_2) + 7 \cdot M \cdot N$	Да
Эталон 3	$2 \cdot ((M - W_1) \cdot (N - W_2) \cdot W_1 \cdot W_2) + 2 \cdot M \cdot N$	Да
Эталон 4	$(M - W_1) \cdot (N - W_2) \cdot (5 \cdot W_1 \cdot W_2 + 3) + 4 \cdot M \cdot N$	Да
Связные области	$(M - W_1) \cdot (N - W_2) \cdot 4 + 7 \cdot M \cdot N$ + объединение областей	Нет
Выделение объекта	$(M - W_1) \cdot (N - W_2) + 6 \cdot M \cdot N$	Нет
Градиент	$6 \cdot M \cdot N$	Нет

Таблица 1 содержит информацию, полученную нами в результате анализа следующих описанных выше методов.

Эталон 1 – метод сравнения с эталоном, основанный на (6).

Эталон 2 – метод сравнения с эталоном, основанный на (9).

Эталон 3 – метод сравнения с эталоном, основанный на (8).

Эталон 4 – метод сравнения с эталоном.

Связные области – метод анализа областей.

Выделение объекта – метод прослеживания контуров.

Градиент – градиентный метод выделения контура.

В табл. 1 приняты следующие условные обозначения:

M – размер изображения по оси абсцисс (пикселей);

N – размер изображения по оси ординат (пикселей);

W_1 – размер окна по оси абсцисс (пикселей);

W_2 – размер окна по оси ординат (пикселей);

K – количество коэффициентов Фурье.

В докладе рассмотрены алгоритмы анализа сцен и предварительной обработки изображений объектов разной формы с целью контроля в технологическом процессе их наличия в требуемых технологических позициях. В заключении приводится сравнение описанных методов по ряду характеристик: «количество операций», «наличие эталона». Представленная информация позволяет произвести качественную оценку методов с точки зрения пригодности применения в тех или иных условиях: скорости, качества (надежности) получения обработанных результатов. С точки зрения времени, оценка методов является затруднительной, потому что время выполнения одной и той же операции может значительно варьироваться в зависимости от используемых средств вычислительной техники. В этом случае более информативным параметром является количество операций, которое требуется для завершения обработки при помощи того или иного метода. Как вывод, для повышения скорости и информативности предварительной обработки рекомендуется использовать метод сравнения с эталоном, основанный на применении метрик (6) или (8). Выделение контура методом прослеживания не рекомендуется в связи с высоким риском получения неверного изображения из-за того, что ошибка на первом шаге может повлечь за собой ошибочность всех

дальнейших результатов расчетов. По этой причине рекомендуется использовать градиентный метод выделения контура.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Форсайт Д.А., Понс Ж.. Компьютерное зрение. Современный подход, Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х книгах. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982.
3. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006.
5. Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г. Техническое зрение роботов. – М.: Машиностроение, 1990.
6. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.

© В.С. Кимайкин, Г.А. Сырецкий, 2007

УДК 628.9.041.75

Е.В. Удальцов

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ СЛУЖЕБНОЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА ЛАМПАХ ТИПА ДРЛ

На фоне слабой инфраструктуры российской проводной связи именно широкая распространенность электрических сетей, отсутствие необходимости проведения дорогостоящих монтажных работ, увеличивает интерес к электрическим сетям как среде передачи данных.

Возможность передачи данных по сетям 220 В существовала давно, но сложность состоит в отсутствии стандартов. На данный момент некоторые фирмы разработали оптимизированные протоколы, учитывающие особенности доступа к электрической сети и её зашумленность, созданы недорогие и безопасные передатчики и приемники. Используя один из подходящих протоколов можно дистанционно управлять и даже модулировать излучение осветительных систем.

Целью данной работы является изучение физических параметров хорошо освоенных в производстве стандартных газоразрядных ламп ДРЛ российского производства и описание метода позволяющего использовать ресурсы осветительной сети для односторонней атмосферной оптической связи (АОС) при сохранении в полном объеме её основного назначения в данной сети. Данный метод будет полезен в цехах и производственных помещениях крупных предприятий, сложная электромагнитная обстановка и рельеф в которых затрудняют использование других средств связи для передачи служебных данных на рабочие места. Городская осветительная сеть, модулированная высокочастотными сигналами, не воспринимаемыми глазом, также может быть

использована для передачи служебной информации водителям автомобилей, пешеходам, спецслужбам.

В нашей стране для освещения больших производственных площадей, улиц и открытых пространств широко используются газоразрядные лампы типа ДРЛ. Промышленность выпускает восемь типоразмеров ламп ДРЛ от 50 до 1 000 Вт с напряжением питания 95–145 В и сроком службы 8–12 т. ч. Они рассчитаны на работу при температуре окружающей среды от -40 до +40 °С, при этом напряжение зажигания незначительно возрастает. Согласно ГОСТ 16 354-77 при температуре 20–40 °С напряжение не более 180 В, при -25 °С не более 205 В, а при -40 °С не более 250 В для ламп 80–400 Вт. Относительная влажность не более 90 % при температуре окружающего воздуха 25 °С [1].

Лампа ДРЛ состоит из внутренней кварцевой горелки заполненной парами ртути и инертным газом аргоном под давлением 0,2...0,4 Мпа, пропускающей ультрафиолетовое (УФ) излучение. Известно, что на УФ излучение ртутного разряда высокого давления (ВД) приходится около 40 % всего потока излучения лампы. Горелка помещена в колбу эллипсоидной формы из тугоплавкого стекла. На внутреннюю поверхность колбы нанесен тонкий слой люминофора с добавками редкоземельных элементов, основные линии возбуждения которого лежат в спектре ртутного разряда ВД $\lambda = 313\text{--}365$ нм, преобразующих УФ излучение, проходящее через кварцевые стенки горелки, в видимое и оранжево-красное излучение. В промышленно изготавливаемых лампах ДРЛ применяется состав из фосфат-ванадат иттрия, активированного европием, имеющего четыре узких полосы излучения с максимумами в 535, 590, 618 и 650 нм, в сочетании с фосфатными люминофорами (ортофосфат стронция-магния) с полосой излучения с максимумом в 590–605 нм [2].

Для исследования физических характеристик лампы был собран макет излучателя, рассчитанный на применение самых распространенных типоразмеров ламп ДРЛ 125–250. Спектр лампы ДРЛ-125, производства фирмы Лайнер, полученный с использованием данного макета, показан на рис. 1. Там же приведен спектр лампы со снятой внешней колбой. Измерения проводились на монохроматоре МУМ-5 с фотоприёмником Ф-25. Область спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 300\text{--}850$ нм. Максимум чувствительности $\lambda = 430 \pm 50$ нм.

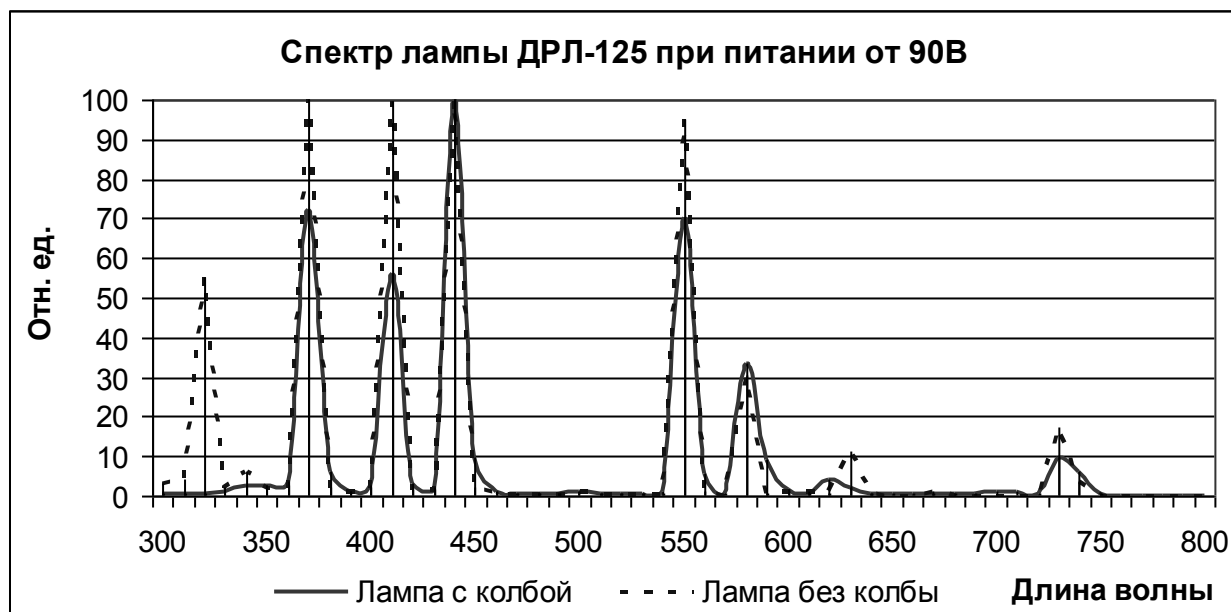


Рис. 1. Спектр лампы типа ДРЛ

Первоначально разряд происходит при низком давлении паров ртути, которое определяется температурой лампы в момент возникновения разряда. По мере разогревания колбы и испарения ртути повышается давление ее пара и вместе с тем изменяются характеристики разряда: поток излучения, световая отдача и яркость. Процесс завершается полным испарением ртути и стабилизацией характеристик разряда [3]. Время разгорания определяется скоростью установления теплового режима колбы и обычно не превышает 5 мин, что подтверждено экспериментально. Время повторного зажигания определяется скоростью ее остывания и в зависимости от мощности лампы, ее конструкции и схемы включения меняется от 3 до 20 минут [3]. Для ДРЛ-125 это время экспериментально составляет от 1–2 минут. Минимальное напряжение необходимое для поджига $U_{\text{под}} = 140$ В, горение поддерживается вплоть до $U_{\text{min}} = 32$ В, при температуре 20°C . Также была получена вольтамперная характеристика лампы, в диапазоне токов от 0,07–1 А она имеет линейную зависимость.

Для получения скоростных параметров исследуемой АОС были проведены измерения глубины модуляции лампы на различных частотах, а также зависимости амплитуды принимаемого оптического сигнала от частоты модуляции. На лампу подавался импульс поджига $U = 180$ В и непрерывное питание $U = 84$ В. Если лампа не загоралась или потухала, то импульс поджига повторялся снова. После стабилизации параметров парогазовой смеси на лампу подавался импульсный сигнал $\tau = 20$ мкс с начальной частотой $f = 10$ кГц с генератора Г5-63. На расстоянии 25 см был зафиксирован на оптической скамье вакуумный приемник Ф-29 с напряжением питания 90 В. Спектральная чувствительность 10 мкА/мВт на $\lambda = 230$ нм. Область спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 220\text{--}330$ нм. Амплитуда сигнала измерялась осциллографом С1-114/1. Полученная зависимость для лампы ДРЛ-125 при изменении частоты от 0,2 до 100 кГц показана на рис. 2.



Рис. 2. Частотные характеристики лампы ДРЛ-125

Время возбуждения и релаксации люминофоров составляет несколько десятков наносекунд, и мало влияют на частотные характеристики лампы. Из полученных данных следует, что скорость АОС, без изменений в конструкции и газовой смеси лампы, скорее всего, не будет превышать 10–12 Кбайт/с, поэтому сфера применения АОС этого типа ограничена передачей служебных данных, тревожных, управляющих и информационных сообщений.

Энергетический расчет АОС на лампе ДРЛ сводится к нахождению освещённости в месте предположительного нахождения приемной части и формулировке рекомендаций к выбору фотоприемника.

Световой поток лампы ДРЛ-125 – $\Phi \approx 6000$ лм, а ДРЛ-250 – $\Phi \approx 13\,000$ лм, при светоотдаче около 48 лм/Вт. Подвесной уличный светильник РКУ дает пучок лучей в виде конуса с углом $2\delta = 90^\circ$. Допустим, световой поток распределен внутри конуса равномерно, тогда силу света I светильника можно определить по формуле:

$$I = \Phi / \Omega = \Phi / (4\pi \cdot \sin^2 \delta) \quad (1)$$

Для лампы ДРЛ-125 $I = 955,4$ кд, а для ДРЛ-250 $I = 2070$ кд. На дорогах общего пользования, для монтажа светильников используются стандартные мачты типа ОПФГ-10 диаметром 190-210 мм внизу и 75 мм вверху, высотой 10 м [4]. Найдем освещённость дороги под светильником по известной формуле:

$$E = I \cdot \cos \varepsilon / l^2, \quad (2)$$

где $\cos \varepsilon = l_1 / l_2$. Для точки под источником $\varepsilon = 0$. Тогда для лампы ДРЛ-125 освещённость составит $I = 9,55$ лк, а для ДРЛ-250 $I = 20$ лк.

Согласно СНиП уличные светильники должны обеспечивать уровень освещения улиц и дорог с нормированной средней яркостью от 0,4–1,6 кд/м² или средней освещенностью 4лк и выше в зависимости от трех установленных категорий [5]. Отсюда по формуле (2) можно найти расстояние, на котором освещённость дороги упадет до 4 лк. Для лампы ДРЛ-125 оно составит примерно 11 м, а расстояние между опорами около 20м, а для ДРЛ-250–20 м, и 40 м соответственно.

Для приемника подойдет любой малоинерционный фотоприемник, например фотодиод время нарастания и спада импульса фотоответа у которого не превышает 1 мкс, а область спектральной чувствительности находится в сине-зеленой части спектра с максимумами, показанными на рис. 2. Например, подойдут фотодиоды ФД-256 и ФД-263. Область спектральной чувствительности которых 0,4–1,1 мкм, темновой ток при $U = 10$ В, не более 0,005 мкА, интегральная токовая чувствительность первого не менее 6 мА/лм, а второго 5 мА/лм, постоянная времени 0,002 мкс и 0,02 мкс соответственно [6]. Отсюда минимальный световой поток, падающий на фотодиод, необходимый для регистрации сигнала должен быть не менее $2\text{--}3 \cdot 10^{-3}$ лм, а световой поток лампы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния и на $L = 20$ м для ДРЛ-125 составит 15 лм. Это говорит о приличном энергетическом запасе лампы на расчётных расстояниях, необходимом для компенсации относительно небольшой глубины модуляции на частотах около 100 кГц и спектральной несогласованности с приемником.

В производственных помещениях нормы освещённости на рабочих местах гораздо выше, поэтому для построения АОС необязательно использовать прямое излучение от лампы, а можно использовать сигнал, отраженный от стен и пола.

С появлением недорогих и экономичных полупроводниковых источников света, например мощных светодиодов и переходом на их использование в осветительных установках в будущем не только не помешает использовать осветительные сети для передачи информации, но и позволит значительно расширить зону их применения.

Из полученных данных можно сделать вывод, что осветительные сети на лампах типа ДРЛ обладают неоспоримыми достоинствами, которые можно использовать для нужд связи. К ним относятся: высокая мощность излучения, широкая зона охвата, распространённость, легкость в замене, электромагнитная совместимость и, как следствие, повышенная помехоустойчивость, безопасность и живучесть. Связь осуществляется в диапазоне $f \approx 400$ ТГц, а значит, не требует лицензирования и отсутствует необходимость в прохождении многомесячной процедуры выделения частот (согласно Женевской конвенции, лицензированию подлежат частоты до 400 ГГц). К недостаткам стоит отнести периодичность работы уличной осветительной сети, широкий спектр излучения лампы, показанный на рис. 1. Передача данных будет сопровождаться явлениями линейного и нелинейного взаимодействия света со средой и обладать повышенной чувствительностью к воздействию метеорологических факторов и техногенных загрязнений, что на расчётных расстояниях не будет играть заметной роли. Скорость передачи данных определяется физическими процессами газового разряда и ограничивается потенциально невысокой частотой и глубиной модуляции лампы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Интернет: <http://www.electrospb.ru/index.html>.
2. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 351 с.

3. Интернет: <http://www.electrik.org>
4. СН 541-82 Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских населенных пунктов. № ДП-5830-1. – М.: Изд-во ГОСГРАЖДАНСТРОЙ, 1981.
5. Городские электрические сети: Справочник / В. Б. Атабеков, В. И. Крюков. – М.: Стройиздат, 1987.
6. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги: Справочник в 5 т. Т. 3. – М.: ИП РадиоСофт, 2000.

© Е.В. Удальцов, 2007

УДК 396.321.

Е.В. Удальцов

ИЛФ СО РАН, Новосибирск

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе [1] было показано, что ультрафиолетовые (УФ) источники излучения используются в различных областях науки и техники и с каждым годом находят новые применения благодаря созданию в последние годы компактных полупроводниковых источников УФ диапазона. Лидерами в этой области остается Япония и страны юго-восточной Азии, в которых, как впрочем, и в других областях производств, сосредоточены технологии из Европы и США.

Целью данной работы является сбор данных о разработках и анализ основных электрических и оптических параметров выпущенных на данный момент полупроводниковых источников УФ диапазона.

В нашей стране производство УФ полупроводниковых светодиодов (СИД) и лазеров находится на уровне научно-технических исследований, но по сравнению с прошлым годом видны позитивные сдвиги. Так, например в Физико-техническом институте Иоффе в Санкт-Петербурге с 2003 года ведутся исследования фундаментальных свойств гетероструктур InGaAlN. На данном этапе, совместно с Техническим университетом Берлина и Промышленно-технологическим институтом Тайвань ведётся разработка технологии производства гетероструктур AlGaIn/GaN, которые будут использованы как активный элемент излучателей и приемников для ближнего УФ диапазона [2].

За рубежом на протяжении последнего десятилетия активно ведутся исследования по созданию полупроводниковых УФ источников излучения. На данный момент лидером в этой области остаётся корпорация NICHIA первая, выпустившая УФ СИД и запатентовавшая ключевые этапы технологии. Кроме того, это единственная компания, серийно выпускающая полупроводниковые УФ лазеры на 370–400 нм [3].

Лаборатория Sandia в США, получив поддержку национального агентства DARPA, занимается исследованиями в области создания полупроводниковых УФ источников для программы SUVOS. В 2003 году на конференции в Альбукерке, Sandia продемонстрировала готовые устройства, работающие на

длине волны 275 нм и 290 нм с 0,4 мВт и 1,3 мВт излучаемой мощности соответственно на основе 50 % смеси нитрида галлия (GaN) с алюминием на подложке из сапфира. Вырастить материал с 50 % содержанием алюминия до этого времени не удавалось. Кроме того, для вывода излучения из кристалла используется прозрачный буферный слой и подложка, поэтому при изготовлении СИД такие кристаллы устанавливаются инверсно. Это нововведение, во-первых, увеличивает выход излучения, так как площадь кристалла физически не заблокирована непрозрачными металлическими контактами, а во вторых монтаж методом перевёрнутого кристалла позволяет увеличить отвод тепла за счет возможности использования материалов с высокой теплопроводностью, что увеличивает КПД СИД в целом. Такие устройства имеют небольшой вес в сочетании с устойчивостью к вибрации и ударным нагрузкам [4, 5].

Разработанные годом позже в US University of South Carolina, кристаллы на основе AlGaIn содержали уже до 72 % алюминия и только 28 % нитрида галлия, что дало возможность создать мощные УФ светодиоды, работающие на длине волны 250 нм и 255 нм с 0,16 мВт и 0,57 мВт излучаемой мощности соответственно [6].

Японские ученые под руководством Йошитака Танюси из лаборатории NTT Basic Research Laboratories в 2006 году объявили об успешном создании СИД для глубокого ультрафиолета на базе нитрида алюминия (AlN) на кремнии с длиной волны порядка 210 нм. Прежде такой состав не применялся для выращивания кристаллов СИД [7].

Корпорация Sensor Electronic Technology, Inc (SETI), США занимается промышленной реализацией разработок лаборатории Sandia и университета Южной Каролины, США. В 2006 году SETI сделала своеобразный прорыв, выпустив СИД ближнего, среднего и дальнего УФ диапазона, выращенные на подложках из сапфира по технологии MEMOCVD. Основные оптические и электрические параметры этих светодиодов приведены в табл. 1 по данным [8]. В настоящее время идет выпуск мелкими сериями в корпусе ТО-39 с различными модификациями: в герметичном исполнении с кварцевым защитным стеклом или кварцевой линзой, а также в открытом исполнении, когда не требуется герметичность. Светодиоды рассчитаны на использование в температурном диапазоне от –30 до 100°С.

Таблица 1. Электрооптические параметры УФ СИД производства SETI

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжение питания* (В)	Потребляемый ток* (мА)	Мощность излучения (мВт) при $I = 20$ мА
UVTOP-255	255	12	6	30	<0,5
UVTOP-265	265	12	6	30	<0,5
UVTOP-270	270	12	6	30	<0,5
UVTOP-280	280	12	6	30	0,5
UVTOP-290	290	12	6	30	0,5
UVTOP-300	300	10	6	30	>0,5
UVTOP-310	310	10	6	30	>0,5
UVTOP-320	320	10	6	30	>0,5
UVTOP-330	330	10	6	30	>0,5
UVTOP-340	340	12	8	50	<1
UVTOP-360	360	12	8	50	<1

* Даны максимальные значения

Корпорация Roithner Lasertechnik (RLT), Австрия за 2006 год заметно расширила спектр изделий в УФ области, по сравнению с прошлым годом, как своего производства, так и стран юго-восточной Азии, табл. 2. Появились мощные УФ кристаллы. На их основе созданы одночиповые и многочиповые СИД, рассчитанные на использование в температурном диапазоне от -20 до 80°C табл. 3, 4 [9].

Таблица 2. Электрооптические параметры УФ СИД производства RLT

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжение питания (В)	Потребляемый ток (мА)	Угол расходимости (градусы)	Мощность излучения (мВт)
RLT350-0.3-15	351	10-12	4,5	20	15	0,2-0,3
RLT350-30	351	20	3,7	20	30	0,3
RLT360-0.5-10	360	20	3,8	20	10	0,5
RLT360-0.5-15	360	20	3,8	20	15	0,5
RLT350-TO-18	351	20	3,7	20	15	0,5
RLT360-1.5-30-3CC	360	20	3,8	60	30	1,5(3·0,5)
RLT360-1.0-15	361	20	4,5	20	10	1
360-PLCC2-120 SMD	360	-	-	20	120	0,5
NS365L-5CLA-2 TO-46	365	15	3,8	20	10	0,4 – 0,6
RLU0408N65 SMD	365	11	3,8	80	120	4,7
UVLED365-10 TO-46	365	10	3,6	20	10	1,4
RLT365 TO-18	365	12	3,6	20	15	0,4
RLT365-525	365	-	-	20	30	0,85
RLU365-1.4-30	365	16	3,9	20	30	1,4

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжени е питания (В)	Потребляе мый ток (мА)	Угол расходимости (градусы)	Мощность излучения (мВт)
NS370L-5RLO	370	12	3,6	20	15	3
NS370L-5CLA-4 TO-46	370	12	3,6	20	10	0,8 – 1,2
RLS-UV370E	370	-	-	20	30	1
RLS-UV370 TO-18	370	-	-	20	15	0,5
RLS370SMD0805 SMD	370	-	-	20	120	1
RLU370-1.7-30	370	13	3,6	20	30	1,7
RLT370 TO-18	373	20	3,6	20	15	0,4
RLT370-10 TO-46	370	12	3,9	15	10	0,75
RLT370-110 TO-46	370	12	3,9	15	110	1
UVLED370-10 TO-46	370	-	-	15	10	0,75
UVLED370-110 TO-46	370	-	-	15	110	1
NS375L-5RLO	375	12	3,6	20	15	6
NS375L-5CLA-4 TO-46	375	12	3,6	20	10	0,8 – 1,2
NS375L-5CLA-5 TO-46	375	12	3,6	20	10	1,2 – 1,8
RLU375-2-30	377	12	3,6	20	30	2
LED375-04 & 33	375	17	3,6	20	34 & 22	2,5
380D30 & SMD	380	15	3,5 & 4	20	30 & 120	3-5
UVLED380-10 TO-46	380	-	-	20	10	2,0-3,4
UVLED380-110 TO-46	380	-	-	20	110	2,8-4,8
E1S09-0P0AP-02 SMD	382	20	3,7	20	110	1,2
RLS-UV380	385	-	3,4	20	15	2
RLU385-2-30	385			20	15	2
LED385-04 & 33	385	17	3,5	20	34 & 22	3,5
385D30	385	15	3,5	20	30	3-5
385D15	385	15	3,5	20	30	3-5
E1L5M-3POAP-02	385	20	3,7	20	110	1,7
E1L5M-4POA2-01	385	20	3,7	20	16	1,5-2,3
E1L5M-4POA2-01	385	20	3,7	20	16	2,3-3,5
E1S09-0P0AP-02 SMD	385	20	3,7	20	110	1,7
HUUV-5102L	393	20	3,4	20	20	2-3
RLS-UV395	395	-	-	20	30	6
RLU395-8-30	395	-	3,6	20	30	8
LEUV-C31A	395	15	3,8	20	-	2
LED395-03V	395	15	3,8	20	24	6
B3B-437-CVD	395	-	3,6	20	30	5-8
LED395-33V	395	15	3,8	20	36	3
LED395-01V & 02V & 03V	395	15	3,8	20	20 & 10 & 24	3
400TO220 TO-220	395	5	3,5	20	60	3,5

Таблица 3. Электрооптические параметры мощных одночиповых УФ СИД RLT

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжен ие питания (В)	Потребляе мый ток (мА)	Угол расходимо сти (градусы)	Мощность излучения (мВт)
M3L1-HU-30*	395	-	3,7	350	30	16
M3L1-HU-60*	395	-	3,7	350	60	16
M3L1-HU-120*	395	-	3,7	350	120	16
C20A1-HU-30	395	-	3,7	350	30	16

Таблица 4. Электрооптические параметры мощных мультичиповых УФ СИД RLT

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжен ие питания (В)	Потребляе мый ток (мА)	Угол расходимо сти (градусы)	Мощность излучения (мВт)
LED355-66-60-110 TO-66, 60 chips	355	-	-	240	110	-
LED360-66-60-110 TO-66, 60 chips	360	20	18	240	110	45
LED370-66-60-110 TO-66, 60 chips	370	20	18	240	110	60
LED375-66-60 TO-66, 60 chips	375	20	17	240	120	150
LED375-66-60-110 TO-66, 60 chips	375	20	17	240	110	150
LED385-66-60 TO-66, 60 chips	385	17	17	240	120	160
LED385-66-60-110 TO-66, 60 chips	385	17	18	240	110	150
LED395-66-60 TO-66, 60 chips	395	15	18	240	120	250
LED395-66-60-110 TO-66, 60 chips	395	15	18	240	110	240
TO3A4-HU-180 TO-3, 4 chips	395	-	4,5	1200	180	60
35L3-HU-60 3 x 1 mm ² power chip	395	-	<4,0	1050	30&60&120	-
C38A8-HU-30 Round 8 chips	395	-	7,6	1400	30&60&120	128
RLT-800-0056 7x42 chips	395	-	4	1260	-	-
RLT-MIL395-12U- 30 12 power chips	395	-	5,4	4200	30&60&120	190
LED395-4x4PC66 TO-66, 16 chips	395	18	14,4	1000	120	260

Компания KINGBRIGHT выпускает недорогие УФ СИД для ближнего ультрафиолета, например L-7113UVC на 395 нм, 36 мкКд, угол расходимости 20°,

а LIGITEK производит линейку УФ СИД со сходными параметрами, например LDUV53393 на 385 нм, 1.2 мВт, угол расходимости 18°. Хочется отметить полученные корпорацией NICHIA мощные (до 30 мВт) УФ лазеры на 370 нм, открывающие поистине широкие возможности в компьютерной, телекоммуникационной и др. областях. Параметры выпускаемых NICHIA УФ СИД и лазеров приведены в табл. 5 и 6 соответственно. Вслед за Nichia, RLT были выпущены коротковолновые лазеры на 400–415 нм, что говорит о скором создании и УФ лазера. Их характеристики также приведены в табл. 6.

Таблица 5. Электрооптические параметры УФ СИД производства NICHIA

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Ширина спектра на $\Delta\lambda/2$ (нм)	Напряжение питания (В)	Потребляемый ток (мА)	Угол расходимости (градусы)	Мощность излучения (мВт)
NCSU033A	365	9	3,2-4,4	500-700	100	190-310
NSHU550B	365	10	3,6	20	100	2
NSHU590B	365	10	3,6	20	10	1,4
NSHU550A	375	10	3,7	20	100	2
NSHU590A	375	10	3,7	20	10	1,4
NCSU001E SMD	380	15	4	500-700	55	85

Таблица 6. Электрооптические параметры УФ и фиолетовых лазеров

Название / Обозначение	Длина волны λ (нм)	Напряжение питания (В)	Плотность тока (мА)	Рабочий ток (мА)	Угол расходимости (градусы)	Мощность излучения (мВт)
NDHU110APAE3	370-380	5,3	55	80	8,5x23	30
NDAV330E1	400-410	-	-	-	-	3000*
NDAV521E1	400-410	-	-	-	-	500**
NDHV220APAE1	400-415	4,2	100	230	8,5x23	200
NDHV310APC	400-415	4,6	40	85	8,5x23	60
RLT415-50PMG	415	3	500	650	8x30	50 (max 0.2 Вт)
RLT415-200PMG	415	3	500	1150	8x30	200 (max 1 Вт)

* Водяное охлаждение, ** воздушное охлаждение

В итоге хочется отметить высокие технико-физические результаты, которых достигли производители СИД. Высокий КПД, срок службы до 10 000 ч открывают широкие возможности для применения УФ СИД в медицине, биологии, криминалистике, а также для обеззараживания и очистки воды и химических веществ, отвержения полимеров, скрытой связи вне прямой видимости, и других. Основными достижениями в развитии технологии производства УФ СИД стали переход в солнечно слепой диапазон, а также увеличение оптической мощности за счет применения более совершенных материалов, роста плотностей тока, применения подложек с очень малым тепловым сопротивлением и создания матричных СИД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.И. Коняев, Б.В. Поллер, Е. В. Удальцов. Обзор некоторых характеристик ультрафиолетовых светодиодов для оптических информационных систем // Конгресс Гео – Сибирь. – 2006. – с. 181.
2. Интернет: <http://www.istc.ru>
3. Интернет: <http://www.nichia.com>
4. UV LEDs break power record // OLE. – 2004, January – p. 13.
5. A.J. Fischer, A.A. Allerman. Device Performance of AlGaIn-based 240-300nm deep UV LEDs // Proc. of SPIE Vol. 5530.
6. UV LEDs emit shortest wavelength // OLE. – 2004, November – p. 13.
7. Интернет: http://www.3dnews.ru/news/ultrafioletovie_led/
8. Интернет: <http://www.s-et.com/index.htm>
9. Интернет: <http://www.roithner-laser.com/newsletter.html>

© Е.В. Удальцов, 2007

УДК 681.7

В.С. Ефремов, О.О. Новиков

СГГА, Новосибирск

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОСТИ ОЭС

В настоящее время перед разработчиками оптико-электронных систем (ОЭС) стоят задачи по повышению их информативности. Одним из возможных решений является обнаружение и распознавание объектов ОЭС, работающих в двух и более информативных диапазонах оптического спектра и даже в субмиллиметровом диапазоне электромагнитного излучения.

ОЭС фирмы «FLIR Systems» широко используются в авиации США. Они состоят из телевизионного и тепловизионного каналов, а также лазерного целеуказателя. Комбинированными оптико-электронными системами наблюдения и прицеливания с телевизионным, тепловизионным и лазерным каналами, а также радиолокационной станцией оснащается и отечественная авиатехника.

Конструкции комбинированных ОЭС получаются очень громоздкими, особенно приборов для наблюдения удаленных объектов, из-за применения набора оптических систем, выполненных из оптических материалов прозрачных в различных диапазонах спектра. Например, ОЭС «Орлан», работающая в диапазоне спектра 0,4–12 мкм (ЦНИИ «Циклон», Москва), состоит из трёх независимых каналов в трёх корпусах общей массой около 15 кг с габаритными размерами 700 × 580 × 520 мм.

Данная работа посвящена поиску путей совершенствования оптической элементной базы многоспектральных ОЭС. Одним из направлений повышения информативности для этих приборов является дальнейшее расширение рабочего спектрального диапазона входного оптического устройства – объектива.

В настоящее время известны устройства, работающие от 0.5 до 12 мкм, в которых используют оптические материалы с низкими физико-химическими

свойствами [1], например, кристаллы хлористого натрия и калия, йодистого калия и цезия, бромистого калия и т.д.

Оптические системы работают нормально в пределах ограниченной области спектра. Линзовые оптические системы пропускают излучение в ограниченном диапазоне длин волн, причем хорошая хроматическая коррекция изображения возможна только для части этого диапазона. Однако области прозрачности материалов часто не совпадают, поэтому большинство материалов и не может быть использовано для цели ахроматизации оптических систем.

В статье рассмотрены объективы, предназначенные для работы в широких областях спектра от 0.4 мкм до 12 мкм и от 0,5 мкм до 300 мкм, содержащие видимый диапазон, тепловизионные диапазоны 3 мкм – 5 мкм, 8мкм – 12 мкм и субмиллиметровый диапазон 100 мкм – 300 мкм.

Поставленная задача решается применением объектива [2] представленного на рис. 1, выполненного по зеркально-линзовой схеме с зеркалом Манжена причём все преломляющие элементы выполнены из одного материала.

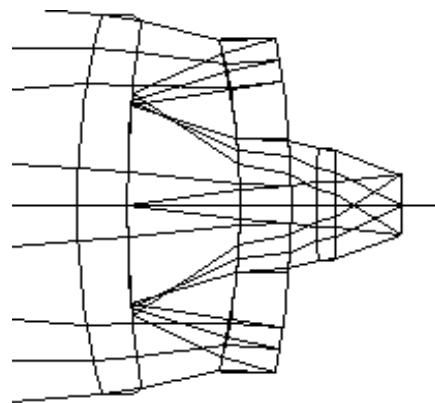
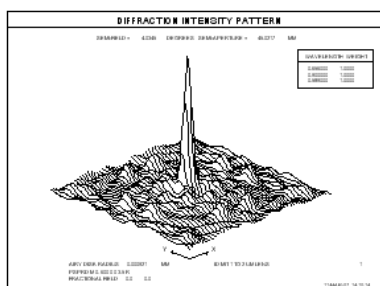
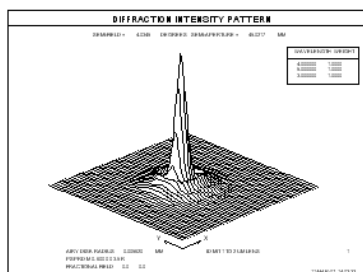


Рис. 1. Оптическая схема объектива

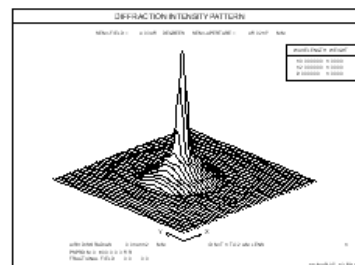
Вариант объектива из фтористого бария обладает достаточно высокими физико-химическими свойствами и прозрачен в диапазоне спектра (0.5–12мкм). При фокусном расстоянии 100 мм, поле зрения 10 градусов и относительном отверстии 1:1 качество изображения довольно хорошее в центре поля зрения, но требует дальнейшей коррекции на краю поля зрения. На рис. 2 и 3 представлена трехмерная геометрическая функция рассеяния точки в центре и на краю поля зрения соответственно для трёх спектральных диапазонов.



а



б



в

Рис. 2. Трехмерная геометрическая функция рассеяния точки для центра поля зрения:

а) диапазон спектра (0.5–0.76 мкм); б) диапазон спектра (3–5 мкм); в) диапазон спектра (8–12 мкм).

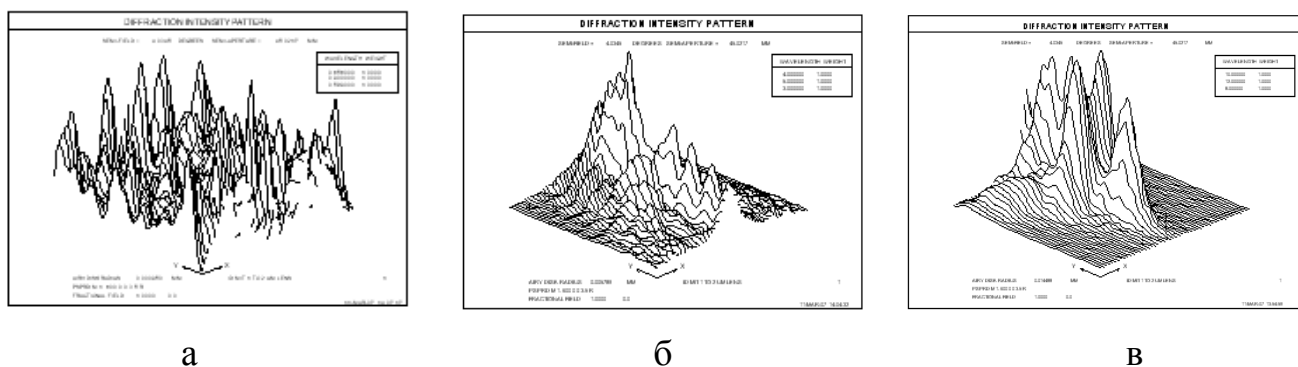


Рис. 3. Трехмерная геометрическая функция рассеяния точки для края поля зрения:

а) диапазон спектра (0.5–0.76 мкм); б) диапазон спектра (3–5 мкм; в) диапазон спектра (8–12 мкм).

В последние годы появились приёмники излучения, работающие в диапазонах спектра 3–14 мкм и 200–3 000 мкм одновременно и приборы на их основе. Например, супергетеродинный тепловизор субмиллиметрового диапазона, сконструирован в МПГУ совместно с ООО Инженерно-технологический центр "СКАНЭКС", имеющий сложную оптическую схему прибора.

Предлагаемый для нового типа ОЭС вариант объектива, выполнен по выше приведённой схеме из сульфида цинка и может служить исходной системой для дальнейших исследований. При фокусном расстоянии 100 мм, поле зрения 10 градусов и относительном отверстии 1:1 качество изображения довольно хорошее в центре поля зрения, но требует дальнейшей коррекции на краю поля зрения. На рис. 4 и 5 представлена трехмерная геометрическая функция рассеяния точки в центре и на краю поля зрения соответственно для трёх спектральных диапазонов.

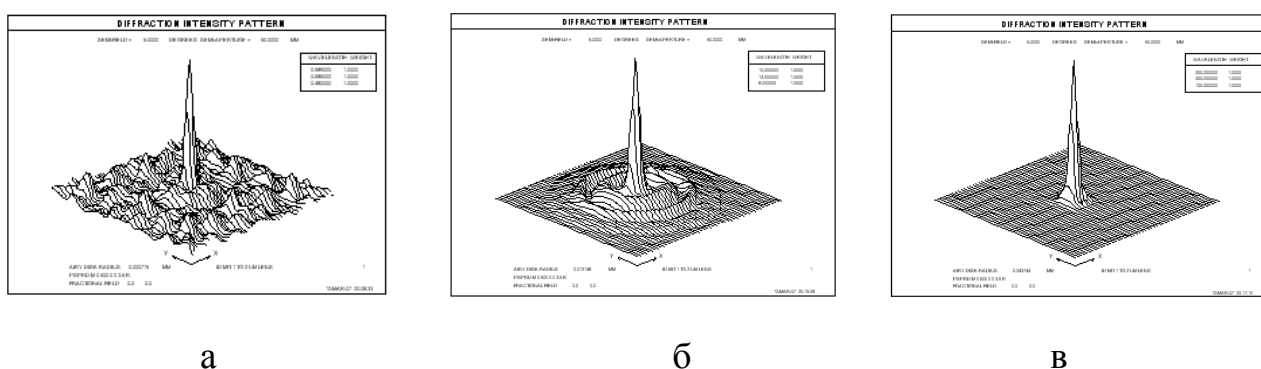


Рис. 4. Трехмерная геометрическая функция рассеяния точки для центра поля зрения:

а) диапазон спектра (0.48–0.686 мкм); б) диапазон спектра (8–12 мкм); в) диапазон спектра (100–300 мкм).

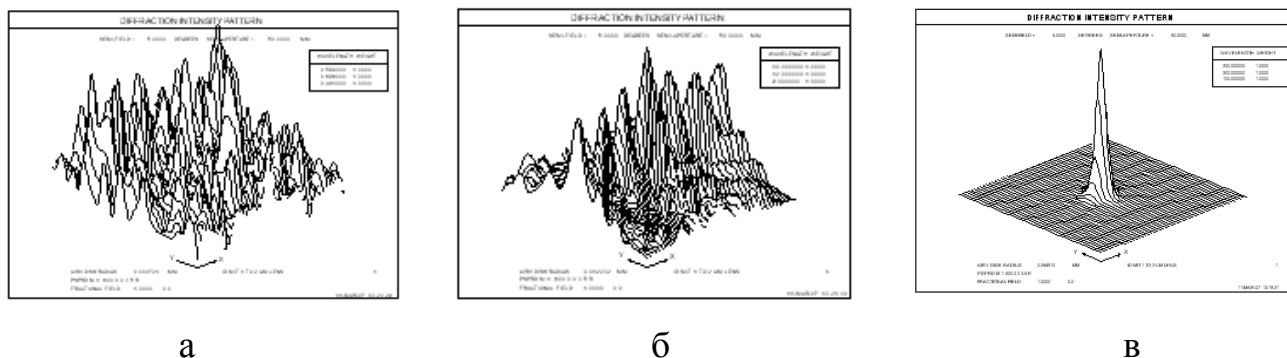


Рис. 5. Трехмерная геометрическая функция рассеяния точки для края поля зрения:

а) диапазон спектра (0.48–0.686 мкм); б) диапазон спектра (8–12 мкм); в) диапазон спектра (100–300 мкм).

Приведённые результаты расчётов оптических систем для разных диапазонов спектра показали, что предлагаемая конструкция объектива достаточно хорошо исправляет хроматические aberrации в каждом из спектральных диапазонов. Полевые aberrации определяются в значительной степени монохроматической составляющей и требуют дальнейшего исследования и исправления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jamieson T.H. Ultrawide waveband // Optical Engineering. – 1984. – V. 23, № 2. – P. 111-116.
2. Егоренко М.П. Зеркально-линзовый объектив для трёх диапазонов спектра / М.П. Егоренко, В.С. Ефремов // Современные проблемы геодезии и оптики: сб. матер. ЛП междунар. науч. - технич. конф. посвящ. 70-летию СГГА. 11-21 марта 2003 г. Ч. II / СГГА. – Новосибирск, 2003. – С. 175.

© В.С. Ефремов, О.О. Новиков, 2007

УДК 681.7.015.2

А.Ю. Луговский, В.С. Танакова

ФГУП ПО НПЗ, СГГА, Новосибирск

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

В настоящее время достигнуты большие успехи в области создания малогабаритных неохлаждаемых матриц. Ряд зарубежных фирм: «Софрадир», Франция; «Боинг», США и другие выпускают микроболометрические матрицы формата 384×288 , 320×240 и 160×120 элементов серийно. Применение таких матриц, чувствительных в области спектра 8–14 мкм, в малогабаритных приборах позволяет получить качественную тепловую картину фоно-целевой обстановки. Кроме того, сохраняются все преимущества тепловизионного прибора:

- Работа во всем диапазоне дневной и ночной освещенностей;
- Возможность наблюдения цели в условиях тумана, дымки;
- Наблюдение за полем боя при постановке искусственных помех (засветки, дымы и пр.).

По имеющейся информации малогабаритные тепловизионные приборы и очки на основе микроболометрической матрицы применяются в армии США.

Поэтому разработка малогабаритных тепловизионных приборов на основе микроболометрических матриц стала необходимостью в наших условиях.

Конструкция тепловизионного канала разработана на основе микроболометрической матрицы для малогабаритного лазерного дальномера ДМЛ-4, шифр «Континенталь – ЦКБ».

Постановка данной работы обусловлена появлением в фирмах «Боинг» США, «Софрадир» Франция и др. микроболометрических матриц формата 160×120 , 240×320 и 384×288 элементов. Кроме того, ряд отечественных фирм в инициативном порядке и по заданию МО разрабатывают микроболометрические модули с характеристиками на уровне зарубежных.

Разработка тепловизионного канала выполняется ФГУП ЦКБ "Точприбор" на основании контракта от 05.08.05 г. № 40/5119.

Разрабатываемый тепловизионный канал предназначен для распознавания цели типа "танк" и "ростовая фигура солдата", а также для поиска и обнаружения цели.

Основными элементами тепловизионного канала на основе микроболометрической матрицы являются:

- ИК-объектив;
- Микроболометрическая матрица в составе;
- Блок электронной обработки информации;
- Электронно-механическая шторка для выравнивания чувствительности элементов матрицы;
- Электронный интерфейс с органом управления.

В процессе выполнения работы был рассмотрен объектив с фокусным расстоянием 150 мм и относительным отверстием $1:1,5$ с ручным фокусирующим кольцом. Объектив состоит из трех линз, из которых первый и третий выполнены из германия, а второй – из безкислородного стекла ИКС25.

Проведенное исследование зарубежного рынка тепловизионных приборов позволило выделить несколько фирм-производителей, продукцию которых можно использовать в нашей разработке.

Все болометрические камеры не соответствуют требованиям ТТЗ по диапазону рабочих температур.

Сведений по механической прочности и надежности не приводится. По информации производителей собственно болометрических матриц – это фирмы Raytheon (США), ULIS (филиал фирмы Sofradir, Франция), Boeing (США) и др. – на российском рынке относительно свободно можно приобрести только матрицы производства ULIS, поэтому в разработке электронного модуля предполагается использовать болометрическую матрицу фирмы ULIS 384×288 . Другим возможным способом получения болометрической камеры

будет его разработка совместно с КТИ ПМ СО РАН. «Решение о порядке создания болометрического фотоприемного устройства» было подписано КТИ ПМ СО РАН и ФГУП «ЦКБ «Точприбор». В рамках этой работы будут выработаны требования к болометрической камере, изготовлены опытные образцы, проведены испытания в составе приборов применения и сертификационные испытания совместно с 22 ЦНИИ МО РФ. Кроме того, эти работы будут проводиться с учетом перехода на микроболометр отечественного производства.

Таблица. Характеристики болометрических фотоприемных устройств.

Наименование параметра	Фирма-производитель, прибор					
	Elcan Specter IR	Micro-CAM IR- μ CAM	FLIR TermaCAM PM695	Nytech Imagin MMB-3000	Raytheon Series 300 Intertech Москва	IR108 ИК матричный детектор
Число элементов матрицы	320x240	320x240	320x240	320x240	320x240	320x240
Размер элемента матрицы		50x50		51x51		45x45
Температурная чувствительность, °C, не менее	0,1	0,1	0,08	0,07	0,1	0,08
Диапазон рабочих температур, °C	-10 +60	-20 +60	-15+45	выше 0	-40 +70	-20 +50°C
Спектральная чувствительность, ЦК	7,5÷12,5	7÷14	7,5÷13	8÷12	8÷12	8÷14

В этой работе будет изготовлена болометрическая камера с характеристиками, обеспечивающими выполнение основных требований ТТЗ.

© А.Ю. Луговский, В.С. Танакова, 2007

УДК 681.7:519.8

Е.В. Грицкевич, П.А. Звягинцева

СГГА, Новосибирск

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАТРИЧНОГО АНАЛИЗАТОРА

Известен ряд работ, в которых рассматриваются вопросы имитационного компьютерного моделирования оптико-электронных анализаторов на базе матричных фотоприемников [1, 2].

В этих работах основное внимание уделяется алгоритмам фильтрации для идентификации таких объектов.

Целью данной работы является разработка методов моделирования оптико-электронного тракта анализатора как системы в целом для компьютерного исследования влияния отдельных звеньев тракта, их параметров и

характеристик на погрешность измерения, что позволяет оптимизировать структуру прибора и согласовать звенья между собой.

Функциональная схема рассматриваемого анализатора представлена на рис. 1.

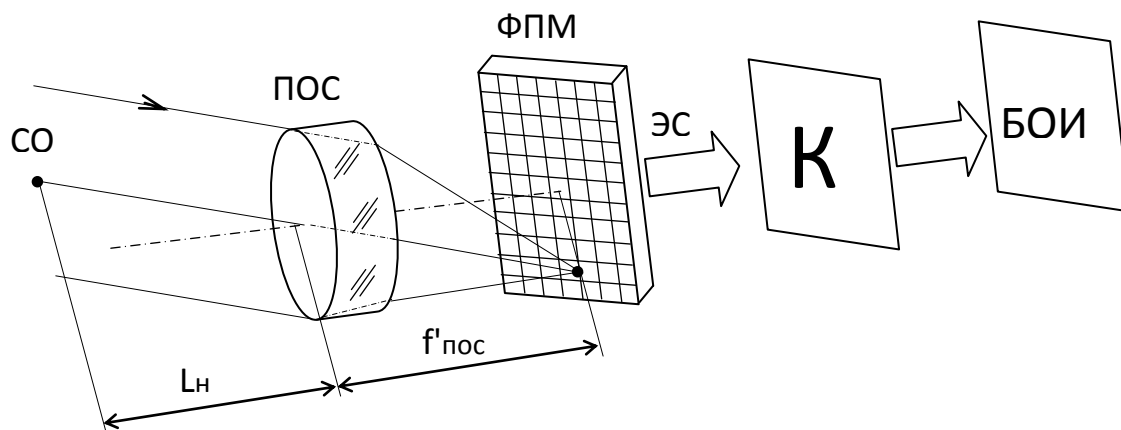


Рис. 1

Светящийся точечный объект СО, находящийся вне оптической оси приемной оптической системы ПОС на расстоянии L_n значительно больше, чем фокусное расстояние $L_n \gg f'_{\text{пос}}$ проецируется в плоскость фотоприемной матрицы, находящейся в фокальной плоскости ПОС.

Объектив ПОС создает изображение этой точки в виде кружка рассеяния с соответствующей функцией рассеяния точки ФРТ ПОС. Накопленные матрицей заряды в виде электрических сигналов записываются в память компьютера К, который обрабатывает их и передает координаты объекта в блок отображения информации. В качестве матричных фотоприемников рассматриваются только приемники с накоплением зарядов.

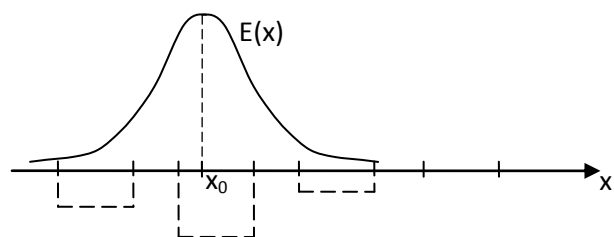


Рис. 2

Пусть ФРТ ПОС представляет собой пространственную гауссоиду, тогда распределение энергии излучения вдоль одной из строк матрицы $E(x)$ можно схематически отобразить следующим образом (рис. 2).

Внизу (под элементами) показан накопленный в каждом элементе фотозаряд,

пропорциональный освещенности каждого элемента. Обработывая сигнал на выходе матрицы, например, методом поиска энергетического центра тяжести пятна рассеяния, можно с достаточной степенью точности определить линейные координаты центра объекта (самой светящейся точки), приведенные к плоскости ФПМ, а затем пересчитать эти координаты в значения соответствующих углов в пространстве предметов.

Рассмотрим две крайние ситуации.

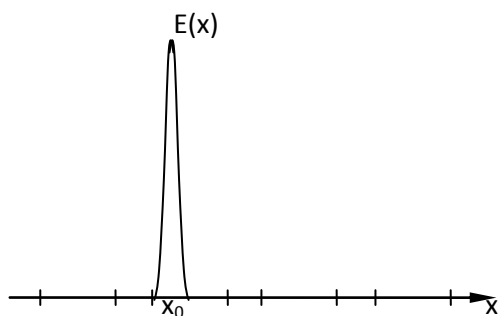


Рис. 3

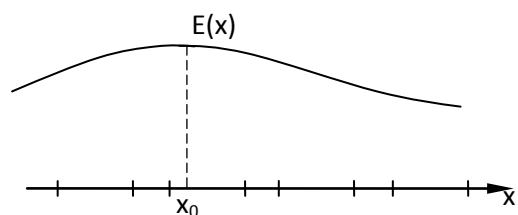


Рис. 4

На рис. 3 изображено пятно рассеяния, создаваемое практически идеальной оптической системой и занимающее незначительную часть одного элемента матрицы. Очевидно, что перемещение пятна в пределах элементов не отобразится на величине сигналов, снимаемых с каждого элемента. Поэтому точность измерения координат будет определяться только размерами элементов. Более того, если пятно попадет в промежуток между фоточувствительными площадками, то сигнал будет вообще потерян. И только «расширяя» пятно, т.е. переходя к рис. 2, можно будет учитывая асимметрию зарядов на смежных элементах более точно определить эти координаты. Причем, попадание центра тяжести в зазор не будет влиять на точность результата. Если пятно увеличить, то в зону обработки будет попадать все большее количество элементов, что должно привести к повышению точности, однако, разница сигналов на выходе смежных элементов становится меньше значения шумов снимаемого видеосигнала (см. рис. 4). В конечном счете, полезный сигнал будет просто «потерян» в помехах.

Таким образом, «идеальной» для подобного анализатора будет являться оптическая система не с минимальным радиусом кружка рассеяния, а со строго определенным, соответствующим геометрии матрицы.

Предлагаемая имитационная модель, реализованная на компьютере, позволяет исследовать подобные системы с учетом уровня полезных сигналов, шумов матрицы, положения центра пятна в поле зрения, применяемого алгоритма, параметров и характеристик объекта, оптики и фотоприемника. В конечном счете, путем многократного сквозного анализа оптико-электронного тракта при различных параметрах его звеньев возможно достижение минимальной погрешности измерения координат.

Важно отметить, что ФРТ как оптимизируемый параметр выбран здесь в качестве примера (как наиболее наглядный). В действительности, такими параметрами могут быть и другие количественные характеристики различных звеньев тракта (например, геометрические размеры структуры матрицы, объекта и т. п.), что делает применяемую модель универсальной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами / В.В. Малинин. – Новосибирск: Наука, 2005. – 256 с.

2. Малинин В.В. Энергетический расчет систем ориентации по звездному полю / В.В. Малинин, А.В. Фалеев // Научные основы высоких технологий. Т. 1. Автоматика. Электроника. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997.

© Е.В. Грицкевич, П.А. Звягинцева, 2007

УДК 620:191.33:681.7.624.012

Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов, П.А. Верецагин
СГГА, СибНИА им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящее время благодаря новым разработкам в физике твердого тела и волоконной оптике, и существенного снижения стоимости оптического волокна и полупроводниковых приборов (в частности, полупроводниковых лазеров и приемников оптического излучения) стало доступным применение датчиков на основе оптического волокна, причем не только на предприятиях, но и для неразрушающего контроля состояния зданий и других инженерных сооружений, а также их отдельных частей.

Насколько это востребовано? Обратимся к не столь давним событиям 2006 года, который стал несчастливym для строительных конструкций и десятков граждан. Московские трагедии в аквапарке 14 февраля 2006 года и на Басманном рынке в феврале того же года унесли жизни более 100 человек. Другие, например, обрушение крыши автомобильного рынка в Калининграде, подъезда жилого дома в Выборге, появление трещин в стене городской поликлиники № 1 в Новосибирске летом 2006 г. хоть и обошлись без жертв, но все же заставляют задуматься о необходимости создания диагностических систем, которые могут помочь предотвратить возможные людские жертвы.

Конечно, невозможно поставить датчики на каждый дом – но это, впрочем, и не нужно. Однако они необходимы в тех зданиях, где постоянно собирается большое количество людей, например, на рынках или в тех или иных развлекательных центрах, весьма желательно ставить такие системы, чтобы контролировать фундаменты многоэтажных зданий – в особенности потому, что качество строительства за последние годы падает, а объемы растут.

В ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» ведутся работы, направленные на разработку систем строительного мониторинга на базе волоконно-оптических датчиков. Исследования развиваются в следующих направлениях.

– Исследование современного состояния и перспективы развития оптоэлектронных систем с использованием волоконно-оптических датчиков.

– Исследование волоконно-оптического тракта для разработки оптоэлектронной системы контроля усталостной повреждаемости элементов механических конструкций.

- Исследование механических характеристик оптического волокна для разработки оптоэлектронной контрольно-измерительной системы.
- Исследование характеристик полупроводниковых оптронов открытого канала для волоконно-оптических систем.
- Теоретическое исследование волоконно-оптических преобразователей на основе полупроводникового оптрона открытого канала с нарушенным полным внутренним отражением.
- Исследование систем мониторинга на базе волоконно-оптических датчиков на строительных объектах.
- Экспериментальные работы по разработке систем мониторинга макрообъектов с применением волоконно-оптических датчиков были разбиты на следующие циклы испытаний.
- Испытания оптоэлектронной системы с применением волоконно-оптических датчиков для контроля усилия (давления).
- Испытания волоконно-оптического световода на поперечные нагрузки в плоскости.
- Испытания волоконно-оптического датчика деформаций на базе многомодового и одномодового волоконно-оптического световода.
- Испытания волоконно-оптического датчика предразрушения.
- Испытания оптоэлектронной системы для определения предразрушения конструкций летательных аппаратов с помощью волоконных световодов.

С точки зрения контролируемых параметров экспериментальные исследования были направлены на создание систем, позволяющих контролировать следующие параметры объекта:

- Деформации (растяжение, сжатие);
- Перемещения;
- Трещинообразование;
- Предразрушения.

На данный момент в арсенале ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» присутствуют волоконно-оптические датчик деформаций амплитудного типа, датчик предразрушений а также волоконно-оптический датчик влажности.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик оптоволокна, с целью использования его в качестве чувствительного элемента датчика накопленной усталостной повреждаемости (ЧЭ ДНУП) элементов механических конструкций.

В основном исследованы кварцевые волокна, уровень затухания в которых при длине волны 0,85 мкм составляет 3 дБ/км.

Также, исследовались полимерные волокна. Они имеют малый удельный вес, большую гибкость при относительно большом диаметре, механическую

прочность, высокую технологичность. Достигнутое минимальное затухание при длине волны 0,66 мкм – 20 дБ/км [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к оптоволоконным ЧЭ ДНУП, является механическая надежность, т.е. неразрушаемость при установке в условиях действия растягивающих напряжений, вибраций, перепадов температуры, влажности. Обеспечение надежности достигается, в первую очередь, за счет высокой прочности оптоволокна, благодаря усовершенствованию технологии вытяжки, защиты кварцевого волокна полимерным покрытием. Однако, кинетическая природа разрушения может принципиально ограничить долговечность τ волокна. Прочность и долговечность бездефектных волокон рассмотрены в работе [2], где использовано кинетическое уравнение прочности в виде:

$$\tau = \tau_0 * \exp((U_0 - \gamma * \sigma_*) / kT), \quad (1)$$

когда интересуются долговечностью τ волокна при заданном растягивающем напряжении σ_* и абсолютной температуре T , либо в виде:

$$\sigma_* = (1/\gamma) * (U_0 - kT * \ln(\tau/\tau_0)), \quad (2)$$

если требуется знать прочность волокна на разрыв σ_* при определённой длительности испытания τ и температуре T . В этих уравнениях основными прочностными параметрами являются U_0 – энергия межатомной связи и γ – активационный объем. Здесь k – постоянная Больцмана, а величина τ_0 – порядка периода тепловых атомных колебаний 10^{-13} с.

Другим принципиальным ограничением надежности световодных волоконных линий является размерный эффект, снижающий прочность и долговечность при увеличении длины волокна. При кинетическом подходе размерный эффект связан с параметром γ :

$$\gamma = nV_d, \quad (3)$$

где V_d – активационный объем элементарного акта разрушения; n – параметр, зависящий от дефектности материала. В отсутствие дефектов $n = 1$. Для стекла $V_d = 1,8 \cdot 10^{-23}$ см³.

Согласно [3], в бездефектных образцах проявляется термофлуктуационный тип размерного эффекта. Он отражает статистический характер возникновения тепловых флуктуаций. Вследствие термофлуктуационной статистики разрушение оказывается принципиально случайным процессом, и его вероятность растет (а долговечность и прочность – убывают) при увеличении размеров тела. Термофлуктуационный размерный эффект обнаружен экспериментально для различных материалов [3]. С учетом термофлуктуационного эффекта, долговечность образца длиной L_2 есть

$$\tau_2 = (L_1 / L_2)^m \tau_1, \quad (4)$$

где τ_1 – долговечность при длине L_1 , а m – эффективное число разрушающих термофлуктуаций (m является свободным параметром, подлежащим определению из опыта).

Испытание бездефектного оптоволокна на механическую прочность при растяжении проведено на испытательной машине типа «2038Р – 0,05» при

нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150 ($T = 17-22^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха лабораторного помещения – $< 54\%$).».

Исследование показали что, в плоских световодах без защитной оболочки размером $S_0 = 1\,100 \times 500\text{ мкм}^2$ и диаметром сердцевины $d_c = 400\text{ мкм}$ («д») при увеличении нагрузки сигнал резко уменьшается, а в случае плоских световодов размером отражающей оболочки $S_0 = 1\,400 \times 600\text{ мкм}^2$ и диаметром сердцевины $d_c = 500\text{ мкм}$ («е»), волокно устойчиво до 1,6 кг, а при увеличении нагрузки до 3 кг сигнал уменьшается, и при 3,1 кг происходит резкое разрушение.

Проведенный с позиций кинетической теории разрушения анализ обнаруживает значительный резерв для улучшения механических свойств световодных волокон и указывает на пути его реализации: защиту от сильной влаги и поверхностных дефектов. При этом величина U_0 будет определяться энергией $\text{Si} - \text{O}_2$ связей, т. е. достигнет значения 462 ккал/моль, а $\gamma = V_d$. Тогда предельно достижимая прочность кварцевого стекла будет составлять 36,6 ГПа при испытании на изгиб (когда нагружению подвергался участок около 0,5 м), а для световода длиной 10^3 км прочность будет равняться 36 ГПа. Напряжения, которые будут способны выдержать такие совершенные волокна в течение 20 лет, составят не менее 31,6 ГПа. Однако наличие структурных дефектов, проявляющееся и для исследованных в данной работе волокон при растяжении достаточно длинных отрезков, приводит к более низкой прочности и более сильной ее зависимости от длины волокна.

Полученные результаты [4–6] свидетельствуют о применимости волоконных световодов в оптоэлектронных системах в качестве первичных преобразователей механических величин, таких как деформация, давление (усилие) и предразрушения элементов строительных конструкций

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Niizeki. Development of Fiber / Japan Annual Reviews in Electronics, Computer + Telecommunications // Optical Devices + Fibers. – 1984. – Vol. 11. – P. 168–178.
2. Прочность и долговечность бездефектных волокон с позиций кинетической теории разрушения / В.С. Куксеино, В.А. Петров, А.В. Савицкий и др. // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 304, № 6. – С. 1354–1357.
3. Петров В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов / В.А. Петров, А.Я. Башкиров, В.И. Веттегрень. – СПб.: Политехника, 1993. – 475 с.
4. Патент РФ № 2247412 БИ. 2005. № 8. Способ определения мест предразрушения конструкций / Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов.
5. Рахимов Н.Р. / Н.Р. Рахимов, С.Х. Шамирзаев // Узб. физический журнал. – 2004. – Т. 6, № 2. – С. 115–119.
6. Рахимов Н.Р. / Н.Р. Рахимов, С.Х. Шамирзаев // Узб. физический журнал. – 2004. – Т. 6, № 4. – С. 288–293.

© Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьезнов, П.А. Верецагин, 2007

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ФОТОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ АФН-ПЛЕНОК

АФН-пленок (аномального фотонапряжения) [1-4] представляют собой функциональный преобразователь, трансформирующий световой поток интенсивности Φ_0 в аномально большое фотонапряжение $V_{\text{АФН}}$. Соответственно принятой модели [5] эта трансформация складывается из трех этапов.

Во-первых, создания фототока I_{Φ_0} , обусловленного фотогенерацией и пространственным разделением неравновесных носителей на каждом микро-р-п-переходе. Во-вторых, возникновения элементарных напряжений на микро-р-п-переходах в результате накопления объемных зарядов, создаваемых фототоком. В-третьих, формирования аномально большого фотонапряжения путем суммирования элементарных фотонапряжений на р-п-переходах.

В настоящей статье нами рассмотрены способы создания фотогенератора с повышенными фотонапряжениями на основе АФН-пленок, светочувствительностью и надёжностью работы.

Поставленная задача решается тем, что способ изготовления фотогенератора включает напыление термическим испарением при температуре $250\text{--}300^\circ$ и давление $133,32 \cdot 10^{-5}$ Па на внешнюю поверхность подложки АФН-пленки из теллурида кадмия CdTe, нанесение светоотражающего слоя на внутреннюю противоположную поверхность подложки при температуре 300°C и давление $1333,32 \cdot 10^{-4}$ Па, напыление контактов на аномально фотонапряжённую плёнку. При этом одну из торцевых сторон подложки выполняют усеченной формы под углом 45° , аномально напряжённую плёнку легируют германием Ge, наносят светоотражающий слой из алюминия Al на внутреннюю поверхность подложки и одновременно напыляют контакты на одну из торцевых сторон аномально фотонапряжённой плёнки, все торцевые стороны фотогенератора, кроме усеченной, покрывают светонепроницаемым слоем.

Повышенные фотонапряжения, светочувствительность и надёжность работы фотогенератора достигается тем, что на плёнку нанесен легирующий слой германия Ge, светоотражающий слой выполнен из алюминия Al, одна торцевая сторона подложки выполнена усеченной под углом 45° , контакты выполнены сверху на одной из торцевых сторон плёнки, на все торцевые стороны фотогенератора, кроме усечённой, наносят светонепроницаемый слой, а также за счет того, что одну из торцевых сторон подложки выполняют усеченной формы под углом 45° , аномально напряжённую плёнку легируют германием Ge, и одновременно наносят светоотражающий слой из алюминия Al на внутреннюю поверхность подложки, все торцевые стороны фотогенератора, кроме усечённой, покрывают светонепроницаемым слоем.

На рис. 1. показан фотогенератор, который включает подложку 1 из стекла, на внешнюю поверхность которой нанесена АФН-пленка 2 из теллурида кадмия CdTe, а на внутреннюю светоотражающий слой 3 и контакты 4. На плёнку 2 нанесен легирующий слой 5 из германия Ge. Светоотражающий слой 3

выполнен из алюминия Al. Одна торцевая сторона 6 подложки выполнена усеченной формой под углом 45^0 . Контакты 4 выполнены сверху на одной из торцевых сторон пленки 2. На все торцевые стороны фотогенератора, кроме усеченной торцевой стороны 6, нанесен светонепроницаемый слой 7. Для измерения фотонапряжения и тока короткого замыкания к контактам 5 подключен электрометр 8.

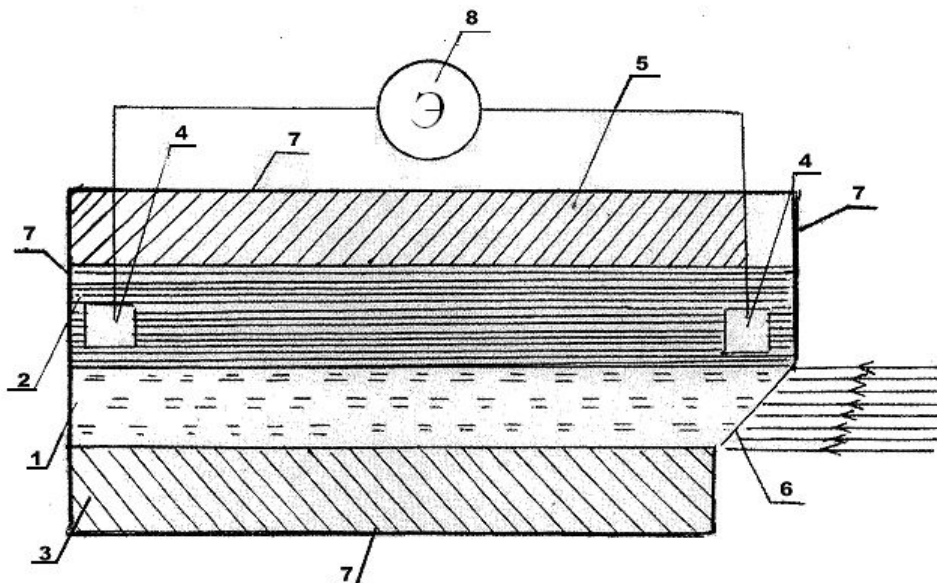


Рис. 1. Устройства малогабаритного фотогенератора

Покрывают все торцевые стороны фотогенератора, кроме усеченной торцевой стороны 6, светонепроницаемым слоем 7.

Стеклянную подложку 1 располагают под углом 45^0 между направлением молекулярного пучка и нормалью к подложке

Фотогенератор работает следующим образом. Через торцевую усеченную сторону 6 подложки 1, являющуюся светопропускающим участком, поток света освещенностью 10^4 лк поступает на светопоглощающую АФН-плёнку 2 из теллурида кадмия, на которой расположен легирующий слой 5 из германия Ge. Часть падающего потока света с интенсивностью I_0 , прошедшего через торцевую усеченную сторону 6, попадает на светотражающий слой 3 из алюминия Al и отражаясь от него, поступает на светопоглощающую плёнку 2 из теллурида кадмия, в результате происходит дополнительное поглощение света и увеличивается генерируемое фотонапряжения. При поступлении потока света на светопоглощающую плёнку 2 из теллурида кадмия в ней происходит преобразование потока света в электрическое напряжение.

Увеличения фотонапряжения происходит за счет уменьшения потерь потока света. Чувствительность фотогенератора увеличивается при отклонении падающего пучка света 0,2–0,5 мм от его оси. Фото генератор генерирует фотонапряжение, равное 300–390 В при освещенности 10^4 лк. Светочувствительность во взаимно-перпендикулярных составляет 50В/мм при отклонении пучка света на 0,2–0,5 мм от его оси.

Светочувствительность фотогенератора определяют в режиме тока короткого замыкания при освещении монохроматическим светом без

подключения регулируемого источника электрического напряжения. Тока короткого замыкания измеряют электрометром 8.

Герметичность светонепроницаемого слоя 7 повышает надежность и стабильность выходных характеристик фотогенератора.

Светоотражающий слой 3 из алюминия позволяет увеличить светочувствительность фотогенератора при малых интенсивностях света.

Фотогенераторы полученные данным способом, могут найти широкое применение в качестве источника напряжения в схемах оптоэлектроники, геодезии, лазерной технике, а также юстировки квантовых генераторов в оптических системах. Такие фотогенераторы не требуют источников питания и, прости в их изготовлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимов Н.Р. АФН-пленки и их применение /Н.Р. Рахимов, А.Н. Серьёзов. – Новосибирск: СибНИА, 2005. – 64 с.
2. Рахимов Н.Р., Мамадалиева, Л.К. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т 47. – № 8. – С. 53–56.
3. Патент РУз IAP 02610 от 25.02.2003. Способ получения фотогенераторов / Н.Р. Рахимов, А.М. Касымахунова, Ш.Ю. Усманов
4. Фридкин В.М. Фотосегнетоэлектрики / В.М. Фридкин. – М.: Наука, 1979.
5. Адирович Э.И. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника / Э.И. Адирович. – Ташкент: Фан, 1972.

© Б.Х. Каримов, Н.Р. Рахимов, Ш.Б. Каримов, 2007

УДК 623.12

Д.Ф. Скларов

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИЩЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

В настоящее время оптическая связь – это род электросвязи, передача и прием сигналов любого вида электросвязи в оптическом диапазоне электромагнитных волн. Наиболее широко используемой для связи частью оптического диапазона, простирающегося от рентгеновского до субмиллиметрового (длины волн λ от 0,1 до 100 мкм), является область от 0,26 до 10,6 мкм, включающая видимый ($\lambda = 0,4...0,75$ мкм), ближний инфракрасный (ИК) ($\lambda = 0,75...2$ мкм), средний ИК ($\lambda = 2...20$ мкм) и ультрафиолетовый (УФ) диапазоны. Средой распространения оптических сигналов могут быть свободное пространство, атмосфера, вода – для открытых оптических систем передачи (FSO – Free Space Optics) или оптические волноводы, в качестве которых чаще всего применяются оптические волокна, являющиеся составной частью оптического кабеля, – для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП, или FOTS – Fiber-Optic Transmission System).

Оптические системы передачи информации обладают потенциально высокой пропускной способностью, помехозащищенностью и, как следствие, повышенной степенью защиты информации, безопасностью и живучестью.

Важным преимуществом FSO перед радиоэлектронными средствами для операторов является отсутствие необходимости многомесячной процедуры получения разрешения на использование полос радиочастот. Вместе с тем оптические компоненты ОСПИ обладают повышенной чувствительностью к воздействию метеоявлений и ионизирующих излучений. Все это необходимо учитывать при разработке стратегии и тактики применения оптических каналов для обеспечения требуемого качества услуг связи.

Анализ факторов, определяющих условия функционирования средств связи и преимуществ атмосферных оптических каналов связи (АОКС), позволяет сформулировать основные направления их внедрения.

АОКС могут применяться в следующих случаях:

- В качестве абонентских линий и линий привязки;
- На внутриобъектовых и соединительных линиях;
- Для образования сетки линий в локальных вычислительных сетях;
- В качестве релейных вставок в ВОСП (например, при преодолении водных преград и т. п.);
- Для связи между ретрансляторами на летно-подъемных средствах (ЛПС);
- Для связи между ретрансляторами на космических аппаратах;

В свою очередь сами АОКС можно условно разделить на каналы связи с условиями прямой видимости и каналы связи без прямой видимости. Под каналом связи без прямой видимости далее будет подразумеваться канал связи УФ диапазона, в котором приемник принимает только рассеянное атмосферой, либо атмосферными аэрозолями излучение передатчика. Изначально оптические каналы связи с прямой видимостью обладают большей степенью защиты информации по сравнению с оптическими линиями связи без прямой видимости или линиями связи радиодиапазона. Причина этого заключается в узконаправленном оптическом пучке направленном непосредственно на передатчик (рис.1). Длина волны излучателя в таких системах, как правило, выбирается с учетом наименьшего затухания сигнала и окон прозрачности атмосферы, что позволяет использовать невидимое глазу излучение ближнего ИК-диапазона без использования мощных источников оптического излучения.

Учитывая закон молекулярного рассеяния Рэлея:

$$I_0(\lambda) := \frac{9 \cdot \pi^2}{2 \cdot N^2 \cdot (\lambda \cdot 10^{-7})^4} \cdot \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \cdot \frac{c}{8 \cdot \pi} \cdot I_{01} \quad (1)$$

можно заключить, что зависимость рассеянного сигнала от узкополосного источника света произвольной длины волны мощностью 1 Вт будет выглядеть, как показано на рис. 2, т.е. при использовании даже ближнего ИК-диапазона, для визуального обнаружения канала потребуется сверхвысокочувствительная аппаратура.

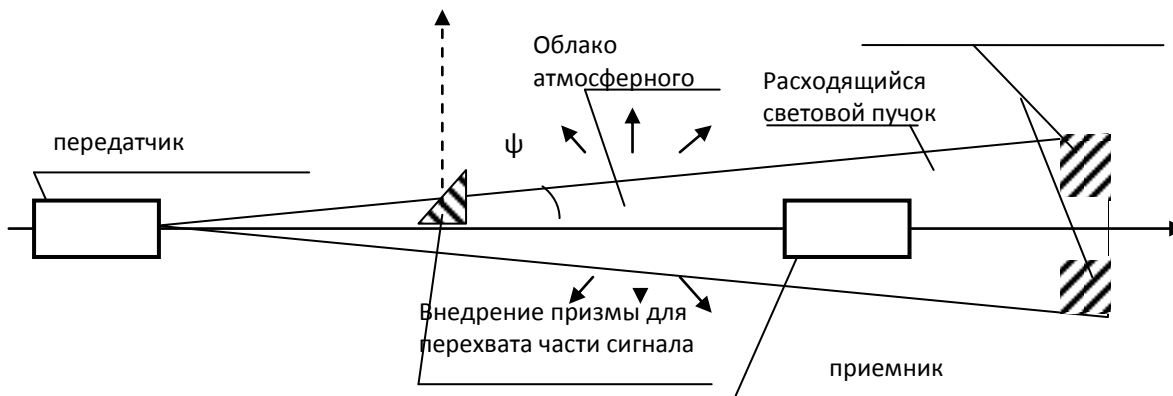


Рис. 1. Схема атмосферного оптического канала связи с прямой видимостью

*штриховкой изображены потенциальные уязвимости канала, ** Ψ – угол расходимости

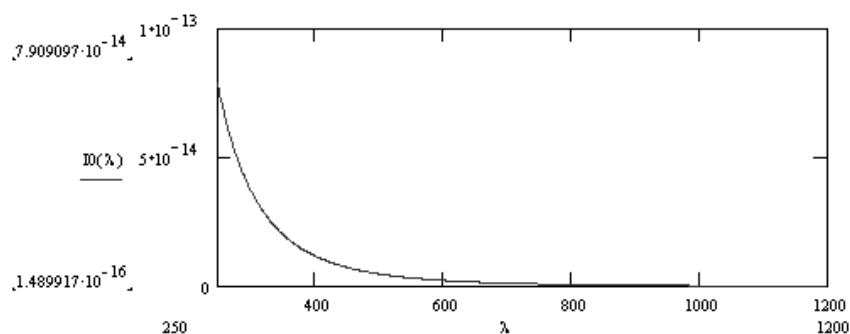


Рис. 2. Изменение интенсивности рассеянного сигнала в зависимости от длины волны

Однако при этом все равно сохраняется возможность перехвата сигнала. Как показано на рис.1, при значительной удаленности приемника и передатчика, поперечное сечение светового пучка, как правило, превосходит геометрические размеры самого передатчика, поэтому часть излучения проходит мимо передатчика и может быть перехвачена злоумышленником. При этом также сохраняется возможность перехвата сигнала рассеянного на парах воды, либо иных аэрозолях, размещенных в зоне прохождения пучка, а также возможность размещения призмы, отражающей часть пучка в направлении приемника злоумышленника.

В случае канала связи УФ диапазона, молекулярное рассеяние составляет уже довольно значительную величину, которую можно принимать с помощью высокочувствительных фотодиодов или фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). С одной стороны именно этот факт позволяет создать линию связи без прямой видимости, но с другой стороны появляется возможность перехвата рассеянного сигнала тем же образом.

Учитывая индикатрису молекулярного рассеяния и закон Рэлея, можно оценить необходимую чувствительность приемника. На рис. 3 изображен график изменения уровня принимаемого сигнала при поворотах приемника вдоль оптической оси передатчика, смещенного на расстояния 1, 2, 3, 4, 10 метров относительно оптической оси в перпендикулярной плоскости.

Численные значения сигнала рассчитаны для излучателя с длиной волны 308 нм и мощностью 1 Вт, работающего в непрерывном режиме, и приемника с углом захвата $\psi = \pi/6$. Таким образом, у злоумышленника имеется реальная возможность обнаружить канал с помощью высокочувствительных оптических приемников и перехватить рассеянный сигнал по такой же схеме, как принимает сигнал настоящий приемник.

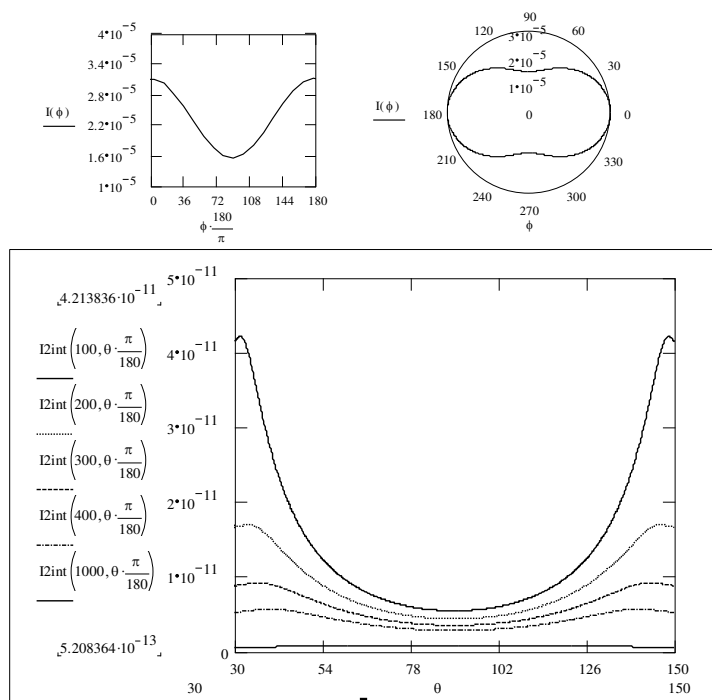


Рис. 3. Индикатриса молекулярного рассеяния и изменение уровня принимаемого рассеянного сигнала при поворотах приемника вдоль оптической оси

Таким образом, для обеспечения информационной безопасности оптического канала, требуется использование дополнительных систем шифрования сигнала. В случае двунаправленной передачи потоков информации по оптическим каналам отсутствует необходимость в идентификации отправителя потока и требуется фактически только шифрование данных, передаваемых по каналу, с помощью секретного ключа по протоколу симметричного шифрования. На сегодняшний день наиболее распространены протоколы симметричного шифрования на базе «сети Фейштеля», такие как DES, тройной DES, IDEA, ГОСТ 28147.

Принцип работы любой сети Фейштеля основан на делении входного блока на несколько равной длины подблоков, называемых ветвями. Каждая ветвь обрабатывается независимо от другой, после чего осуществляется циклический сдвиг всех ветвей влево. Такое преобразование выполняется несколько циклов или раундов. Считается, что оптимальное число раундов – от 8 до 32, так например алгоритм DES использует 16 раундов и длину ключа 128 бит, алгоритм ГОСТ 28147 использует 32 раунда и ключ длиной 256 бит. Соответственно можно говорить о существенном снижении полосы пропускания канала, при добавлении систем шифрования на базе сетей Фейштеля

в соответствии со сложностью функции шифрования и количества раундов алгоритма шифрования.

Другим способом шифрования потока являются ассиметричные алгоритмы шифрования, в частности алгоритм шифрования на эллиптических кривых ECDSA. Поток в данном случае делится на отдельные блоки, которые шифруются независимо друг от друга по определенному алгоритму:

Сообщение представляется в виде точки на эллиптической кривой $P_m(x, y)$, в качестве параметров рассматривается эллиптическая кривая $E(a, b)$ и точка G на ней. Участник В выбирает закрытый ключ n и вычисляет открытый ключ $P = n \times G$. Чтобы зашифровать сообщение P используется открытый ключ получателя P . Второй участник выбирает случайное целое число k и вычисляет зашифрованное сообщение C , являющееся точкой на эллиптической кривой.

$$C = \{k \times G, P + k \times P\}$$

Чтобы дешифровать сообщение второй участник умножает первую координату точки на свой закрытый ключ и вычитает результат из второй координаты. Никто не знает значения k , поэтому хотя P и является открытым ключом, никто не знает $k \times P$. Злоумышленнику для этого придется вычислить $k \times G$, не зная G , что очень сложно. Получатель не знает k , но ему высылается $k \times G$, умножив его на свой закрытый ключ, получатель получит значение, которое было добавлено отправителем к зашифрованному сообщению и сможет расшифровать поток.

В данном случае нет необходимости использования большого количества раундов, т.е. скорость шифрования будет определяться исключительно машинной скоростью пересчета эллиптических функций, поэтому для обеспечения широкой полосы пропускания канала можно использовать мультиплексирование сигнала с целью параллельной обработки частей потока одновременно. Такое решение позволит незначительно снизить полосу пропускания канала и обеспечить ему высокую степень защиты информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скляр Д.Ф. Моделирование атмосферных трасс для линий оптической связи без прямой видимости для обеспечения геодезических и геологических работ / Д.Ф. Скляр // Междунар. науч. конгр. "Гео-Сибирь-2006". – С. 161.
2. Характеристики атмосферного канала связи с рассеянием / Поллер Б.В., Щетинин Ю.И., Коняев С.И. и др. // VIII МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2002. – С. 735–745.
3. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / А. Исимару. – М.: Мир, 1981. – С. 598.
4. Поллер Б.В. Об эффективности передачи сообщений в атмосферных оптических каналах связи с рассеянием / Б.В. Поллер, Ю.И. Щетинин, Б.В. Федоров // IX МНТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2003. – С. 397–402.
5. Лапониная О.Р. Основы сетевой безопасности: криптографические алгоритмы и протоколы взаимодействия / О.Р. Лапониная. – М., 2005.

© Д.Ф. Скляр, 2007

ПРОСТОЙ АНАЛИЗАТОР ПРОВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Не секрет, что в настоящее время существенный объем конфиденциальной информации может быть негласно добыт с помощью технических средств разведки (далее – ТСР). Немалая часть таких ТСР ориентирована на использование в своем составе уже существующих проводных коммуникаций. К этому классу ТСР можно отнести закладные устройства (далее ЗУ), использующие проводные линии (далее ПЛ) для передачи информации и/или питающиеся от ПЛ, устройства съема информации с проводных линий (в т.ч. и приемники ПЭМИН). Такие факторы, как широкая распространенность проводных коммуникаций, многообразие их конфигураций и соединений, относительная доступность делают эти каналы утечки информации весьма опасными и распространенными. Поэтому в настоящее время вопросы поиска и закрытия технических каналов утечки информации по проводным коммуникациям остаются весьма актуальными для многих организаций.

В зависимости от степени важности (которую, к слову сказать, определяет собственник информации) конфиденциальной информации можно сформировать список наиболее вероятных угроз, если руководствоваться очевидным правилом: стоимость негласного получения информации не должна превышать стоимости самой добываемой информации. Исходя из списка возможных угроз, выдвигаются конкретные требования к системе защиты информации (СЗИ).

Обязательным элементом СЗИ являются поисковые мероприятия, включающие анализ всевозможных каналов утечки информации, а так же вспомогательное оборудование, позволяющее проводить такие мероприятия. Применительно к техническому каналу утечки информации по ПЛ к такому оборудованию относятся так называемые анализаторы проводных линий (далее АПЛ). Поисковые устройства, представленные на современном рынке средств защиты информации, различны по своим функциональным возможностям и характеристикам, но, как правило, это высокотехнологичные, и, следовательно, дорогие устройства. Так, например, АПЛ ST-031 «Пиранья» стоит в среднем 80 000 рублей, АПЛ «УЛАН-2» – порядка 75 000 рублей. Но если вспомнить еще одно важное правило, гласящее, что стоимость системы защиты информации не должна превышать стоимости самой информации, то можно прийти к выводу, что использование таких сложных и дорогих приборов не всегда оправдано. Также, часто бывают ситуации, когда организации не располагают достаточными средствами для покупки столь дорогих приборов, но и не могут позволить себе оставить без внимания вопрос защиты информации от утечки по техническим каналам. Выход из таких ситуаций найти очень сложно, так как относительно простых и недорогих анализаторов проводных линий не существует.

Ниже пойдет речь о прототипе прибора, способного решить данную проблему. Первым делом определимся с набором характеристик, которыми должен обладать недорогой АПЛ.

Применительно к проводным линиям можно выделить два основных вида угроз безопасности:

- Съем информативных ПЭМИН с проводных линий;
- Подключение к ПЛ с целью перехвата речевой информации (использование ПЛ закладными устройствами для электропитания и/или передачи информации, подключение к телефонным линиям и т.д.)

Для реализации первого типа угроз требуется очень специфическое оборудование, стоимость которого велика, поэтому вероятность того, что относительно недорогая информация будет перехвачена по каналу ПЭМИН, достаточно низкая. Это означает, что нет необходимости в функции поиска каналов утечки за счет ПЭМИН.

Но угроза второго типа остается, так как для ее реализации не требуется никакого сверхсложного оборудования. Проводную закладку без особых трудностей сможет изготовить радиоинженер среднего уровня подготовки.

Закладные устройства, использующие проводные линии для передачи информации, могут обладать следующими характеристиками:

- Диапазон частот от 10 кГц до 30 МГц;
- Уровень сигнала от единиц до сотен мВ;
- Вид модуляции – амплитудная или частотная.

Кроме того, по низковольтным линиям (линии охранной и пожарной сигнализации, телефоне линии) возможна передача электрических сигналов звуковой частоты.

В зависимости от назначения ПЛ контроль за ней должен осуществляться по принципу поиска сигналов, которых там быть не должно. Например, линии электропитания 220 В предназначены для передачи переменного тока частотой 50 Гц. Это означает, что электрических сигналов других частот, явно выраженных на фоне помех, в цепях электропитания быть не должно.

Исходя из выдвинутых требований, можно определить принцип работы прибора: это должен быть либо анализатор спектра в заданном частотном диапазоне, либо сканирующий приемник с остановкой по уровню сигнала. Требования к изготовлению прибора с минимально возможной стоимостью позволяют остановиться только на втором варианте.

Реализовать данный принцип позволяет супергетеродинный приемник с двойным преобразованием частоты и определением уровня сигнала по второй ПЧ. Структурная схема такого приемника показана на рис. 1.

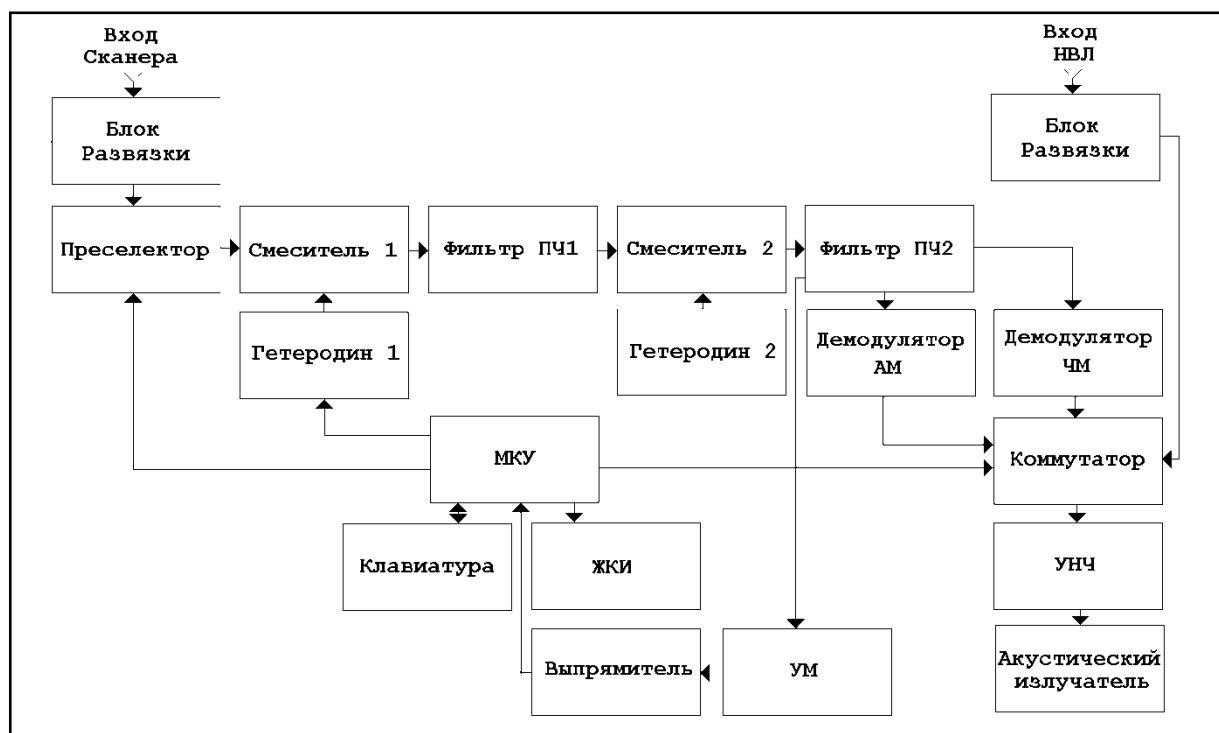


Рис. 1. Структурная схема анализатора проводных коммуникаций

Вход НВЛ – это вход низковольтных линий, по которым возможна передача сигнала звуковой частоты. Вход сканера предназначен для поиска в проводных линиях модулированных ВЧ-сигналов.

Как видно из рисунка, прибор выполнен с применением микроконтроллерного устройства (МКУ), что значительно облегчает управление им.

Блоки развязки необходимы для обеспечения гальванической развязки от источников сигнала.

Преселектор служит для разбиения диапазона сканирования на два поддиапазона: 10–10 700 кГц и 10 700–25 000 кГц.

Значения промежуточных частот стандартные: ПЧ1 – 10.7 МГц, ПЧ2 – 455 кГц.

Гетеродин 1 является перестраиваемым в диапазоне частот от 10 690 кГц до 0 для первого поддиапазона сканирования, и от 0 до 14 300 кГц для второго поддиапазона. Такое решение позволяет перекрывать широкую полосу сканируемых частот – 10–25 000 кГц, используя в качестве гетеродина генератор с полосой порядка 15 000 кГц. Выполнен Гетеродин 1 на микросхемесинтезаторе частоты типа DDS, что позволяет задавать частоту программно, с помощью микроконтроллера.

Гетеродин 2 настроен на постоянную частоту 10.245 МГц, и служит для переноса спектра сигнала на ПЧ2 – 455 кГц. По этой промежуточной частоте и определяется уровень сигнала на входе сканера, для чего сигнал с ПЧ2 сначала усиливается, а затем выпрямляется и преобразуется в цифровой код внутренним

АЦП микроконтроллера для дальнейшего анализа. Так же сигнал ПЧ2 используется для демодуляции.

Коммутатор управляется программно. Он определяет, какой из сигналов будет подаваться на акустический излучатель (АМ, ЧМ или сигнал с низковольтных линий).

Управление прибором, навигация по меню, отображение текущего состояния прибора осуществляется с помощью органов управления – клавиатуры и двухстрочного текстового ЖКИ.

Управляющая программа позволяет задавать шаг перестройки по частоте от 1 до 10 кГц (точность установки шага – 1 кГц). Для более точной настройки имеется специальная функция, позволяющая перестраиваться с шагом в 100 Гц. Также из меню можно настроить начальную частоту сканирования и направление сканирования. Имеется два алгоритма настройки на частоту сигнала. Первый заключается в настройке на середину спектра найденного сигнала, второй – в настройке на частоту, соответствующую максимуму в спектре. Кроме этого, программа позволяет осуществлять ручное и автоматическое сканирование с возможностью сохранения найденных частот в памяти для дальнейшего их анализа. В режиме ручного сканирования, при нахождении частоты, на которой сигнал превышает заданный порог, автоматически вызывается функция точной подстройки. По результатам проверки оператор может принять решение о наличии утечки информации, либо сохранить данную частоту в памяти для дальнейшего анализа. При автоматическом сканировании программа пробегает весь частотный диапазон, заноса в память все найденные сигналы. При этом, во время процесса сканирования наличие человека-оператора не обязательно.

На данный момент собран опытный образец прибора, не имеющий преселектора, и потому работающий в диапазоне от 10–10 000 кГц. При шаге 5 кГц время сканирования всего диапазона в автоматическом режиме составляет менее 1 минуты. Чувствительность – около 10 мВ.

Прибор разработан на широко распространенной и потому доступной элементной базе, в нем нет специфических, труднодоступных деталей, что так же положительно сказалось на его стоимости.

© Р.А. Кротин, 2007

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И БЛОКИРОВАНИЯ СРЕДСТВ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ, ОРГАНИЗОВАННЫХ ПО МЕТОДУ КОДОВОЙ РАЗВЕРТКИ**Введение**

Вопрос защиты информации от утечки по техническим каналам с развитием технологий передачи данных на большие расстояния требует постоянной доработки. Применение мобильных средств (сотовой телефонии) в качестве средств съема информации, использование широкополосных шумоподобных сигналов в разного рода закладных устройствах и «жучках» является развитием радиоканала утечки информации и для его защиты необходимо применение новых методов и средств защиты информации. Если рассмотреть проблему утечки информации по радиоканалу, то блокировка сигналов с АМ, ЧМ, ФМ, комбинированной модуляцией и даже шифрованием уже имеет массу технических реализации. Иначе обстоит дело с вопросом блокировки широкополосных шумоподобных сигналов (сигналов с кодовой разверткой). Основной проблемой в данном вопросе является факт обнаружения подобного сигнала, так как стандартные методы блокировки с помощью мощных генераторов шума (ГШ) не дают должного результата, а постоянное применение ГШ высокой мощности нарушает допустимые нормы излучения и является вредным для здоровья человека.

Устройствами съема информации с дальнейшей передачей по каналу с кодовой разверткой могут быть всевозможные «жучки» (создание и эксплуатация которых требует большого знания данной технологии и большинству простых пользователей недоступно), а также сотовые телефоны стандарта CDMA (Code Division Multiple Access). Этот стандарт не является новым. Долгое время он использовался в военных целях, а на рынке услуг сотовой связи появился совсем недавно. Единственным оператором сотовой связи данного стандарта в России является компания Skylink, использующая стандарт CDMA 450. На первом этапе нашей работы основной задачей была разработка методов глушения и создание эффективного и недорогого устройства блокирования сотовой связи стандарта CDMA 450. На втором этапе основной задачей является разработка методов и средств обнаружения и детектирования широкополосного шумоподобного сигнала. Данная задача включает в себя не только разработку обнаружителя сигналов CDMA 450 (работа над которым уже ведется), но и в дальнейшем разработку устройства обнаружения любого широкополосного сигнала (начиная от сигналов «жучков», заканчивая дистанционными детонаторами). Одновременно с обнаружителем ведется работа над разработкой универсального интеллектуального средства блокирования сигналов с кодовой разверткой, которое будет использоваться для глушения обнаруженных сигналов. Комбинация обнаружителя и подавителя позволит эффективно блокировать радиоканал утечки информации (канал управления) с использованием кодовой развертки. Для реализации данных

устройств требуется глубокое изучение технологии ШПС (широкополосного сигнала), анализа его слабых мест и способов воздействия на него.

Основные теоретические положения

Системы со сложными шумоподобными сигналами (ШПС) применяются уже более 50 лет. В мире существует множество систем ШПС.

Достоинства ШПС:

- Высокая помехозащищенность по отношению к узкополосным помехам большой мощности;
- Возможность разделения абонентов по кодовому признаку, скрытность передачи;
- Устойчивость к многолучевому распространению;
- Высокая разрешающая способность при радиолокационных и навигационных измерениях.

Важным параметром ШПС-системы является выигрыш при обработке (processing gain), который показывает степень улучшения отношения сигнал/шум при преобразовании полученного приемником шумоподобного сигнала в требуемый информационный сигнал.

Для формирования фазоманипулированных сигналов часто прибегают к использованию рекуррентных кодов, одной из разновидностей которых являются *последовательности максимальной длины*, получившие название *M-последовательностей*. Общий принцип рекуррентности заключается в том, что при вычислении любого элемента последовательности используется определенное количество ее же ранее сформированных элементов.

Стремление к **максимальной длине** кодовых последовательностей объясняется улучшением их свойств, что *приводит к увеличению помехозащищенности* систем связи. Увеличение же числа различных последовательностей *позволяет увеличивать количество абонентов*.

Реализация

Устройство блокирования, разработанное в ходе нашей работы, выгодно отличается от стандартных схем глушения сигналов сотовой связи. В большинстве блокираторов используются мощные генераторы шума, сигнал которых превышает мощность естественного шума и информационного сигнала. Такой подход малоэффективен для стандарта CDMA, так как в системах с кодовой разверткой мощность сигнала изначально меньше мощности шума, что не влияет на качество связи. Помехой для подобного сигнала может быть только такой же сигнал. В CDMA есть защита и на этот случай – кодовое разделение сигналов, в результате которого сигнал одного абонента не может воздействовать на сигнал другого, что достигается благодаря применению кодов Уолша. Каждый код Уолша ортогонален друг другу и одному абоненту ставится в соответствие один из кодов, так что при сложении с другим сигналом (кодом Уолша) их сумма равна нулю. Поэтому для блокирования связи необходимо воздействовать непосредственно на сигнал абонента, попавшего в

радиус действия блокиратора. Данным воздействием может быть прицельная помеха, добавляемая к сигналу, либо модификация самого сигнала, таким образом, чтоб он воспринимался приемной аппаратурой базовой или мобильной станции, но информационная составляющая в нем была бы нарушена.

На первом этапе нашей работы было создано устройство блокирования связи, использующее прицельную помеху (рис. 2). Данная помеха создается генератором на регистрах сдвига, генерирующим псевдослучайную последовательность, которая является аддитивной помехой для сигнала с кодовой разверткой. Данная помеха является импульсной и ставится в через определенные частотные временные интервалы для достижения максимальной эффектности и снижения интегральной мощности излучения.

Данный подход позволяет создать недорогое устройство, обладающее большей дальностью действия, чем равные ему по мощности генераторы шума и низким интегральным уровнем излучения.

На втором этапе будет создано устройство, позволяющее детектировать сигнал стандарта CDMA и активировать блокирующее устройство. В данном устройстве может применяться один из следующих алгоритмов поиска сигнала:

- Свертка сигнала многократным домножением на ВЧ составляющую (количество зависит от частоты сигнала). Данный подход ограничен аппаратными возможностями на сегодняшний день, так как при данной свертке сильно частоты сигналов доходят до нескольких десятков гигагерц;

- Второй подход заключается в выявлении в потоке бит различных сигналов заданной последовательности. Данный вероятностный метод проще и позволяет уверенно обнаруживать сигналы длительностью от 20 мкс. Чем больше время ожидания сигнала (время накопления бит сигнала), тем с большей вероятностью определяется наличие сигнала;

- На третьем этапе создается устройство блокирования, работающее совместно с обнаружителем и позволяющее модифицировать фазовую составляющую принятого сигнала, в результате чего достигается высокая дальность и эффективность глушения связи. Данный подход позволяет добиться большой дальности действия при небольшой мощности устройства, получить селективность блокируемых сигналов – блокироваться будут лишь абоненты, находящиеся в радиусе действия обнаружителя, а также добиться хорошего соотношения цена/качество для прибора (рис. 3).

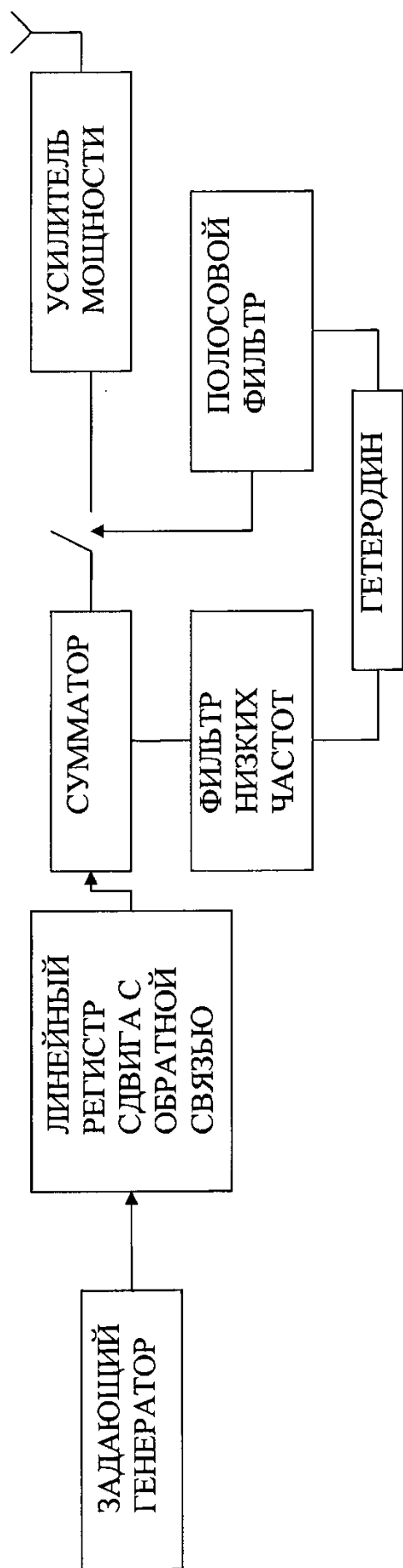


Рис. 2. Блок-схема устройства подавления канала связи

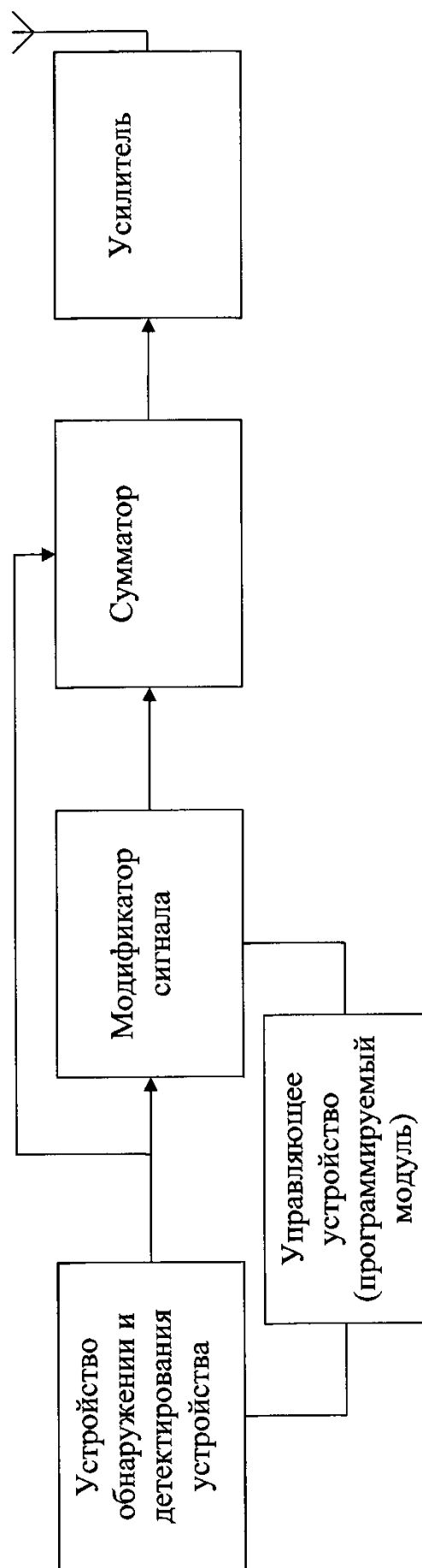


Рис. 3. Блок-схема интеллектуального устройства обнаружения и подавления канала связи

Принципы построения подобных систем используются и для реализации поисковой техники в современных системах защиты информации, например:

- Автоматизированный контроль зоны покрытия сотовых систем.
- Обнаружение несанкционированных источников (абонентских станций).
- Обеспечение конфиденциальности переговоров в бизнесе, политике, на производстве, других сферах деятельности и защиты прав человека.
- Обеспечение требуемой комфортности при проведении общественных мероприятий (богослужения в соборах, представления в театрах, кинотеатрах и т.д.), где сотовая связь неуместна.
- Разработка антитеррористической техники (устранение каналов связи и передачи информации на исполняемые устройства дистанционного управления).

Необходимо помнить, что в Уголовном кодексе предусмотрена ответственность за незаконное прослушивание телефонных переговоров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вернигоров Н.С. Особенности устройств съема информации и методы их блокировки / учеб. пособие / Н.С. Вернигоров. – Томск: В-Спектр, 2006. – 120 с.
2. New Wave Instruments – Linear Feedback Shift Registers. – 2005. – Электрон. данные. – Режим ресурса:
http://www.newwaveinstruments.com/resources/articles/m_sequence_linear_feedback_shift_register_lfsr.htm

© Н.Ю. Игнатьева, В.С. Слободкин, 2007

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СОПРОВОЖДАЮЩИХ ИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ НЕДР

В комплексе работ по геологическому изучению недр одной из основополагающих составляющих является информация о достоверности результатов, точности различных физических параметрах, получаемых посредством многочисленных геофизических методов и их геодезического обеспечения. Для достижения достоверности и надежности получаемой информации необходимо строгое соблюдение единых требований к метрологическому обеспечению средств и методов измерений и определений. Отсюда следует, что весь процесс реализации методов и использования технических средств должен сопровождаться процедурами метрологической экспертизы и тестирования.

Применяемая геофизическая и геодезическая аппаратура характеризуется целым рядом параметров, которые необходимо обеспечить в процессе эксплуатации. Однако, дать оценку точности измерения или определения основных параметров, сравнить аппаратуру с каким-то образцовым средством по основным характеристикам не представляется возможным ввиду отсутствия единой системы контроля, единой методики поверки и оценки достоверности полученных результатов. Метрологическое обеспечение геофизической аппаратуры часто опирается на устаревшие и наиболее доступные метрологические средства. Зачастую аппаратура на протяжении многих лет эксплуатируется с устаревшими требованиями к ее метрологическим характеристикам.

В свое время, сейсморазведочная и электроразведочная аппаратура попала в область индикаторных средств, результаты которых относятся к качественным показателям. Поэтому метрологический контроль и поверка такой аппаратуры директивно не регламентируются.

Вероятно, этим можно объяснить тот факт, что в руководстве «по содержанию, оформлению и порядку представления материалов сейсморазведки 3D на Государственную экспертизу запасов нефти и горючих газов», одной из целей которого «является определение требований к содержанию и качеству материалов пространственной сейсморазведки 3D для подсчетных параметров для подсчета запасов и оценки прогнозных ресурсов нефти и газа» практически отсутствуют какие-либо требования к точности измеряемых сейсморазведочной аппаратуры параметров, и даже контролю оценки точности выполненных работ, кроме конкретных требований, кстати совершенно не обоснованных, к определению координат и высот: 1 м; 2 м и 3 м соответственно для категорий запасов C_1 , C_2 и C_3 [4].

Сейсмо- и электроразведочная аппаратура представляет собой совокупность различных измерительных и индикаторных технических и программных средств, объединенных по назначению, но не имеющих конечной

измеряемой величины, которая может быть подвергнута метрологическому контролю. Поэтому поверке и калибровке должны подвергаться отдельные измерительные составляющие (приборы) этих систем. В этой связи становится актуальной разработка типовых поверочных схем, включающих необходимые рабочие эталоны и единиц физических величин и методики передачи их значений (силы, напряжения и сопротивления тока, частоты колебаний, временных интервалов, параметров зондирующих импульсов динамики и т.п.) на средства измерений.

В тоже время нельзя игнорировать новые концепции метрологического обеспечения, например сейсморазведочных комплексов, как единой информационно-измерительной системы, включающей непосредственно сейсмоизмерительный тракт, средства преобразования сейсмических колебаний, их обработки, а также программно-алгоритмического обеспечения [1, 3, 6].

В импульсной электроразведки также предлагается принципиально новый подход к метрологическому обеспечению или скорее сертификации всего аппаратно-методического комплекса. В основу предлагаемой методики положена методика физического моделирования, когда в лабораторных условиях реализуется процедура электромагнитного зондирования исследуемой среды, в качестве которой выступает некоторая искусственная модель. При наличии данных о реальной модели среды такой подход позволит обоснованно решать вопросы эффективности методов интерпретации, извлечения информации из результатов электромагнитных зондирований и оценить качества полевых измерений относительно конечного геологического результата. Таким образом, исключается формальный подход к понятию «метрологическое обеспечение конкретных средств измерений», т.е. ставится вопрос о расширенной трактовке понятия метрологического обеспечения через влияние полученных погрешностей измерений на точность определения параметров геолого-геофизической продукции [2].

Однако предлагаемый подход к метрологическому обеспечению всей информационно-измерительной системы, по целому ряду позиций вступает в противоречие с ФЗ «Об обеспечении единства измерений», который подразумевает под средством измерения техническое средство.

Появление на Российском рынке большого количества спутниковой аппаратуры различного назначения и точности вызывает необходимость решения целого ряда вопросов в области сертификации, стандартизации и метрологического обеспечения с учетом специфики геофизических исследований.

Результаты спутниковых измерений в значительной степени зависят от физико-географических условий местности, в которых они выполняются, а также от степени затенения трасс распространения сигналов (открытая, полузакрытая, закрытая) и электромагнитных свойств среды. Поэтому для метрологической поверки (калибровки) и сертификации спутниковой аппаратуры целесообразно использовать сеть эталонных геодезических пунктов, размещенных в условиях, близких к реальным, условиям выполнения работ, т.е. с наличием многолучевости и затухания спутниковых радиосигналов.

Такая сеть геодезических пунктов (полигон) отраслевого значения создана в ФГУП «СНИИГГиМС» и аттестована Сибирским НИИ метрологии [5]. На рис. 1 представлены эталонные пункты отраслевого полигона.

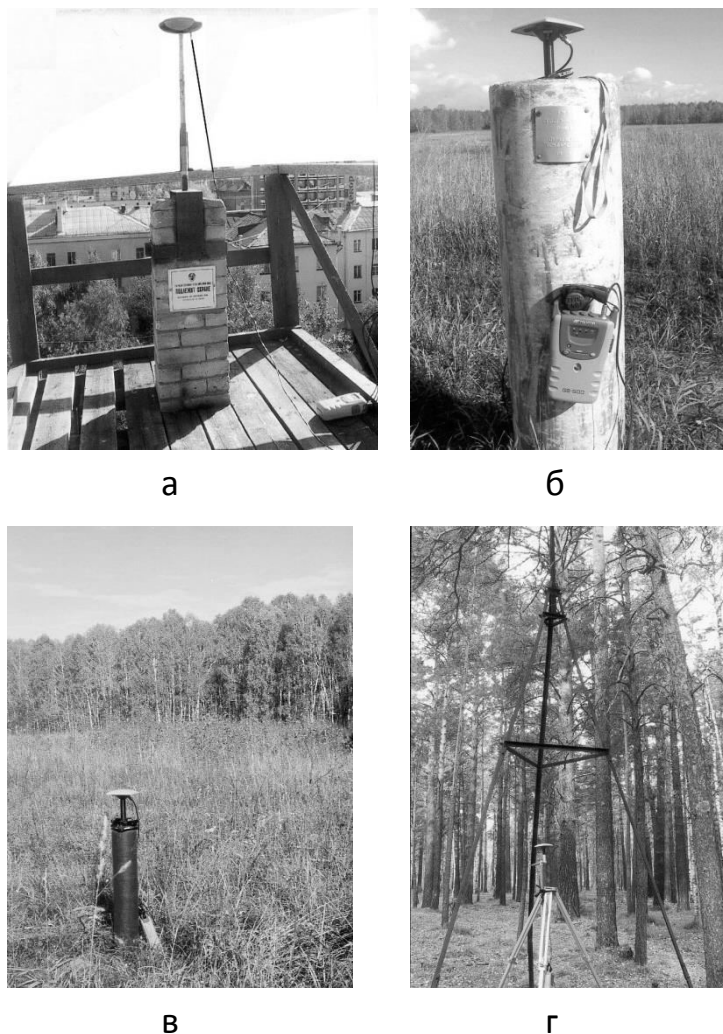


Рис. 1. Эталонные пункты геодезического полигона

а) опорный пункт на здании СНИИГГиМС; б) в открытой местности; в) в полузакрытой местности; г) в закрытой (залесенной) местности

Нельзя не остановиться на ставшем сегодня злободневным вопросе о Федеральном Законе «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ, устанавливающим правила, регулирующие порядок деятельности и взаимоотношений между изготовителем и потребителем в сфере технических средств, технологий, работ, услуг, т.е. правовое регулирование отношений в области обязательных требований к производству продукции (в широком понимании этого термина) на основе сертификации, в том числе добровольной, и требованиям к её потреблению, а также правовое регулирование в области оценки соответствия продукции требованиям нормативных документов. В основу технического регулирования положены требования, обязательные к исполнению и максимально приближенные к требованиям Всемирной торговой организации (ВТО).

С введением этого закона отменяются действия законов РФ «О стандартизации» и «О сертификации продукции и услуг». На смену им должны прийти новые нормативные документы: технические регламенты, межгосударственные стандарты, национальные стандарты, стандарты организаций. При этом на первое место становятся технические регламенты (ТР) государственного значения, устанавливающие требования, обязательные для исполнения на всей территории РФ, подразделяющиеся на общие технические регламенты (ОТР) и специальные технические регламенты (СТР).

Общие технические регламенты должны обеспечивать защиту жизни и здоровья граждан, охрану окружающей среды, достоверность информации.

Конкретные специфические требования, присущие отдельным отраслям, должны быть установлены специальными техническими регламентами. По оценке различных экспертов за оставшиеся три года необходимо разработать от 500 до нескольких тысяч новых нормативных документов.

Фактически все виды геофизических методов исследований в области недропользования подпадают под действие специальных технических регламентов, обеспечивающих безопасность использования технических средств и технологий геологоразведочных работ, т.е. безопасность проведения работ с различной техникой и аппаратурой, как в целях защиты жизни и здоровья граждан, так и охраны окружающей среды, что особенно важно для сейсморазведочных и электроразведочных работ.

Нормативные требования к проведению работ, технологических процессов и т.п. должны быть закреплены национальными стандартами и стандартами организаций (СТО). При этом стандарты организаций не следует отождествлять со стандартами предприятий (СТП), которые сохраняются и регламентируют деятельность конкретных предприятий в области их внутренних работ и взаимоотношений.

Целью национальных стандартов в области геологического изучения недр, должна быть установка следующих основных требований: стадийность геологоразведочных работ; экологическое состояние объектов (территории) выполнения работ; определение нормативной базы для метрологического обеспечения и сертификации продукции; конечные геологические результаты работ и отчетная документация, информационная совместимость при выполнении различного вида работ (виды информации, термины, определения, условные знаки, обозначения) и т.п.

Конкретная часть выполнения работ должна приходиться на стандарты организаций. Для геофизических работ это: нормативные требования к технологии полевых работ, включая методики выполнения измерений, обработки и интерпретации полученных результатов; организационные мероприятия, связанные, в том числе с получением разрешительных документов в соответствии Федеральным и местным законодательством; рекомендации по использованию прогрессивных технических средств и технологий; единство подхода к отчетной документации, терминам и определениям; метрологическое обеспечение и единство методов контроля и оценки точности выполняемых работ.

К сожалению следует констатировать, что на сегодня ФЗ «О техническом регулировании» практически не реализуется. Это можно объяснить тем, что многие отрасли и юридические лица считают этот закон ошибочным в таком изложении и даже представляющим угрозу для национальной безопасности страны.

Достаточно привести высказывание по этому поводу Председателя Правительства РФ М.Е. Фрадкова на заседании Правительства РФ 13.04.06 г.

«Проведена супер операция в интересах наших глобальных конкурентов и нам предстоит разобраться, кто вверг нас в эту пучину с такой степенью некомпетентности».

Предложено концептуально пересмотреть ФЗ «О техническом регулировании», а пока же вся система сертификации и стандартизации оказалась в подвешенном состоянии, что не может не сказаться на качестве выполняемых работ в области геологического изучения недр. В сложившейся ситуации, необходимо вернуться к вопросу создания региональных научно-методических центров в области метрологического обеспечения, стандартизации и сертификации геофизических и геодезических технологий и технических средств измерения. Один из таких центров может быть организован в Сибирском регионе на базе СНИИГГиМС.

В состав региональных центров должны входить: полигоны, рабочие эталоны и средства калибровки, сертифицированные источники возбуждения для различных геофизических методов, а функция этих центров должна заключаться в разработках методик геофизических и геодезических измерений для условия максимально приближенных к реальным, методик метрологической аттестации, нормативно-технических требований и рекомендаций, обеспечивающих единый подход к измерениям и их метрологическому обеспечению, внедрению в производство передовых технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еще раз о поверочной схеме для сейсμοприемников / Зайченко, В.Ю. // Геофиз. вест. – 2002. – № 2. – С. 15, 16.
2. Проблемы метрологического обеспечения структурной импульсной электроразведки / Захаркин, А.К., Тарло, Н.Н. // Геофизика. – 1999. – № 6. – С. 34–39.
3. Сейсмический канал как единая измерительная система / Ермаков, Б.Д. // Геофизика. – 1998. – № 4. – С. 37–41.
4. Временное руководство по содержанию, оформлению и порядку представления материалов сейсморазведки 3D на Государственную экспертизу запасов нефти и горючих газов / Левянт, В.Б. // Геофиз. вестн. – 2003, – № 3–4. – С. 3–14.
5. Эталонный геодезический полигон как средство сертификации и метрологической проверки спутниковых приборов для обеспечения геофизических работ / Прихода, А.Г., Лапко, А.П. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – № 1. (11). – С. 28–31.
6. Метрологическое обеспечение в полевой геофизике / Федотов, С.А., Симаков, В.С., Стакло, А.В. // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 4. – С. 41–43.

© А.Г. Прихода, Т.И. Новоселова, А.К. Захаркин, 2007

ЛОКАЛЬНАЯ ПОВЕРОЧНАЯ СХЕМА ДЛЯ ЭТАЛОННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА СГГА И РАБОЧИХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается новый подход к схеме передачи единиц частоты, времени и длины от первичных эталонов Международной службы вращения Земли (МСВЗ) на Геодезический эталонный полигон СГГА (далее Полигон) и рабочим средствам измерений. Полигон является единичным средством измерения и предназначен для метрологических испытаний геодезической аппаратуры, как традиционных приборов, так и современных спутниковых приемников. Он хранит, в отличие геодезических полигонов Роскартографии [2], локальное внешнее гравитационное поле Земли (ГПЗ) в виде закрепленных на поверхности Земли пунктов и каталога числовых значений параметров некоторой математической модели ГПЗ [3]

$$W = W(x, y, z, a_1, \dots, a_q). \quad (1)$$

Модель ГПЗ включает геометрическую (x, y, z) и гравитационную $(a_1, \dots, a_q)$ части. Геометрическая часть ГПЗ содержит координатную основу – практическую реализацию системы отсчета в виде Специальной спутниковой геодезической сети (ССГС) пунктов P_i ($i = 1, \dots, k$), закрепленных на Земле, и каталога координат $\{x_i, y_i, z_i\}$. Гравитационная часть ГПЗ содержит модель (1) и параметры $\{a_1, \dots, a_q\}$, аппроксимирующие локальное ГПЗ. В связи с этим метрологические параметры Полигона можно разделить на геометрические и гравитационные. Геометрические параметры включают координаты точек и функции от них: расстояния, углы и т. п. Гравитационными параметрами Полигона являются, так называемые, трансформанты ГПЗ: нормальные высоты, астрономические долготы, широты, азимуты, ускорения силы тяжести и другие величины – функции параметров ГПЗ.

Размер единицы длины хранится на Полигоне в виде пространственных координат $\{x_i, y_i, z_i\}$ пунктов P_i ССГС, являющейся носителем геометрической части ГПЗ. Все другие геометрические метрологические параметры, такие как: длины линий, разности пространственных и плоских координат, дирекционные углы и другие величины, являющиеся функциями от множества координат $\{x_i, y_i, z_i\}$ ССГС, можно считать производными метрологическими параметрами.

Размер единицы длины, т.е., геометрическая часть метрологических параметров, передается на Полигон в виде трех пространственных координат $\{x_i, y_i, z_i\}$ пунктов ССГС от национальных первичных эталонов частоты, времени и длины (ПЭЧВД) Международной службы вращения Земли (рис. 1). Средством передачи эталонов служат GPS/ГЛОНАСС-измерения на опорных пунктах (ОП) Международной GNSS-службы (GNSS – Global Navigation Satellite System) для целей геодинамики (далее МГС). Метод передачи эталона – косвенный. Он основан на GPS/ГЛОНАСС-измерениях и математической обработке их в Международных центрах анализа орбитальных данных МГС. В результате деятельности МГС (измерений, обработки и распространения данных) созданы и непрерывно поддерживаются две координатные основы:

земная (МЗКО – международная земная координатная основа) и орбитальная (ОКВО – орбитальная координатно-временная основа). Опорные пункты МГС и каталог их координат, космические аппараты GPS/ГЛОНАСС, бортовые генераторы частоты и уточненные МГС спутниковые эфемериды являются носителями МЗКО и ОКВО и служат рабочими эталонами первого разряда для хранения и передачи единиц длины рабочим эталонам второго разряда, в качестве которого может выступать, например, ССГС Полигона.

Посредством синхронных GPS/ГЛОНАСС-измерений спутниковой приемной аппаратурой, установленной на пунктах МГС и Полигона, эталон длины передается от МЗКО через ОКВО на пункты Полигона. Метод передачи эталона косвенный, кратко описан в работе [4]. Таким образом, спутниковая приемная аппаратура в такой поверочной схеме (рис. 1) является вспомогательным измерительным средством передачи эталона длины на Полигон и может быть исключена из поверочной схемы [1], как рабочий эталоном 2 разряда.

Вторая часть поверочной схемы (рис. 2) – проверка внешнего гравитационного поля Земли (ГПЗ ПГЭ) – производится косвенными методами от исходного эталона ПЭЧВД посредством рабочих эталонов 1 разряда (МНКО – международной небесной координатной основы, ОАП – основных астрономических пунктов, ГГП – главных гравиметрических пунктов) и рабочих эталонов 2 разряда (ГВО – государственной высотной основы, АГС – астрономических пунктов астрономо-геодезической сети, ВГГС – высокоточной государственной гравиметрической сети, ССГС ПГЭ – специальной спутниковой геодезической сети Полигона). В качестве косвенных методов передачи эталонов используются, как традиционные геодезические способы – геометрическое нивелирование I и II классов, астрономические и гравиметрические определения 1 класса, так и GPS/ГЛОНАСС-измерения (с целью определения положения нивелирных, астрономических и гравиметрических пунктов), кратко описанные в работе [5].

Третья часть поверочной схемы – проверка рабочих средств измерений (рисунок 3) производится методом прямых измерений на Полигоне в полевых условиях от рабочих эталонов 2 разряда (ССГС ПГЭ, ГПЗ ПГЭ и БПЭ ПГЭ – эталонного пространственного базиса Полигона) и рабочих эталонов 3 разряда (МПА – азимутального миниполигона, МПУ – углового миниполигона, МПК – кинематического миниполигона, МПЭ – экстремального миниполигона, МППП – миниполигона для испытаний гироскопических платформ на подвижных транспортных средствах, МПГР – гравиметрического миниполигона, ВП – высотного полигона, МПМА – миниполигона магнитных азимутов). В качестве рабочих средств измерений могут быть использованы: навигационная и геодезическая спутниковая аппаратура, астрономические и гироскопические теодолиты, тахеометры и нивелиры, светодальномеры и радиодальномеры, лазерные сканеры, гравиметры, буссоли и магнитные компасы.

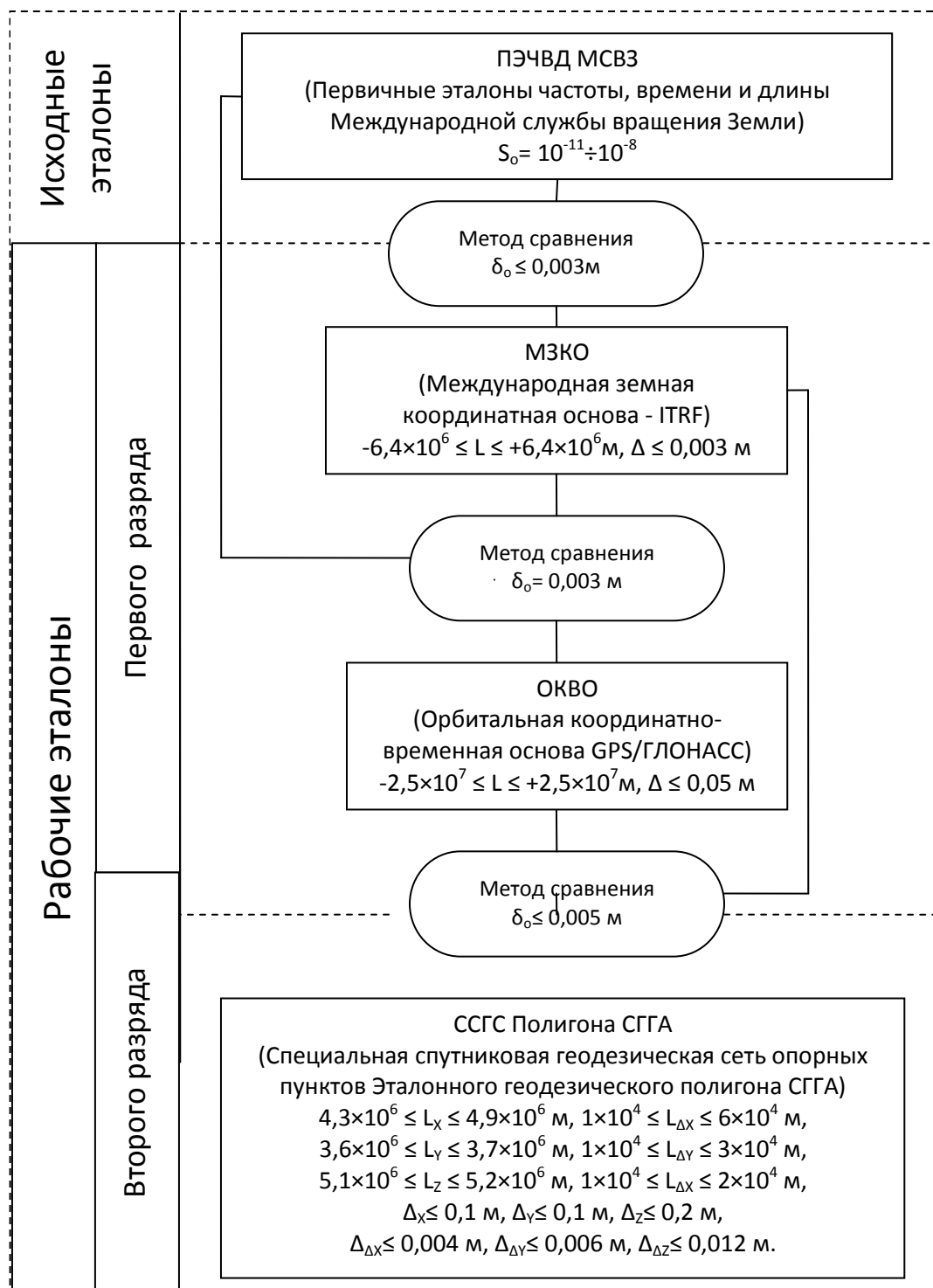


Рис. 1. Локальная поверочная схема специальной спутниковой геодезической сети (ССГС) эталонного геодезического полигона СГГА.

Обозначения, принятые на рис. 1: L , L_x , L_y , L_z , $L_{\Delta x}$, $L_{\Delta y}$, $L_{\Delta z}$ – диапазоны измерения линейных параметров с размерностью длины, δ_0 – средняя квадратическая погрешность (СКП) метода передачи размера единицы, S_0 – СКП результата измерения, Δ – СКП геоцентрического положения носителей координат (по произвольному направлению), Δ_x , Δ_y , Δ_z – СКП геоцентрического положения носителей координат по направлениям осей X , Y , Z , $\Delta_{\Delta x}$, $\Delta_{\Delta y}$, $\Delta_{\Delta z}$ – СКП разностей координат ΔX , ΔY , ΔZ . Все числовые значения СКП даны для доверительной вероятности 0,95.

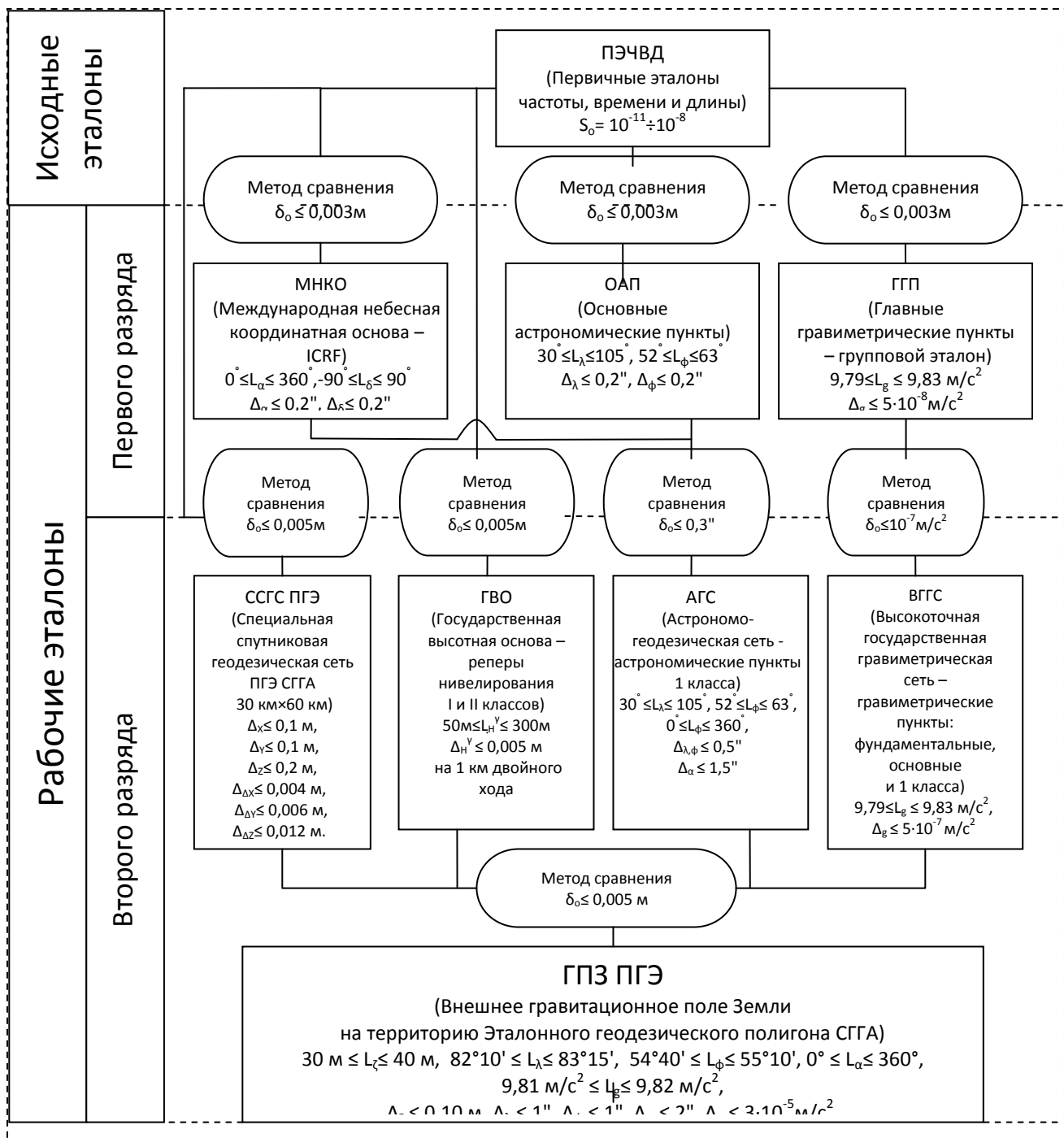


Рис. 2. Локальная поверочная схема внешнего гравитационного поля Земли на территорию эталонного геодезического полигона (ГПЗ ПГЭ).

Обозначения, принятые на рис. 2: S_0 – средняя квадратическая погрешность (СКП) результата измерения, δ_0 – СКП метода передачи размера единицы; $L_\zeta, L_\lambda, L_\phi, L_\alpha, L_g, L_h^y, L_\alpha,$

L_δ – диапазоны измерения параметров, соответственно: высоты квазигеоида ζ , астрономической долготы λ , широты ϕ , азимута α , ускорения силы тяжести g , нормальной высоты H^y , прямого восхождения α и склонения δ ; $\Delta_\zeta, \Delta_\lambda, \Delta_\phi, \Delta_\alpha, \Delta_g, \Delta_h^y, \Delta_\alpha, \Delta_\delta$ – предельные

СКП параметров $\zeta, \lambda, \phi, \alpha, g, H^y, \alpha, \delta$; $\Delta_X, \Delta_Y, \Delta_Z$ – предельные СКП геоцентрического положения пунктов ССГС ПГЭ по направлениям осей X, Y, Z ; $\Delta_{\Delta X}, \Delta_{\Delta Y}, \Delta_{\Delta Z}$ – предельные

СКП разностей координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ пунктов ССГС ПГЭ, ICRF – International Celestial Reference Frame. Числовые значения предельных СКП даны для доверительной вероятности 0,95.

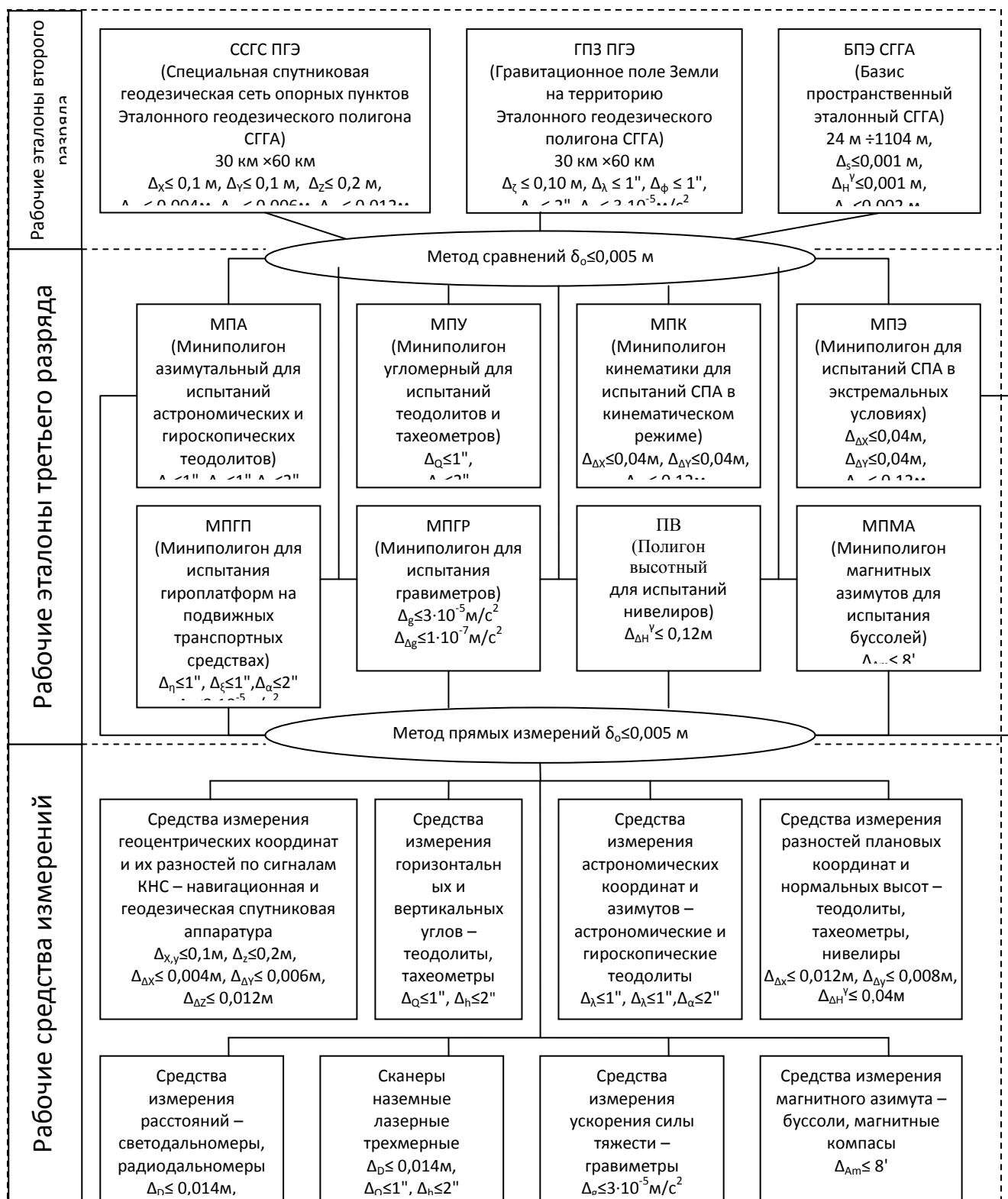


Рис. 3. Локальная поверочная схема рабочих средств измерений на эталонном геодезическом полигоне СГГА (ПГЭ СГГА).

Обозначения, принятые на рис.: δ_0 – средняя квадратическая погрешность (СКП) метода передачи размера единицы; Δ_{ζ} , Δ_{λ} , Δ_{ϕ} , Δ_{α} , Δ_g , $\Delta_{\Delta g}$, Δ_{H^y} , $\Delta_{\Delta H^y}$ – предельные СКП параметров модели ГПЗ: высот квазигеоида ζ , отклонений отвеса η , ξ , астрономических долгот λ , широт ϕ , азимутов α , ускорений силы тяжести и их разностей g , Δg , нормальных высот и их разностей H^y , ΔH^y ; Δ_x , Δ_y , Δ_z , $\Delta_{\Delta x}$, $\Delta_{\Delta y}$, $\Delta_{\Delta z}$ – предельные СКП геоцентрических координат и их разностей по направлениям осей X, Y, Z; Δ_Q , Δ_h , Δ_D – предельные СКП горизонтальных и вертикальных углов Q, h, расстояний D; Δ_w – предельная СКП нестворностей базиса W; Δ_{Am} – предельная СКП магнитного азимута. Числовые значения предельных СКП даны для доверительной вероятности 0,95.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. МИ 2292-94. Рекомендация. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений разностей координат по сигналам космических навигационных систем.
2. РТМ 68-8.20–93. Полигоны геодезические. Общие технические требования / Роскартография. – М.: ЦНИИГАиК, 1994.
3. Математическая модель внешнего гравитационного поля Земли на локальном участке земной поверхности по спутниковым и традиционным геодезическим данным / Сурнин, Ю.В. // ГЕО-СИБИРЬ-2006. Т. 1. Часть 2. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Сб. материалов науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апр. 2006 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2006. – С. 79–90.
4. Оценивание геометрических параметров эталонного геодезического полигона СГГА по результатам спутниковых измерений / Сурнин, Ю. В. // В настоящем сборнике.
5. Оценивание гравитационных параметров эталонного полигона СГГА по результатам спутниковых и традиционных геодезических измерений / Сурнин, Ю.В. // В настоящем сборнике.

© Ю.В. Сурнин, 2007

УДК 681.783

Б.С. Могильницкий, В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, А.Я. Юданин
СНИИМ, Новосибирск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ориентировку Земли в пространстве (характеризуемую параметрами вращения Земли – уходом времени DUT1 и координатами полюса x_p и y_p) можно определить с помощью угловых и/или дальномерных измерений между фиксированными пунктами на поверхности Земли и внеземными объектами, естественными или искусственными.

Применяемые в настоящее время методы определения ПВЗ можно классифицировать по следующим признакам:

1. По наблюдаемым объектам: спутниковые и астрометрические;
2. По характеру измеряемых величин: линейные (псевдодальности) и угловые;
3. По частотному диапазону используемых электромагнитных волн: оптические (астрооптический метод и метод лазерной локации ИСЗ или Луны) и радиочастотные (приём сигналов КНС и метод РСДБ).

Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки.

В последнее время в связи с развитием координатно-временных технологий обеспечения системы ГЛОНАСС появилась возможность оценивания ПВЗ по данным беззапросных измерений псевдодальностей.

Псевдодальностью D называется расстояние между точкой пространства, в которой находится БИС (беззапросное измерительное средство) в момент приёма сигнала, и местоположением НС в момент излучения сигнала, точнее, между фазовыми центрами антенн в эти моменты.

В идеальном случае справедливо равенство:

$$D = c \cdot \Delta = |\bar{R}(t) - \bar{r}(t - \Delta)| \quad (1)$$

где c – скорость света,

Δ – задержка – время прохождения сигнала,

$\bar{R}(t)$ – положение БИС в момент приёма сигнала,

$\bar{r}(t - \Delta)$ – положение НС в момент излучения сигнала.

Однако в реальности связь между псевдодальностью и задержкой сигнала более сложная:

$$D = |\bar{R}(t) - \bar{r}(t - \Delta)| + \sum_{i=1}^7 p_i(t) + v(t) \quad (2)$$

где поправки

$p_{1,2}$ – уход часов НС и БИС,

$p_{3,4}$ – задержки сигнала в тропосфере и ионосфере,

$p_{5,6}$ – смещения фазовых центров антенн НС и БИС,

p_7 – релятивистские эффекты,

$v(t)$ – случайная (немоделируемая) ошибка.

Для поправок p_i известны аналитические выражения, содержащие некоторые не точно определённые параметры.

Для вычисления псевдодальностей координаты НС и БИС надо привести к одной системе. Каждая БИС имеет постоянные координаты (x_e, y_e, z_e) в ЕГСК, а уравнения движения НС записываются и решаются в квазиинерциальной системе ИСК2000. Переход от ЕГСК к ИСК2000 осуществляется по формуле:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \tilde{P} \cdot \tilde{N} \cdot \tilde{Z} \cdot \tilde{\Pi} \cdot \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} \quad (3)$$

Здесь матрицы прецессии $\hat{P}$ и нутации $\hat{N}$ известны с большой точностью; матрица звёздного времени $\hat{Z}$ равна

$$\tilde{Z} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_0 + \alpha) & -\sin(\alpha_0 + \alpha) & 0 \\ \sin(\alpha_0 + \alpha) & \cos(\alpha_0 + \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

где α_0 – известная функция времени, а $\alpha = \omega_0 \cdot a \cdot \delta_{UTC}$.

Матрица движения полюса $\hat{\Pi}$ равна:

$$\tilde{\Pi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, в $\bar{R}(t)$ входят 3 неизвестных параметра вращения Земли – $\delta_{UTC}(t)$, $x_p(t)$ и $y_p(t)$. Траектория НС находится путём численного решения системы 6 дифференциальных уравнений 1 порядка:

$$\dot{p} = \frac{dp}{dt} = 2p \cdot \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \frac{1}{1 + h \cos l + g \sin l} \cdot T;$$

$$\begin{aligned}
\dot{g} &= \frac{dg}{dt} = \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{H}\right) \cdot \sin l + \frac{g}{H} \right] \cdot T - \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \cos l \cdot S + \frac{1}{H} (\Delta \cdot q \cdot \sin l - f \cos l) \cdot h \cdot W; \\
\dot{h} &= \frac{dh}{dt} = \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{H}\right) \cdot \cos l + \frac{h}{H} \right] \cdot T + \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \sin l \cdot S - \frac{1}{H} (\Delta \cdot q \cdot \sin l - f \cos l) \cdot g \cdot W; \\
\dot{f} &= \frac{df}{dt} = \frac{1}{2H} \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot (1 + f^2 + q^2) \cdot \sin l \cdot W; \\
\dot{q} &= \frac{dq}{dt} = \frac{1}{2H} \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot (1 + f^2 + q^2) \cdot \Delta \cdot \cos l \cdot W; \\
\dot{l} &= \frac{dl}{dt} = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{\mu}{p}} \cdot H^2 + \frac{1}{H} \sqrt{\frac{p}{\mu}} (\Delta \cdot q \cdot \sin l - f \cos l) \cdot W,
\end{aligned} \tag{6}$$

где $\dot{p}, \dot{g}, \dot{h}, \dot{f}, \dot{q}, \dot{l}$ – так называемые “неособенные элементы” орбиты.

S, W, T – проекции вектора возмущений, обусловленных влиянием гравитационных полей Луны и Солнца, нецентральностью гравитационного поля Земли, а также радиационным давлением.

Переход от неособенных элементов к кинематическим даётся выражением

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{2p}{(1 + h \cdot \cos l + g \cdot \sin l) \cdot (1 + f^2 + q^2)} \cdot \begin{pmatrix} 0.5 \cdot (1 - f^2 + q^2) \cdot \cos l + \Delta \cdot q \cdot f \cdot \sin l \\ 0.5 \cdot (1 + f^2 - q^2) \cdot \Delta \cdot \sin l + q \cdot f \cdot \cos l \\ q \cdot \sin l - \Delta \cdot f \cdot \cos l \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Свободными параметрами для траектории НС являются начальные значения неособенных элементов. Сущность предлагаемого метода оценивания ПВЗ состоит в одновременном уточнении всех параметров модели беззапросных измерений псевдодальностей, т.е. в минимизации по этим параметрам невязки

$$H = \sum_{i,j} \left\{ D_{ij} - \sum_1^7 P_K(t)_{ij} - \left| \bar{R}_i(t_{ij}) - \bar{r}(t_{ij} - \Delta_{ij}) \right| \right\}^2 \tag{8}$$

где i – номер БИС, j – номер сигнала, принятого этим БИС.

В соответствии с 3), 4), 5) $R(t)$ можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
\bar{R}(t) &= \tilde{P} \cdot \tilde{N} \cdot \tilde{Z}_0 \cdot \left\{ \tilde{E} + \alpha \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + x_p \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} + y_p \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \right\} \bar{R}_e \equiv \\
&\equiv \bar{R}_0(t) + \alpha \cdot \bar{R}_\alpha + x_p \cdot \bar{R}_x + y_p \cdot \bar{R}_y
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\text{где } \tilde{Z}_0 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{10}$$

т.е. явно выделить малые параметры, подлежащие оцениванию.

Так как траектория НС находится путём численного решения нелинейной системы дифференциальных уравнений, то её зависимость от начальных значений переменных очень сложна, и производные по ним аналитически не берутся. Поэтому, исходя из определения производной, найдём производные траектории НС по начальным условиям следующим способом: примем на

момент времени t_0 некоторые значения неособенных элементов p_0, g_0, h_0 и т. д. и вычислим с помощью 6) функции $p(t), g(t)$ и т.д. на мерном интервале (t_0, t_k) .

Опорная траектория $\bar{r}_0(t)$ находится с помощью 7). Затем ко всем начальным значениям по очереди добавляем малые приращения: $p_0 \rightarrow p_0 + \Delta p, g_0 \rightarrow g_0 + \Delta g$ и т.д. и вычисляем новые траектории $r_p(t), r_g(t), \dots$

Производные траектории НС равны:

$$\bar{\mathcal{E}}_p(t) = \frac{\bar{r}_p(t) - \bar{r}_0(t)}{\Delta p}; \bar{\mathcal{E}}_g(t) = \frac{\bar{r}_g(t) - \bar{r}_0(t)}{\Delta g}; \dots \quad (11)$$

Теперь истинную траекторию НС можно представить в виде:

$$\bar{r}(t) = \bar{r}_0(t) + \Delta p \cdot \bar{\mathcal{E}}_p(t) + \Delta g \cdot \bar{\mathcal{E}}_g(t) + \dots,$$

и минимизировать 8) также по приращениям $\Delta p, \Delta g$ и т.д.

Сохраняя члены первого порядка по малым вариациям параметров, получаем, в соответствии с 9) и 11), псевдодальность в виде:

$$\begin{aligned} |\bar{R}(t) - \bar{r}(t - \Delta)| &= \sqrt{(\bar{R}(t) - \bar{r}(t - \Delta))^2} = \\ &= \sqrt{(\bar{R}_0(t) + \alpha \cdot \bar{R}_\alpha + x_p \cdot \bar{R}_x + y_p \cdot \bar{R}_y - \bar{r}_0(t - \Delta) - \Delta p \cdot \bar{\mathcal{E}}_p(t - \Delta) - \Delta g \cdot \bar{\mathcal{E}}_g(t - \Delta))^2} = \\ &= \sqrt{(\bar{R}_0(t) - \bar{r}_0(t - \Delta))^2 + 2 \cdot (\bar{R}_0(t) - \bar{r}_0(t - \Delta)) \cdot \{\alpha \cdot \bar{R}_\alpha + x_p \cdot \bar{R}_x + y_p \cdot \bar{R}_y - \Delta p \cdot \bar{\mathcal{E}}_p - \Delta g \cdot \bar{\mathcal{E}}_g - \dots\}} \approx \\ &\approx D_0 + \frac{1}{D_0} \cdot \{\alpha \cdot k_\alpha + x_p \cdot k_x + y_p \cdot k_y - \Delta p \cdot k_p - \Delta g \cdot k_g - \dots\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $D_0 = p(R_0(t), r_0(t - \Delta))$, $\Delta = D/c$, $k_\alpha = (R_0(t) - r_0(t - \Delta)) \cdot R_\alpha$ и т. д.

Подставляя 12) в 8) и суммируя по всем БИС и по всем принятым сигналам, получаем обычную задачу минимизации квадратичной формы, которая сводится к решению системы (3 + 6) линейных уравнений (в простейшем случае). Во избежание плохой определённости этой системы к правой части 8) надо добавить регуляризующие члены типа

$a_1 \cdot (\Delta p)^2 + a_2 \cdot (\Delta g)^2 + \dots + b_1 \cdot (\delta utc - \delta utc_{np})^2 + \dots$, где индекс np означает прогнозные значения ПВЗ.

Разумеется, количество уточняемых параметров модели беззапросных измерений псевдодальностей может быть увеличено.

© Б.С. Могильницкий, В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, А.Я. Юданин, 2007

ОПЫТ КРАТКОСРОЧНОГО И ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

С развитием спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS задача высокоточного прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ) приобретает все большую остроту и актуальность, что связано с необходимостью постоянного повышения качества эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) передаваемого с борта космических аппаратов в режиме их автономного функционирования. Набор ПВЗ включает в себя параметр $dUT1 = UT1 - UTC$ – разность между всемирным временем $UT1$ и координированным временем UTC , характеризующий неравномерность вращения Земли и координаты текущего положения полюса X_p, Y_p .

Официальным поставщиком прогнозов ПВЗ в России является Государственная служба времени и частоты (ГСВЧ) в г. Москве. В международной службе вращения Земли (МСВЗ) г. Париж, вычисления прогнозов ПВЗ производятся ежедневно, а затем помещаются в Интернете на сайтах МСВЗ и других организаций [1]. Эти прогнозы в настоящее время считаются наиболее точными. Заявляемые МСВЗ погрешности прогнозирования $dUT1$ составляют 1 мс на 10 дней и до 25 мс на год. Реальные расхождения зачастую превышают заявленные в два-три раза. Такие точности оказываются неудовлетворительными для решения задач ЭВО.

В практике прогнозирования движения механических систем наиболее точные и устойчивые результаты обычно получают на основе использования физико-математических моделей, опирающихся на условия баланса сил и моментов, действующих на изучаемую систему. Для вращающейся Земли, из-за сложности самой системы и большого количества влияющих на процесс вращения факторов, такие модели [2] для целей прогноза ПВЗ к настоящему времени пока не удается использовать в полной мере.

Для прогнозов ПВЗ традиционно применяются эмпирические модели, представляющие собой интерполяции результатов измерений с помощью параметрических семейств известных функций или операторов. Задача идентификации таких моделей сводится к оцениванию параметров этих моделей теми или иными методами математической статистики.

Использование эмпирических моделей для целей прогнозирования ПВЗ всегда было проблематичным из-за возможных разладок принятой математической модели за пределами интервала интерполяции. Это происходит из-за перераспределения случайным образом весов многочисленных факторов, влияющих на процесс вращения Земли.

Чтобы адаптировать применяемые эмпирические модели к таким разладкам, приходится наращивать интервал интерполяции до десятков лет и привлекать множество критериев адекватности принятых математических

моделей. Часто такие критерии трудно формализуются, что не позволяет полностью автоматизировать процесс расчета прогнозов ПВЗ и требует участия в прогнозировании специалиста-аналитика.

Применительно к задачам формирования ЭВО спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС в ФГУП «СНИИМ» разработаны методики высокоточного прогнозирования ПВЗ и программные приложения этой методики. В качестве исходных данных, для построения эмпирических математических моделей ПВЗ, используются временные ряды наблюдений ПВЗ, предоставляемые МСВЗ и Ростехрегулированием.

Расчет прогнозов производится в несколько этапов. Необходимые для прогнозирования эмпирические математические модели ПВЗ строятся в классе гармонических функций, для которых оцениванию подлежат амплитуды, периоды и фазы гармоник.

На первом этапе непосредственному оцениванию параметров модели предшествует исключение из временных рядов исходных данных составляющих, природу которых принято считать детерминированной. Это приливные колебания, связанные с гравитационным воздействием на Землю Луны и Солнца. Расчет поправок за приливные гармоники производится по методике, принятой в МСВЗ [3].

Существующие в мире методы прогнозирования ПВЗ уже не удовлетворяют требованиям ЭВО. Поэтому, возникла необходимость в разработке новых методов, основанных на аппроксимации сложного физического вращения Земли суммой большого числа гармоник с периодами от 13 суток до 30 лет. Из практики прогнозирования временных рядов известно, что разложение сложной функции на гармонические ряды, в частности, на ряды Фурье не приводит к удовлетворительным результатам при ее экстраполяции в будущее. Поэтому, такие разложения применяются только для получения интерполяционной, аппроксимирующей модели на известных данных. Однако, с помощью численных экспериментов по моделированию динамики вращения Земли установлено, что при правильном подборе ряда формализованных и неформализованных критериев, используемых для одновременной минимизации аппроксимирующих функционалов, погрешности экстраполяции ПВЗ на 1 год и более, практически не отличаются от погрешностей интерполяции. Так, например, СКП прогнозирования $dUT1$ на 1 год не превышает 15 мс, а на 2 года – 40 мс. В то время как ошибки годового прогноза МСВЗ в несколько раз больше (до 100 мс).

Технология прогнозирования ПВЗ на короткие и средние интервалы (до 3-х месяцев) имеет ряд особенностей, обусловленных повышенными требованиями к их точности и надежности со стороны потребителей ЭВО: не более 1 мс для $dUT1$ и $0.01'$ для координат полюса на 15-дневном интервале. Для достижения этих требований в алгоритмы прогнозирования необходимо вводить большое число короткопериодических гармоник с небольшими амплитудами (менее 1 мс), параметры которых при этом становятся трудно определяемыми. Несмотря на это критерии оптимизации модели краткосрочного прогнозирования ПВЗ постепенно уточняются.

На основе предлагаемого подхода в СНИИМ разработано программное обеспечение для кратко- и долгосрочного прогноза ПВЗ. На рис. 1 показано главное окно программы с графиками годовых прогнозов $dUT1$ СНИИМ и МСВЗ (IERS). На рис. 2 приведены среднеквадратические ошибки прогноза СНИИМ, МСВЗ и ИМВП, полученные по данным с ноября 2006 г., когда была введена в эксплуатацию последняя версия программы. Эти предварительные данные показывают, что точность метода, разработанного в СНИИМ, выше существующих для краткосрочных (несколько дней) прогнозов, которые являются наиболее важными для оперативной поддержки навигационных систем. Точность прогноза СНИИМ на срок более месяца также оказалась лучше, чем в МСВЗ.

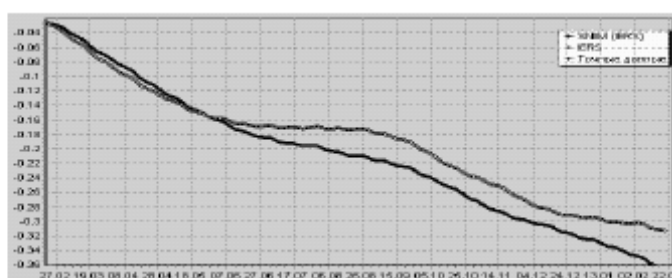


Рис. 1. Годовые прогнозы СНИИМ и МСВЗ от 22.02.2007 г.

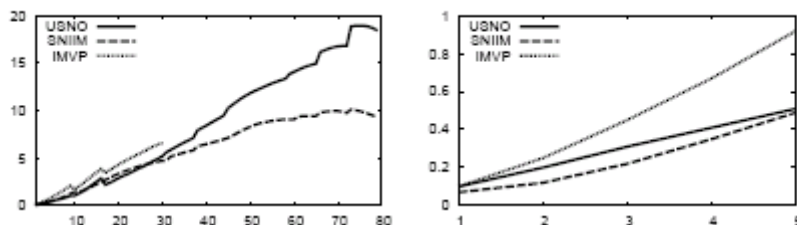


Рис. 2: Среднеквадратические ошибки прогноза $dUT1$, мс

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://maia.usno.navy.mil/>
2. Dennis D. McCarthy. IERS Technical note 21 // IERS Conventions 1996, Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris. 1996. P. 22-77.

© В.М. Тиссен, А.С. Толстиков, З.М. Малкин, 2007

**ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОКОТОЧНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Прошло достаточно большое время после проведения в июне 2000 г. в Нижнем-Новгороде VII-отраслевого семинара по проблемам метрологического обеспечения топографо-геодезического и картографического производства и семинара-совещания в декабре 2005 г. в Москве. Рассматривались задачи поставленные Правительством РФ «О мерах по повышению эффективности управления в сфере геодезии и картографии», где большое внимание было уделено состоянию метрологического обеспечения современных средств измерений (СИ), используемым в передовых технологиях, например спутниковым системам типа GPS/ГЛОНАСС. За истекший период времени произошли значительные изменения в использовании современных СИ: лазерные дальномеры, трехмерные наземные лазерные сканеры, кодовые нивелиры и рейки, получили широкое внедрение спутниковой геодезической аппаратуры.

Сегодня иметь современные приборы ещё не значит, что мы получаем высокую производительность и точность. Только после того как приборы откалиброваны и сертифицированы, они обеспечивают требуемое качество и точность. Поэтому не случайно мы сегодня развиваем метрологическую службу, которая обеспечивает высокую точность и качество выполнения топографо-геодезических, картографических, строительных, маркшейдерских и других работ.

Например, в настоящее время для определения пространственных координат в геодезии и топографии находит широкое применение лазерно-локационное сканирование, которое является самым значительным технологическим новшеством после внедрения в геодезическую практику навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, а без метрологического обеспечения эти технологии выглядят как игрушки.

За истекший период мы создали стройную систему передачи значений 3-х мерных координат в виде поверочной схемы от исходных эталонов единицы длины, угла, времени и частоты, которые взаимосвязаны в системе спутниковых координат типа ГЛОНАСС/GPS, выраженные в виде рабочих эталонов: пространственных базисов и полигонов, исследованных и утверждённых в системе ГОССТАНДАРТА России (Агентства по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации). Метрологическая служба единственная за Уралом имеет аттестат аккредитации с разработанными и в установленном порядке утверждёнными эталонами.

В настоящее время имеются некоторые трудности в реализации одного из основных звеньев поверочной схемы, создание эталона для калибровки лазерных сканеров, электронных светодальномеров, кодовых нивелиров и реек.

Актуальность инвестиционных программ на фоне технического регулирования, т.е. вхождения в международные программы по качеству и

повышению конкурентоспособности, в том числе в образовательном процессе очевидна.

Учитывая универсальность проблемы, предлагаем включить метрологическую службу СГГА в планы развития метрологического обеспечения Сибирского и Восточного регионов. Для обсуждения и внесения предложений по совершенствованию метрологического обеспечения предлагаются проекты поверочных схем для СИ геодезического назначения [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сурнин Ю.В. Локальная поверочная схема эталонного геодезического полигона СГГА и рабочих средств измерений / Ю.В. Сурнин // В настоящем сборнике

© В.Д. Лизунов, Л.Г. Куликова, В.А. Середович, 2007

УДК 528.02 / .08:006

В.Д. Лизунов, В.Т. Новоевский, А.В. Куликов

СГГА, Новосибирск

О МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ БОЛЬШИХ ДЛИН

Развитие и широкое использование новых высокоточных и производительных средств измерений (СИ) в геодезическом производстве требует пересмотра поверочных схем и методов поверки СИ. Особенно остро стала проблема метрологического обеспечения СИ в диапазоне $0 \div 24$ м при поверке базисных приборов [1], калибровке светодальномеров, тахеометров, лазерных сканеров, рулеток, кодовых реек. Предложенный метод и СИ для этих целей [2] наиболее отвечающие этой задаче при измерениях интерференционным методом требуют создание механического устройства - компаратора для воспроизведения перемещений датчика на соответствующее расстояние до 24 м. Изготовленные направляющие потребовали создания методики выставления и контроля направляющих в процессе эксплуатации.

Анализ методов контроля прямолинейности известными способами [3] показывает, что для плановой юстировки и контроля могут быть применены:

- Метод оптического визирования;
- Струнно-оптический метод;
- Дифракционный метод;
- Коллиматорный метод;
- Автоколлимационный метод.

Для высотной юстировки и контроля успешно применялись методы:

- Высокоточного геометрического нивелирования;
- Гидростатического нивелирования;
- Микронивелирования.

Тщательный анализ результатов применения этих методов показывает, что наиболее перспективно применение струнно-оптического метода, который может быть использован для выставления и контроля направляющих одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях, причём в струнно-оптическом методе можно использовать специальную оптику в виде объектива – аксикона не требующего фокусировки при наблюдении отсчётной перемещаемой марки. Для проведения этих работ подготовлен опытный образец оптической струны типа ОС-3м, имеющий отсчётные системы и регулировки, как на зрительной трубе устанавливаемой на одном конце направляющих, так и на марке перемещаемой по направляющим, что обеспечивает измерения положения визирной линии относительно исходной прямой. Предварительный теоретический анализ показывает, что погрешность выставления и контроля направляющих может быть обеспечена в пределах $\pm (4 + 2L)$ мкм, где L длина направляющих в м. Приведённое отклонение от прямолинейности обеспечит стабильную работу при перемещении датчика перемещений, уголкового отражателя лазерного интерферометра типа Renishaw, который будет использован для измерения перемещений создаваемого компаратора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов А.В. Исследование результатов поверки эталонного базисного прибора / А.В. Куликов, В.Д. Лизунов // Сб. матер. науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2005», 25–29 апр. 2005 г., Новосибирск. – Т. 6 Специализированное приборостроение, метрология. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 227–231.
2. 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 // Сб. материалов науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ -2005», 25-29 апр. 2005 г., Новосибирск.- Т. 6 Специализированное приборостроение, метрология. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С. 217–222.
3. Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве / под ред. В.Д. Большакова. – М.: Недра, 1976. – 335 с.

© В.Д. Лизунов, В.Т. Новоевский, А.В. Куликов, 2007

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ЧАСОВ ПО НАВИГАЦИОННЫМ СИГНАЛАМ

Существует большое количество задач научно-технического плана, требующих высокой согласованности моментов шкал пространственно-разнесенных хранителей времени (часов). Сюда могут быть отнесены задачи диспетчеризации, связи, геодезии и геофизики, космической и наземной навигации, баллистики и эфемеридной астрономии. Главным образом это задачи, решаемые на основе применения сети пространственно-разнесенных измерительных станций, синхронно фиксирующих развивающиеся во времени процессы. Высокие требования к синхронности работы таких станций возникают в случаях линейно-угловых измерений, приводящих к измерениям длительности интервалов времени. Для обеспечения качества таких измерений требуется, чтобы измеренные интервалы времени отсчитывались от согласованных моментов шкал времени часов, применяемых в составе указанных измерительных станций.

В связи с переходом НКУ ГЛОНАСС на беззапросные технологии формирования ЭВО, создается сеть беззапросных измерительных станций (БИС), оснащенных прецизионными измерителями псевдодальностей и высокостабильными часами. Требования к синхронности хода часов пространственно разнесенных БИС особенно высокие.

В дальнейшем изложении речь будет идти именно о синхронизации БИС, обеспечивающих траекторные измерения по орбитальным группировкам КА GPS и КА ГЛОНАСС для целей формирования ЭВО СНС ГЛОНАСС. Информация о расхождении частотно-временных параметров часов получается непосредственно из навигационных сигналов СНС.

Согласно [1], синхронизация шкал времени часов предполагает выполнение совокупности действий, после которых шкалы времени указанных часов становятся синхронными. Эти действия включают в себя:

- Оценивание расхождения моментов шкал времени, а так же оценивание характеристик нестабильности генератора часов;
- Расчет компенсирующих поправок;
- Применение аналитических или физически поправок к показаниям часов.

Традиционно [2] при синхронизации пространственно-разнесенных часов оцениваются только расхождения шкал времени этих часов. В настоящей работе предложены методы синхронизации, позволяющие одновременно оценивать расхождения моментов шкал времени опорных и синхронизируемых часов, а также характеристики долговременной и кратковременной нестабильностей частоты генератора синхронизируемых часов. На основе уравнений для погрешностей синхронизации также исследуются возможности достижения наивысшей точности синхронизации пространственно-разнесенных часов.

Рассматриваемые методы и алгоритмы синхронизации опираются на использование уравнений измерений, связывающих измеренные псевдодальности $D(t)$, геометрические дальности от НС до приемной антенны БИС $\rho(\mathbf{u}_c, \mathbf{u}_r)$ и уходы часов БИС $\Delta T_{II}(t) = T_{II}(t) - T_{ЦС}(t)$ от момента шкалы времени центрального синхронизатора (ЦС) системы $T_{ЦС}(t)$

$$D(t) = \rho(\mathbf{u}_c, \mathbf{u}_r) + c \cdot \Delta T_{II}(t) + \sum_{k=1}^8 p_k(t). \quad (1)$$

Здесь $p_k(t), k=1, \dots, 8$ – факторы, влияющие на точность синхронизации, представляют собой соответственно:

$p_1(t) = c \cdot \Delta T_C(t)$ – уходы бортовых часов НС $\Delta T_C(t)$ относительно шкалы времени ЦС,

$p_2(t) = \Delta D_{II}(t), p_3(t) = \Delta D_{TP}(t)$ – задержки навигационного сигнала в ионосферном и тропосферном слоях, выраженные в единицах длины;

$p_4(t), p_5(t)$ – погрешности, вызванные смещением фазовых центров передающей антенны от центра масс НС и смещением фазового центра приемной антенны аппаратуры потребителя;

$p_6 = N \times \lambda$ – неоднозначность фазовых измерений, N – неопределенно количество фазовых циклов, укладываемых на длину радиотрассы, λ – длина волны несущей;

$p_7(t)$ – погрешности приведения вектора координат потребителя $\mathbf{u}_{II}$, определенных в связанной с вращающейся Землей гринвичской системе координат ГСК, в инерциальную систему координат ИСК 2000, а также погрешности вычисления вектора текущих координат НС $\mathbf{u}_c$ по эфемеридам,

$p_8(t) = v(t)$ – представляют собой погрешности измерений, имеющие случайную природу. В $p_8(t)$ дополнительно входят случайные компоненты, характеризующие кратковременную нестабильность синхронизируемых часов.

Для описания уходов часов БИС используется дифференциальное уравнение [3]

$$\Delta \dot{T}_{II}(t) = s(t) + w(t), \Delta T_{II}(t_0) = \Delta T_{II0}, t \in [t_0, t_k], \quad (2)$$

связывающее уход часов БИС $\Delta T_{II}(t)$ с характеристиками долговременной $s(t)$ и кратковременной $w(t)$ нестабильностей частоты генератора часов. Долговременная составляющая представляется на интервале времени $[t_0, t_k]$ линейной комбинацией

$$s(t) = \sum_{l=1}^L \varphi_l(t) \cdot a_l \quad (3)$$

базисных функций $\varphi_l(t)$ и неизвестных коэффициентов a_l . Кратковременная составляющая нестабильности частоты трактуется как выходной сигнал формирующего фильтра, на входе которого действует порождающий случайный процесс типа «белый шум» с ограниченной дисперсией. В дальнейшем изложении речь будет идти главным образом об идентификации параметров долговременной нестабильности $a_l, l=1, 2; L=2$.

Для формализации рассматриваемой задачи синхронизации часов считаем, что имеется два пространственно разнесенных пункта A и B . В пункте A находится ЦС системы или часы БИС_А с известными параметрами нестабильности a_{iA} , определенными в системе ЦС или Государственного эталона времени и частоты. В пункте B находится БИС_В с часами, параметры нестабильности которых a_{iB} требуется оценить по навигационным сигналам. Полагаем, что зонах радио-видимости пунктов A и B одновременно находятся n навигационных спутников, что позволяет одновременно в пунктах A и B проводить по n измерений псевдодальностей $D_{iA}(t), D_{iB}(t)$.

Для синхронизации пространственно – разнесенных часов БИС в пунктах A и B в зависимости от условий, в которых эта задача решается, применяются алгоритмы, отличающиеся:

- Составом вектора состояния часов БИС;
- Составом и конфигурацией привлекаемого созвездия НС;
- Способом компенсации влияющих факторов $p_k(t)$ в (1).

Алгоритм АС1 применяется в случае, когда координаты пункта БИС_В неизвестны; и работа происходит по n радиовидимым НС. Алгоритм АС1, на основе решения системы n алгебраических уравнений вида (1) обобщенным методом наименьших квадратов (ОМНК), обеспечивает решение штатной задачи прямого назначения СНС – одномоментного определения координат потребителя в пункте B $\mathbf{u}_{iB}$ и оценивания расхождения момента шкалы времени потребителя $\Delta T_{iB}(t)$ от шкалы ЦС СНС. При этом в качестве меры, воспроизводящей момент шкалы времени ЦС, используются групповые часы радиовидимого созвездия n НС. Усредненный по ансамблю этих часов момент шкалы времени $T_{\Sigma}(t)$ воспроизводит момент $T_{iC}(t)$ с погрешностью

$$\Delta T_{\Sigma}(t) = T_{\Sigma}(t) - T_{iC}(t).$$

По нашим оценкам СКО этой погрешности к концу интервала времени между закладками на борт ЧВП может составлять 7–10 нс.

Алгоритм АС2 применяется в случае, когда координаты пункта БИС_В $\mathbf{u}_{iB}$ известны и для синхронизации используется n радиовидимых НС. Алгоритм АС2 обеспечивает одномоментное оценивание $T_{\Sigma}(t)$. Дополнительная погрешность синхронизации определяется уровнями усредненных по ансамблю из n НС влияющих факторов $p_k(t)$.

Алгоритм АС3 применяется при известных координатах пункта БИС_В $\mathbf{u}_{iB}$.

Синхронизация производится по одному выбранному определенным образом НС.

При этом обеспечивается одномоментное воспроизведение момента шкалы времени бортовых часов выбранного НС.

Алгоритм АС4 позволяет получить оценки неизвестных координат пункта БИС_В $\hat{\mathbf{u}}_{iA}$, оценки расхождений моментов шкал времени $\hat{a}_0 = \Delta T(t_0)$ и оценки параметров нестабильности $\hat{a}_1$ и $\hat{a}_2$. Отличие режима работы алгоритма АС4 от режима АС1 связано с тем, что для оценивания $a_1 a_2$ требуется накопление

измерений псевдодальностей на интервале времени $[t_0, t_k]$. Этот интервал может включать одно или несколько проходов НС в зоне радиовидимости БИС_В.

Алгоритм АС5 применяется в тех случаях, когда координаты пункта БИС_В известны и наблюдается n радиовидимых НС на интервале времени $[t_0, t_k]$. Алгоритм АС5 обеспечивает расчет оценок параметров нестабильности часов a_0, a_1, a_2 . Для этого используются результаты псевдодальномерных измерений, накопленные на интервале времени $[t_0, t_k]$, по n радиовидимым НС.

Алгоритм АС6 является частным случаем алгоритма АС5 при известных координатах пункта БИС_В и наблюдении одного, выбранного определенным образом НС. Алгоритм АС6 обеспечивает расчет оценок параметров нестабильности часов $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$.

Получение оценок $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2$ с помощью алгоритмов АС4, АС5, АС6 сводится к решению системы алгебраических уравнений на основе ОМНК. Матрица такой системы, в силу ортогональности функций $\varphi_l(t)$ в (3) на интервале $[t_0, t_k]$, близка к диагональной.

Уровни погрешностей оценивания параметра $\Delta T_{IB}(t)$ алгоритмами АС1, АС2, АС3 и параметров a_0, a_1, a_2 алгоритмами АС4, АС5, АС6 определяются главным образом уровнями влияющих факторов $p_k(t)$ в исходном уравнении (1).

Наиболее эффективный путь повышения точности синхронизации часов в пунктах A и B основан на привлечении измерительной информации из пункта A в виде дифференциальных поправок к измерениям псевдодальностей $\Delta D_{Ai}(t)$, полученным в пункте A с известными координатами $\mathbf{u}_{АП}$ и известными отклонениями моментов шкалы времени $\Delta T_{АП}(t)$ от шкалы времени ЦС. Рассчитанные в пункте A поправки $\Delta D_{Ai}(t)$ должны быть переданы по каналам связи в пункт B .

Важным условием применения таких поправок являются:

- Одинаковость радионаблюдаемых созвездий НС в пунктах A и B ;
- Однотипность применяемой аппаратуры псевдодальномерных измерений;
- Квазисинхронность проведения измерений в пунктах A и B .

Применение дифференциальных поправок к алгоритмам АС1, АС2, АС3 приводит к соответствующим одномоментным дифференциальным алгоритмам синхронизации $ДАС1, ДАС2, ДАС3$. Для алгоритмов АС4, АС5, АС6, работающих с накоплением измерительной информации, применение дифференциальных поправок позволяет получить дифференциальные алгоритмы синхронизации $ДАС4, ДАС5, ДАС6$.

Введение дифференциальных поправок обеспечивает компенсацию влияющих факторов $p_k(t)$ в (1). При этом уровни погрешностей компенсации в дифференциальных режимах будут меньше, чем в режимах абсолютных координатно-временных определений. Что важно, непосредственному оцениванию подлежат разности текущих уходов часов в пунктах A и B

$$\Delta T_{ПВ}(t) - \Delta T_{ПА}(t) = T_B(t) - T_A(t).$$

Конкретное сравнение $\delta p_k(t)$ и $p_k(t)$ показывает, что для факторов $p_1(t)$ и $p_4(t)$ в дифференциальном режиме $\delta p_1(t) = 0$ и $\delta p_4(t) = 0$. Уровни погрешностей компенсации $\delta p_2(t)$ и $\delta p_3(t)$ будут определяться различиями ионосферной и тропосферной обстановок на радиотрассах. Погрешности $\delta p_7(t)$ связанные с неточными эфемеридами НС также существенно уменьшаются, а для малых расстояний между пунктами А и В менее 100 км можно считать $\delta p_7(t) = 0$. Для погрешностей $\delta p_5(t)$, связанных со смещением фазовых центров приемных антенн и для шумовых компонент $\delta p_8(t)$ следует ожидать увеличения характеристик разброса (СКО). Также увеличится неопределенность в неизвестной разности количества фазовых циклов $\delta p_6(t) = (N_A - N_B) \cdot \lambda$.

В заключении отметим следующее.

1. В работе показана возможность оценивания не только координат потребителя и уходов шкалы времени применяемых часов, но и характеристик нестабильности часов потребителя. При этом требуется накопление результатов измерений на интервале времени $[t_0, t_k]$.

2. Установлено, что конфигурация наблюдаемого созвездия НС не влияет на качество оценивания характеристик нестабильности генератора часов a_0, a_1, a_2 .

Однако, при выборе НС для решения задачи синхронизации предпочтение следует отдавать спутникам с зенитным прохождением. В этом случае влияние ионосферных и тропосферных составляющих факторов $p_k(t)$ будет минимальным.

3. Показано, что использование фазовых измерений псевдодальности обеспечит эффективное оценивание параметров нестабильности частоты генератора часов БИС. Расхождение моментов шкал времени в этом случае оценить невозможно из-за наличия фазовой неоднозначности в результатах измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8.567–99. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения. Введ. 01.01.2001. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 11 с.
2. Использование спутниковой радионавигационной системы NAVSTAR для синхронизации шкал времени / И.А. Новиков и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 11. – С. 3–35.
3. Тиссен В.М. Математические модели нестабильности КСЧ / В.М. Тиссен, А.С. Толстиков // Материалы 7-й Междунар. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения”. АПЭП. – 2004. – Т. 3. – Новосибирск, НГТУ. – С. 263–269.

© И.Е. Макаров, А.С. Толстиков, 2007

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ УСТАНОВКА ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ В ДИАПАЗОНЕ ДО 10 М С ПОГРЕШНОСТЬЮ НА УРОВНЕ < 0.1 ММ (УВТ – 10 М)

Для высокоточного измерения больших длин широко используются лазерные фазовые дальнометры и интерферометры. В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию и применению новых более совершенных моделей средств измерений.

Анализ литературы и физических возможностей методов измерений показывает, что реально достигнутый, в настоящее время, уровень точности измерений больших длин на 2–3 порядка ниже предела, устанавливаемого физическими ограничениями. Такая значительная потеря точности объясняется сложностью физических процессов, происходящих в современных средствах измерений больших длин и, как следствие этого, целым рядом проблем, возникающих в процессе создания основных узлов таких устройств. Так, в фазовой дальнометрии, одна из основных причин, ограничивающих инструментальную точность реальных дальнометров, – несовершенство модулятора, вследствие чего в процессе модуляции появляется: неоднородность и нестабильность во времени фазы модуляции по сечению зондирующего луча, отклонение от гармонического закона огибающей модуляции луча и ряд других побочных явлений. Многообразие и взаимосвязанность ряда факторов, снижающих точность реальных фазовых дальнометров, требуют разработки большого числа новых способов реализации этого метода.

В основу всех лазерных дальномерных методов положено определение времени, в течение которого информационный сигнал пройдет двойное расстояние от дальнометра до отражателя в конечной точке измеряемой длины. При этом используется факт постоянства скорости распространения световых волн в вакууме и возможность учета изменения этой скорости в зависимости от реальных атмосферных условий путем определения среднего интегрального значения группового показателя преломления воздуха в момент измерений. Методы определения времени распространения информационного сигнала различаются по тому параметру электромагнитной волны, который положен в основу измерения: фазе, частоте, амплитуде, времени задержки импульса и их комбинаций.

Минимальная погрешность на период 90-х годов прошлого века обеспечивалась лазерными дальномерами, реализующими фазовый метод определения интервала времени распространения модулируемого по интенсивности лазерного излучения [1]. Лучшие образцы таких устройств могут обеспечивать измерение больших длин с погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-7}$ [2].

Другим весьма точным методом для измерения больших длин в метрологии и геодезии является интерференционный метод оптического

умножения (метод Вайсяля [3]), позволяющий реализовать уровень погрешности измерения больших длин < 1 км величиной $(1-3) \cdot 10^{-7}$.

Дополнительно отметим импульсно-фазовый метод измерений, совмещающий в себе достоинства фазовых методов в отношении точности измерений и импульсных систем в отношении дальности измерений. В качестве зондирующего сигнала используется последовательность импульсов, а время их прохождения удвоенного расстояния до объекта измеряется фазовым методом. Точностные характеристики лучших таких устройств на уровне погрешности в виде $(1 + 1 \cdot 10^{-6} L)$ мм.

Все рассмотренные выше устройства технически сложны и требуют больших как финансовых, так и интеллектуальных затрат для достижения метрологических характеристик соответствующих Установкам Высшей Точности (УВТ).

В последнее время, в связи с революционным прорывом в области формирования импульсов света сверхкороткой длительности, появилась реальная возможность понизить погрешность измерений больших длин на несколько порядков интерферометрическим методом, используя уникальные характеристики излучения лазерных устройств нового поколения[7].

Лазерные дальномеры и интерферометры по принципу своего действия реагируют непосредственно на оптическую длину пути, который проходит лазерный луч в атмосфере между точками, ограничивающими измеряемую длину, а не на геометрическое расстояние между этими точками.

Среднее интегральное значение показателя преломления воздуха слоя атмосферы на траектории луча невозможно определить непосредственно. Оно определяется либо с помощью лазерных измерений дисперсионным методом, либо измерением в некоторых точках траектории метеорологических характеристик: температуры, давления, влажности, связанных с показателем преломления известными соотношениями.

Таким образом, средства измерений в длинобазовой интерферометрии реагируют не на саму измеряемую длину, а на ряд вторичных величин, функционально с ней связанных. Использование приближенных значений эмпирических выражений функциональной зависимости и приближенных значений входящих в нее параметров, изменяющихся в процессе измерений за счет турбулентности атмосферы, обуславливают погрешность косвенного метода измерений [2].

При взаимодействии измерителя с объектом измерений, значение измеренной величины, отличается от значения, принятой в качестве измеряемой на величину длины пути луча лазера в самой оптической системе измерителя. Кроме того, на результат измерения влияет несовпадение оптической оси лазера и оптической оси объектива выходного коллиматора, оптической оси лазера и оси измеряемого базиса (неточная юстировка, рефракция в атмосфере и др.), неточность установки отражателя по углу места и азимуту. При изменении температуры воздуха меняются характеристики термопреобразователя, крепления, подводящих кабелей и т.д. В результате возникает погрешность передачи размера измеряемой величины от объекта средству измерений – от

воспроизводимой длины к образцовому дальномеру и погрешность от воздействия дальномера на базис.

Дальномерные средства измерений всегда имеют собственную инструментальную погрешность, обусловленную их конструктивными особенностями, а также метеорологическим состоянием внешних условий: уровнем фоновой засветки, турбулентностью, частотным спектром флуктуаций показателя преломления воздуха, скоростью и направлением ветра, изменением температуры, давления и влажности воздуха и др.

При косвенных измерениях длины в результате последующей математической обработки данных часто по приближенным соотношениям возникает погрешность вычислений.

Выше перечисленные факторы ограничивают физически достижимую точность измерения больших длин, многообразие которых определяется спецификой этих измерений. Чтобы уйти от этого трудно преодолимого барьера уровня точности, необходимо использование преимуществ новых революционных технологий, основанных на других принципах измерительного процесса.

В основу концепции создания УВТ положен принцип точного измерения длин интерференционным методом, основная идея которого изложена в [5], а техническая реализация представлена в [6]. Такой подход позволит избежать ряд технических проблем, уменьшить финансовые затраты, упростить сам процесс измерений, существенно (на порядки) снизить погрешность и на практике реализовать новую технологию измерительного процесса.

Основная идея – создание удобной меры длины на основе интерферометра Фабри – Перо (база 1 м), обладающей стабильностью длины на уровне эталона длины (эталонный вариант) или на уровне стабильности пассивного изолированного интерферометра Ф-П (рабочий вариант). Процесс измерений включает процедуры максимально точных измерений частот и длин волн лазерного источника. Для воспроизведения меры длины (измерение произвольных больших длин) используется метод Вайсаля [3].

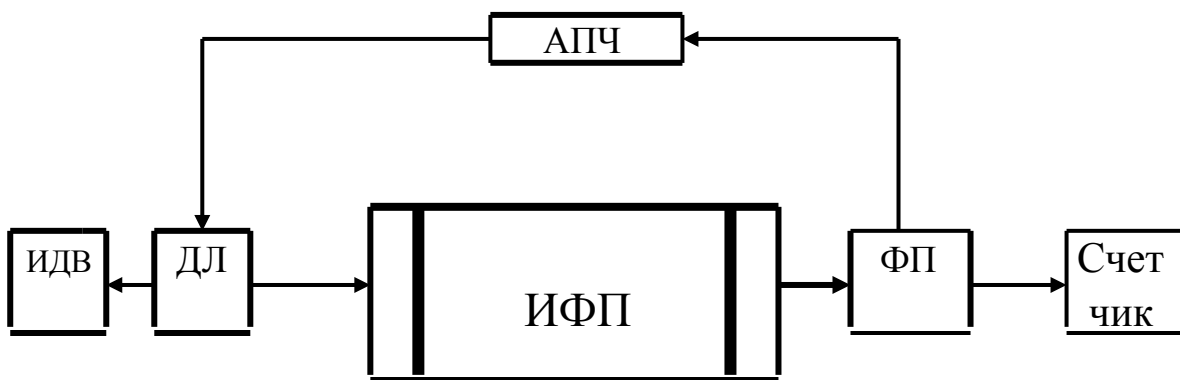
Вариант 1. Установка состоит из пассивно стабилизированного интерферометра Фабри-Перо (ИФП) базой 1м, одночастотного перестраиваемого по частоте диодного лазера (ДЛ), частота которого стабилизируется автоподстройкой частоты по максимуму пропускания его излучения через ИФП и измерителя длин волн ИДВ с относительной погрешностью измерения $\delta \approx 10^{-6}$.

Первоначально частота ДЛ настраивается на одну из продольных мод (максимум пропускания) ИФП и стабилизируется системой автоподстройки. Длина волны, прошедшего через ИФП излучения, этого ДЛ регистрируется ИДВ. Затем частота ДЛ настраивается на следующий максимум пропускания ИФП ($\Delta\nu = \Delta\lambda \cdot (C/\lambda^2) = C/2L \cong 150\text{МГц}$ – частотный межмодовый масштаб интерферометра, спектральная область чувствительности Ф-П) и стабилизируется. Снова измеряется длина волны излучения ДЛ с помощью ИДВ. По измеренным длинам волн излучения, прошедшего через соседние максимумы пропускания ИФП, а также по известному числу порядков

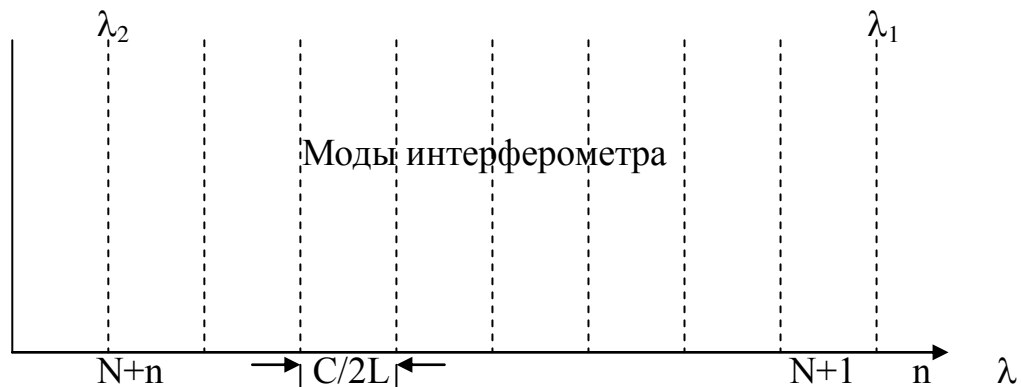
интерференции между этими модами однозначно определяется длина базы образцового ИФП с относительной погрешностью $\delta = 5 \cdot 10^{-8}$. Имея образцовую меру длины в 1 м, применяя метод Вайсяля, мы можем уверенно и легко определить, необходимую длину образцового базиса с указанной выше погрешностью. Кроме этого, этот метод с одной стороны позволяет измерять любую длину базиса с высокой точностью, а с другой стороны – значительно упрощает сам процесс измерений, избавляя нас от наложения погрешностей, неизбежно возникающих в фазовых методах измерения больших длин.

Вариант 2. В этом случае база ИФП представляет собой непосредственно длину, определенную в 10 м. Процедура измерений аналогична изложенной в 1-ом варианте. Исключается метод Вайсяля. Существенно повышаются требования к мерам пассивной стабильности ИФП: фундаментальное основание установки, максимально возможная изоляция от звуковых и тепловых возмущений и т. д. Кроме этого длина в 10 м для базы ИФП является по существу предельной из-за сложности юстировки, при использовании указанного метода. Таким образом, этот вариант сужает возможности интерференционного метода измерений больших длин и может быть применим для частного случая создания УВТ-10 м.

Приведем схему установки и пояснения к процессу измерений



Установка измерений



Принцип измерения

Длина измеряемого базиса определяется как $L = n(\lambda_1/2) = (n + N)(\lambda_2/2)$.

Откуда произвольная n -я продольная мода ИФП определяется как $n = N * \{(\lambda_2)/(\lambda_1 - \lambda_2)\}$. Теперь длина базиса определяется через число порядков интерференции N и измеренные длины волн как $L = N * \{[(\lambda_2)/(\lambda_1 - \lambda_2)] * (\lambda_1/2)\}$.

Это простая и изящная процедура определения длины заданного базиса по 2-му варианту.

Порядок интерференции определяется следующим образом. Одночастотный лазерный диод может перестраивать свою частоту генерации на величину $\sim 10\%$ относительно средней частоты. Пусть средняя длина волны генерации диода $\lambda \sim 1$ мкм, что соответствует частоте генерации ДЛ $\nu_0 = 300$ ТГц, тогда область перестройки его частоты $\Delta\nu \approx 30$ ТГц. Если измеряемая длина $L \sim 1$ м (база интерферометра), то масштабная частота ИФП $\Delta\nu = C/2L = 150$ МГц. Тогда при $\lambda_1 = 1$ мкм, λ_2 может принимать значения $\lambda_2 = \lambda_1(+/-) 0.1\lambda_1$, что дает величину $N = 2*10^6$. Более просто параметр N можно оценить из отношения двойной длины ИФП к длине волны генерации ДЛ как $N = 2L/\lambda = 2*10^6$ мкм/1 мкм $= 2*10^6$.

Эталонный вариант измерений. Основная идея изложена в работах [5, 8].

В этом случае база ИФП (1м) подвергается активной стабилизации с помощью радиочастотного стандарта и погрешность ее длины может быть снижена до уровня 10^{-10} , что на 2–3 порядка улучшает параметры пассивно стабилизированного ИФП. Процесс измерений может быть реализован двумя вариантами. Первый – аналогично выше изложенному – с помощью перестраиваемых диодных лазеров и современного измерителя длин волн ИДВ (погрешность $\delta\lambda \approx 10^{-8}$). Второй – с помощью современных технологий, используя уникальные возможности импульсного излучения лазеров пико- и фемтосекундного диапазона [5]. В этом случае точность измерений заданной длины возрастает на порядки и соответствует современным эталонным требованиям.

Предлагаемый метод измерений справедлив в идеальных условиях – в отсутствии атмосферы. В реальных атмосферных условиях неизбежно возникнут систематические погрешности, существенно ограничивающие заявленную точность. Систематическая погрешность возникает из-за пренебрежения явлением искривления траектории светового луча в неоднородной атмосфере. Эффект рефракции (искривление траектории светового луча) относится к классическим источникам систематических погрешностей при измерении больших длин. В дальнометрии эффект рефракции в том, что измеренная длина соответствует искривленной длине в неоднородной атмосфере траектории луча, а не измеряемой длине отрезка между конечными точками базиса. Это различие является систематическим и не может быть устранено путем многократных измерений. Если разница между этими длинами оказывается сравнимой с требуемой точностью или больше нее, в результаты измерений необходимо вводить поправки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазерная дальнометрия / под ред. Васильева, В.П., Хинрикус, Х.В. – М., 1995.

2. Методы и средства лазерной прецизионной дальнометрии/ Андрусенко, А.М., Данильченко, В.П., Прокопьев, А.В. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
3. T.I. Kukkamaki. Vaisala interference comparator. Suomen geod. Laitok. tied, № 1, p. 24–27, 1980.
4. Электрооптические и радиогодезические измерения / Кондрашков, А.В. – М.: Недра, 1972.
5. Прецизионные измерения длин на основе импульсного лазера / Могильницкий, Б.С., Толстиков, А.С., Черепанов, В.Я. // Измерительная техника. – 2004. – № 8. – С. 9–12.
6. Прецизионные измерения оптических частот и длин с помощью фемтосекундного лазера / Бикмухаметов, К.А., Дмитриев, А.К. // Материалы VII междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП. – 2004. – Т. 3. – С. 240.
7. Абсолютные измерения длины с помощью фемтосекундного лазера / Бакланов, Е.В., Дмитриев, А.К. // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 10. – С. 690.
8. Современные лазерные технологии для метрологических применений / Могильницкий, Б.С., Коломников, Ю.Д., Толстиков, А.С. // Материалы VII междунар. конф. "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП. – 2004. – Т. 3. – С. 227.

© Б.С. Могильницкий, К.А. Бикмухаметов, 2007

УДК 681.2: 536.6

В.Я. Черепанов

СГГА, Новосибирск

МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД КОМПАРИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Система обеспечения единства измерений основана, главным образом, на сравнении показаний испытуемого (поверяемого или калибруемого) средства измерений с показаниями эталонного (образцового) средства измерений. Более того, каждое средство измерений содержит в том или ином виде некий носитель размера единицы физической величины, который впервые аттестуют (исследуют метрологические характеристики и проверяют стабильность) при испытаниях и первичной поверке. Затем при периодических поверках убеждаются не только в стабильности этого носителя, но и работоспособности и правильности внутриприборного механизма сравнения измеряемой величины с этим носителем. В качестве примера этому может служить визуальный оптический пирометр, где в качестве носителя температурной шкалы, используется яркость встроенной в прибор пирометрической лампы, для которой при первичной поверке установлена зависимость яркости нити накаливания от температуры [1]. В качестве «устройства» сравнения используется глаз наблюдателя, который сравнивает яркость нагретого объекта с яркостью нити накаливания пирометрической лампы. При эксплуатации пирометра проводят его периодическую поверку, подтверждая правильность его показаний, опять же, сравнивая их с температурой внешнего эталонного излучателя или с показаниями эталонного пирометра. При этом убеждаются в правильной работе всего устройства пирометра, включая стабильность носителя температурной шкалы (пирометрической лампы), а также оптико-механической и электрической его частей и узлов.

Поэтому можно рассматривать внутреннее компарирование, происходящее в измерительном приборе, и внешнее компарирование, которое осуществляется передачей размера единицы измеряемой физической величины методом сравнения его показаний с показаниями эталонного измерительного прибора или эталонной (образцовой) меры. Сравнение показаний поверяемых и эталонных СИ применительно к поверочным схемам называют методом сличения или компарирования, а технические средства, осуществляющие такие функции, называют компараторами.

Наиболее ярким и простым примером компаратора являются рычажные весы, сравнивающие меры массы – поверяемые и эталонные гири. Другой пример – проливная расходометрическая установка, когда в ее гидравлической части последовательно установлены поверяемый и эталонный расходомеры и сравнивают их показания [2]. Это – примеры одновременного компарирования.

Если сравнение значений физических величин или показаний средств измерений разнесено во времени (проходит поочередно), то это разновременное компарирование. Примеры: компарирование значений теплопроводности эталонной меры из плавленого кварца и теплопроводности образца, похожего на плавленый кварц [3]; компарирование действующего значения силы переменного тока и значения силы постоянного тока по равенству теплового воздействия на участок электрической цепи.

При этом, как видно из примеров существует два вида воздействия измеряемой величины: когда сравниваются показания измерительных приборов (поверяемого и эталонного) при воздействии одинакового для сравниваемых приборов значения физической величины или когда сравниваются разные значения физической величины, которые уравнивают по показаниям нуль-индикатора. В первом случае используется дифференциальный метод измерения, во втором – нулевой.

Главные метрологические характеристики компараторов: нормированная чувствительность к изменению измеряемой величины, показатель постоянства этой величины в процессе компарирования, диапазон измерения сравниваемых приборов или значений величин, и, самое главное, погрешность метода передачи размера единицы, который реализует данный компаратор.

Модуляционный метод компарирования, предложенный в [4], основан на особенностях теплообмена в системе ядро – оболочка. При реализации метода поочередно сравниваю значения амплитуды колебаний электрической мощности P , подводимой к ядру, с амплитудой колебаний его теплоотдачи в условиях колебаний температуры оболочки (активного экрана). Если к ядру подводится мощность, изменяющаяся, например, по закону $P = p_o + p \sin \omega \tau$, а температура экрана T_{ε} колеблется около среднего значения $\bar{T}_{\varepsilon}$ противофазно колебаниям мощности с той же частотой ω и амплитудой θ_{ε} , то дифференциальное уравнение, описывающее колебания температуры образца около среднего значения $\bar{T}_o$, имеет вид [5]

$$C \frac{d\theta}{d\tau} + K_o \theta = (p - K_{\varepsilon} \theta_{\varepsilon}) \sin \omega \tau, \quad (1)$$

где K_o , K_ϑ – производные теплоотдачи ядра, соответственно по его температуре и по температуре экрана (предполагается, что средние температуры ядра и экрана много больше амплитуд их колебаний: $\bar{T}_o \gg \theta_o$, $T_\vartheta \gg \theta_\vartheta$); C – полная теплоемкость ядра.

Амплитуду колебаний температуры ядра θ_o находят из решения уравнения (1)

$$\theta_o = \frac{p - K_\vartheta \theta_\vartheta}{\sqrt{(C\omega)^2 + K_o^2}}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что при некотором значении $p = p_K$ амплитуды колебаний подводимой к ядру мощности выполняется равенство

$$p_K = K_\vartheta \theta_\vartheta, \quad (3)$$

которое является необходимым и достаточным условием равенства нулю амплитуды колебаний температуры ядра. Для теплообмена, например, излучением, когда внутренняя поверхность экрана зачернена ($\varepsilon_\vartheta \approx 1$) и много больше поверхности ядра F , можно полагать, что $K_\vartheta = 4\varepsilon\sigma \bar{T}_\vartheta^3 F$, где σ – постоянная Стефана-Больцмана [1]. В этом случае условие (3) приводит к формуле для нахождения полусферического интегрального коэффициента теплового излучения ε поверхности ядра

$$\varepsilon = p_K / 4\sigma_\vartheta \bar{T}_\vartheta^3 F \theta_\vartheta. \quad (4)$$

Очевидно, что ε ядра определяется амплитудой p_K подводимой к образцу мощности и температурным режимом активного экрана (радиационного в данном случае). Параметры температурного режима экрана $\bar{T}_\vartheta$, θ_ϑ и ω выбирают так, чтобы при $p = 0$ создать колебания температуры ядра с амплитудой $\theta_{o \min}$, достаточной для их регистрации. Для этого частота колебаний должна быть настолько малой, чтобы обеспечить наибольшую тепловую связь образца с экраном, существующую при $K_o \gg C\omega$ ($K_o = 4\omega\sigma_\vartheta \bar{T}_o^3 F$). Связь между температурами ядра и экрана в этом случае определяется соотношением [6]

$$\theta_{o \min} = \bar{T}_\vartheta^3 \theta_\vartheta / \bar{T}_o^3.$$

Для выполнения исходных предпосылок метода [5] также необходимо, чтобы $\theta_\vartheta / \bar{T}_\vartheta \approx 10^{-2}$. Тогда относительная температура экрана при заданных $\theta_{o \min}$ и T_o определится из соотношения

$$\bar{T}_\vartheta \approx \bar{T}_o \sqrt[3]{\theta_{o \min} / 0,01 \bar{T}_o}. \quad (5)$$

Отсюда следует что, например, для $\theta_{o \min} = 1$ К и $\bar{T}_o = 1500$ К температура $\bar{T}_\vartheta \approx 750$ К. То есть, средняя температура экрана может быть намного ниже температуры ядра, и, поэтому, величины $\bar{T}_\vartheta$ и θ_ϑ можно точно измерить, например, термоэлектрическим преобразователем.

С помощью модуляционного метода получены новые данные по коэффициенту ε платины, платинородиевых сплавов, а также сплавов и покрытий, используемых в авиакосмической технике. Благодаря высокой

чувствительности применяемого в методе нулевого принципа компарирования подтверждены немногочисленные данные по аномалии ε при структурных и фазовых (второго рода) переходах в металлах, в частности, у никеля в точке Кюри.

Теплоотдача ядра в системе ядро – оболочка определяется тепловым потоком Q между ними и поэтому, согласно [7], ее производная K_{ε} при изменении температуры оболочки (экрана) в общем случае имеет вид

$$K_{\varepsilon} = -\left(\frac{\lambda}{d} + \alpha + 4\varepsilon\sigma\bar{T}_{\varepsilon}^3\right)F. \quad (6)$$

Следовательно, можно создать условия, при которых использование предложенного модуляционного метода позволит кроме ε определять и два других важнейших параметра теплообмена – теплопроводность λ и коэффициент теплоотдачи α .

Таким образом, модуляционный метод фактически является методом периодического разновременного компарирования значений одной физической величины – значений теплового потока, вызванного электрическим нагревом ядра и значений теплового потока, обусловленного теплообменом между ядром и оболочкой. При этом амплитуду колебаний мощности нагревателя и их частоту можно достаточно просто сформировать и точно измерить. Поэтому этот источник модулированной по амплитуде электрической мощности выполняет функции эталонного, по которому можно измерить тепловые потоки, вызванные теплообменом излучением, конвекцией и теплопроводностью. Другими источниками неизвестной, компарируемой мощности могут быть лазерный излучатель, СВЧ-излучатель, излучатель типа «черное тело» и так далее. В качестве нуль-индикатора (ядра), определяющего равенство тепловых воздействий электрической мощности и мощности неизвестных излучателей, может быть, например, тонкая платиновая нить, выполняющая одновременно функцию эталонного источника мощности и нуль-индикатора колебаний температуры, определяемых по колебаниям электрического сопротивления нити. Колебания температуры нагретой нити можно так же регистрировать, например, по колебаниям ее светимости. При этом можно использовать не только синусоидальную, но и импульсную противофазную модуляцию мощности нагревателя и неизвестного источника мощности.

Основное достоинство предложенного метода – высокая скорость и многократность компарирования. Это снижает требования к стабильности во времени сравниваемых источников (генераторов) мощности или теплового потока.

Период T модуляции, которым определяется частота компарирования, может быть рассчитан по формуле [6]

$$T = \frac{2\pi\theta C}{p \sin \varphi}, \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi = \arctg \frac{C\omega}{K_o}. \quad (8)$$

Расчеты по этим формулам показывают, что для амплитуды колебаний температуры в 1 К период модуляции может быть менее 0,1 с для платиновой проволоки (или фольги) с площадью сечения 700 мкм².

Таким образом, можно констатировать, что известные способы одновременного и периодического компарирования могут быть успешно дополнены модуляционным методом, обеспечивающим высокую производительность и точность многократного, достаточно высокочастотного сравнения значений различных энергетических величин, в частности, источников мощности излучения различного происхождения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
2. Малогабаритный проливной стенд для калибровки и поверки тепло- и водосчетчиков / Береснев, В.К., Рогачевский, Б.М. и др. // Законодательная и прикладная метрология. – 1998. – № 3.
3. Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород / Калинин, А.Н., Соколова, Л.С., Дучков, А.Д., Черепанов, В.Я. // Геология и геофизика. – 1983. – № 3. – С. 116–122.
4. А. С. № 631788. Способ определения интегральной излучательной способности материалов / Черепанов, В.Я.; опубл. 1978, Бюл. № 41. – 2 с.
5. Модуляционный метод измерений интегральной излучательной способности / Черепанов, В.Я. // Теплофизика высоких температур. – 1979. – Т. 17. – № 2. – С. 395–399.
6. Компенсация тепловых потерь при измерении теплоемкости модуляционным методом / Крафтмахер, Я.А., Черепанов, В.Я. // Теплофизика высоких температур. – Т. 16. – № 3. – С. 647–649.
7. Адиабатический метод формирования тепловых потоков в эталонах физических величин / Черепанов, В.Я. // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО – Сибирь – 2006». – Новосибирск: СГГА, 2006. – Т. 4. – С. 201–205.

© В.Я. Черепанов, 2007

ПРИБОРЫ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НЕФТЕПРОДУКТОВ

С развитием техники повышаются требования к ассортименту и качеству нефтепродуктов, поэтому качество, как товарной нефти, так и продуктов ее переработки подлежит обязательному контролю. Документами, подтверждающими качество любых видов нефтепродуктов, является паспорт качества, а для нефтепродуктов подлежащих обязательной сертификации также и сертификат соответствия. Сертификат соответствия гарантирует, что нефтепродукт соответствует всем требованиям своей марки и назначению, а паспорт качества подтверждает, что нефтепродукт не утратил своих свойств к моменту продажи. Сертификат соответствия выдается изготовителю нефтепродукта органом по сертификации, а паспорт качества – испытательными лабораториями при соответствующей проверке качества нефтепродукта. Паспорт качества заполняется по всем показателям ГОСТ (или технических условий) на нефтепродукт в соответствии с результатами проведенных анализов, а значение показателей, не определяемых лабораторий предприятия, проставляются по паспорту поставщика, о чем делается соответствующая отметка в паспорте. Следовательно, результаты контроля качества товарных нефтепродуктов отражаются в паспорте, который свидетельствуют о соответствии их требованиям ГОСТ и служат основанием для отпуска продукции и расчета с потребителями.

Таким образом, качество нефтепродуктов является важнейшим параметром при проведении коммерческих операций с нефтепродуктами, под которым понимают совокупность свойств, обеспечивающих их пригодность для использования по назначению. Эти свойства принято разделять на две основные группы: физико-химические и эксплуатационные. К физико-химическим свойствам относятся свойства, характеризующие состояние нефтепродуктов и их состав (например: плотность, вязкость, фракционный состав). Эксплуатационные свойства характеризуют полезный эффект от использования нефтепродуктов по назначению, определяют область его применения. Некоторые эксплуатационные свойства нефтепродуктов оценивают с помощью нескольких более простых физико-химических свойств. Например, одно из основных эксплуатационных свойств топлив для авиационных газотурбинных двигателей – прокачиваемость – можно оценить, определив его некоторые физико-химические показатели, а именно: содержание механических примесей, воды, кислот, вязкость, плотность и т.п. В ряде случаев наиболее важные физико-химические показатели используют при маркировке нефтепродуктов: например для дизельных топлив важное значение имеют свойства, проявляемые при низких температурах, поэтому в зависимости от температуры застывания и помутнения топливо называется летним, зимним или арктическим.

Большинство методов оценки свойств и качества нефтепродуктов стандартизовано и по назначению подразделяются на приемосдаточные, контрольные, полные и специальные. Из указанных видов контроля наиболее

массовыми и распространенными являются приемо-сдаточные и контрольные испытания. Приемосдаточный анализ проводится для установления соответствия произведенного, поступившего или отгруженного нефтепродукта показателям качества, а контрольный анализ проводится в процессе изготовления или хранения нефтепродукта. В настоящее время контроль качества нефтепродуктов в организациях, осуществляющих деятельность с нефтепродуктами, возложен на подразделения этих организаций. В целях установления единых требований по контролю качества нефтепродуктов в 2003 году Министерством энергетики Российской Федерации была утверждена инструкция «Контроль и обеспечение сохранения качества нефтепродуктов в организациях нефтепродуктообеспечения» [1]. В ней устанавливаются единые требования к организации и проведению работ по контролю и обеспечению сохранения качества нефтепродуктов при приеме, хранении, транспортировании и отпуске нефтепродуктов в организациях и у индивидуальных предпринимателей.

Согласно этих рекомендации приемо-сдаточный анализ для различных видов нефтепродуктов осуществляется по 4–5 параметрам, достаточным для подтверждения его качества. Так, для бензина автомобильного такими параметрами являются: цвет, плотность, содержание механических примесей и воды, фракционный состав и октановое число, характеризующее детонационную стойкость бензинов.

В связи с этим возрастают требования, предъявляемые к точности методов определения качества бензина, а следовательно, актуальной является проблема разработки точных и быстродействующих анализаторов физико-химических свойств топлив. В частности, существующий стандартный метод определения октанового числа, предусматривает применение сложных и дорогостоящих испытательных установок на основе двигателей внутреннего сгорания, в связи, с чем не обеспечивается необходимая оперативность измерений.

В Сибирском НИИ метрологии был разработан ряд экспресс-анализаторов типа СИМ (анализаторы качества) для оценки октанового числа бензинов, вида дизельного топлива и марки, автотракторных по величине диэлектрической проницаемости испытуемого нефтепродукта. Однако, как показал опыт эксплуатации, не все анализаторы в полной мере удовлетворяют современным требованиям их практического применения. Так как принцип действия этих приборов основан на косвенном методе определения (диэлектрическая проницаемость) свойств нефтепродукта, то эти приборы, в основном, служат лишь для оценки вида ГСМ или его идентификации, а не количественном определении его конкретных физико-химических показателей. Поэтому большинство этих приборов требует, в отдельных случаях существенной модернизации, а в других – пересмотра и замены принципа действия [1].

В первую очередь, эти положения могут быть отнесены к существующему экспресс-методу определения октанового числа автомобильного бензина (анализатор СИМ–3). При определении октанового числа стандартных бензинов по ГОСТ 2084 или ГОСТ 51105 способ дает неплохие результаты. Однако в случае определения бензинов, выпускаемых по различным ТУ, которых

насчитывается в настоящее время более 20, метод обладает существенными погрешностями. Подобные измерительные приборы для определения октанового числа (октанометры), которых в настоящее время внесено в Государственный реестр средств измерений шесть типов, уже не удовлетворяют современным требованиям по качеству измерений нефтепродуктов. В этой связи известны попытки решить указанную проблему различными методами: а) созданием банка данных по известным маркам и видам бензинов, б) используя различные дополнительные шкалы в указанных октанометрах, применяя для их калибровки образцы бензинов с известным октановым числом. Однако, на наш взгляд, единственно верным решением этой проблемы может стать разработка октанометра, по принципу действия близкому к физическому определению октанового числа или методу его определения на моторной установке. Ранее делались попытки связать величину октанового числа бензинов с процессами окисления углеводородов химическими или термическими способами. Однако, получить четкую корреляцию процессов окисления с октановым числом так и не удалось. Применение ИК-спектрофотометров для анализа состава бензинов с последующим расчетом октанового числа оказалось также малоперспективным вследствие недостаточной точности этого косвенного метода и высокой стоимости применяемой для анализа аппаратуры. Проведенный нами анализ показывает, что параметром, так или иначе связанным с октановым числом, может стать время задержки воспламенения, измеряемое в стандартных условиях. Расчеты показывают, что, используя современную элементную базу измерительной техники вполне реальным является создание портативного октанометра. В настоящее время, в Сибирском НИИ метрологии проводятся работы по разработке указанного октанометра.

Следующим по степени значимости параметром автомобильных топлив может являться содержание воды в топливе. Вода в жидком топливе может находиться в растворенном (гигроскопическом), диспергированном и свободном состоянии.

Содержание растворенной воды зависит в основном от химического состава нефтепродуктов и его температуры. С повышением температуры растворимость воды увеличивается во всех углеводородах. Наибольшей растворяющей способностью по отношению к воде обладают ароматические углеводороды. Чем выше содержание в нефтепродукте ароматических углеводородов, тем выше в ней растворимость воды. При снижении температуры растворимость воды в нефтепродукте уменьшается, и вода может выделяться в виде дисперсных частиц, образуя водонефтяные эмульсии. Наличие воды в моторных топливах и смазочных маслах является крайне нежелательным. Содержание воды в смазочных маслах усиливает их склонность к окислению и ускоряет коррозию металлических поверхностей, соприкасающихся с маслом. Присутствие воды в моторных топливах может привести при низких температурах к прекращению подачи топлива из-за забивки топливных фильтров кристаллами льда. Методы определения воды в нефтепродуктах могут быть разбиты на две группы: качественные и

количественные. К качественным методам относятся пробы на прозрачность и на потрескивание. Для количественного определения воды в нефтепродукте можно использовать различные их свойства, функционально связанные с содержанием в них воды: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, диэлектрическую проницаемость, электропроводность, теплопроводность и т.д. Заранее рассчитать вид этой функциональной зависимости, как правило, невозможно из-за неаддитивного вклада содержания воды в измеряемый параметр. Неаддитивность обусловлена химическим взаимодействием молекул воды и вещества. По этой причине математическую зависимость обычно находят, используя экспериментальные данные.

Количественные методы определения воды делят на прямые и косвенные. К прямым методам следует отнести метод Дина и Старка, титрование реактивом Фишера, к косвенным – диэлькометрический, на котором основана работа прибора для определения воды в нефтепродуктах типа СИМ-4. Данный прибор, несмотря на удобство работы с ним и экспрессность измерения содержания воды позволяет определять только эмульсионную воду. В этой связи при измерениях всегда возникает погрешность определения содержания воды за счет растворенной воды и воды, содержащейся в свободном состоянии в виде отдельных капель размером 0,1–1 мм. В этой связи в настоящее время ведется разработка прибора для определения воды по электропроводности адсорбирующего элемента. Преимуществом указанного способа определения является возможность определения воды независимо от форм содержания ее в нефтепродукте.

К еще одному важнейшему показателю качества нефтепродукта определяемому при приемо-сдаточных испытаниях относятся содержание механических примесей. Механические примеси образуются в нефтепродуктах за счет продуктов коррозии аппаратов и трубопроводов, а также загрязнении при транспортировке и хранении. Механические примеси в топливе могут привести к засорению топливо проводов, фильтров, увеличению износа топливной аппаратуры, нарушению питания двигателя. Из механических примесей наиболее опасными являются песок и другие твердые частицы, истирающие металлические поверхности. Стандартизованные методы оценки чистоты нефтепродуктов позволяют контролировать содержание твердых примесей в широких пределах (ГОСТ 10577-78, ГОСТ 6370 – 83). Однако эти методы имеют очень существенный недостаток, связанный с применением точных аналитических весов и длительной подготовки пробы для анализа. Перспективным является использование экспресс-анализаторов, например типа СИМ-12. Вместе с тем, указанный анализатор имеет также основной недостаток, который заключается в том, что крупные частицы мехпримесей не участвуют в результате измерения за счет их высокой скорости седиментации.

На наш взгляд, наиболее обоснованным методом, который может быть положен в основу для разработки прибора для измерения мехпримесей нефтепродуктах, является метод фильтрационной мембранографии с последующей объективной фотометрией осажденных примесей.

Кроме этого, такие важнейшие показатели качества топлива как: содержание бензола, марганца, фактических смол, определение кислотности и индукционного периода не могут быть определены приборами типа СИМ. Вместе с тем, требования к топливам, а именно: ГОСТ 2048-77, ГОСТ Р 51105-97, ГОСТ 302-97 требуют обязательной проверки топлив по перечисленным параметрам. Поэтому существует необходимость рассмотреть возможность использования различных физико-химических методов для контроля этих параметров нефтепродуктов, что является темой отдельной работы.

Таким образом, анализируя состояние метрологического обеспечения измерений основных параметров нефтепродуктов в части приборного обеспечения, его можно признать удовлетворительным для современных практических измерений. Вместе с тем, существует ряд недостатков присущих используемым в технических измерениях приборам. Поэтому возникает необходимость разработки и создания приборов экспресс-контроля имеющих улучшенные технические и метрологические показатели. В основу работы этих приборов могут быть положены различные физико-химические методы анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение физико-химических методов анализа для определения параметров ГСМ / Шувалов, Г.В. // Материалы 6-й междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2002»: сб. тр. Новосибирск, 2002. – Т. 3. – С. 135–137.

© Г. В. Шувалов, 2007

УДК 543.812.08-15

Г.В. Шувалов, А.Ю. Жуков, О.В. Ясырова

ФГУП «СНИИМ», Новосибирск

ГОУ ДПО «Академия метрологии, стандартизации, сертификации», Москва

АККРЕДИТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА БАЗЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «КЛАН-1»

Важнейшей задачей любой организации является повышение ее конкурентоспособности на рынке, которая, в первую очередь, определяется ее способностью производить продукцию или предоставлять услуги, удовлетворяющие всем требованиям потребителей, а зачастую даже превосходящие их ожидания (производство «качественного» продукта).

Источником всех достоверных сведений о свойствах и характеристиках продукта являются результаты испытаний, которые являются и источником информации для совершенствования потребительских свойств, технологии изготовления, а также различных процедур оценки соответствия. Для организации, осуществляющей деятельность по испытаниям, продуктом являются полученные в ходе испытаний результаты, оформленные в виде документа (в сложившейся практике в виде «протокола испытаний»; «протокола анализа»; «отчета об испытаниях» и т.п.).

Объективность и достоверность результатов испытаний во многом зависят от таких факторов (техническая компетентность) как:

- Квалификация, подготовка и опыт персонала;
- Точность измерений в ходе испытаний;
- Соответствующие установленным задачам методы испытаний, оборудование, средства измерений и др.

Кроме того, повышение эффективности производственной деятельности, связанной с обеспечением качества, достигается путем внедрения системы внутриорганизационного управления, охватывающей такие вопросы, как:

- Оценивание того, как и зачем осуществляется то или иное действие;
- Описание методов решения задач и фиксирования достигнутых результатов, т.е. в общем понимании – внедрение системы менеджмента качества.

Доверие к компетентности организаций, осуществляющих оценку соответствия, достигается в первую очередь, путем подтверждения ее соответствия общепризнанным (стандартизованным) требованиям.

Весь международный опыт, связанный с установлением требований к факторам, влияющим на компетентности организаций, осуществляющим деятельность по проведению испытаний, сконцентрирован в стандарте ИСО/МЭК 17025 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Стандарт содержит не только требования к факторам, обеспечивающим объективность и достоверность результатов испытаний, включая отбор проб (образцов) (требования к технической компетентности), но и требования к менеджменту.

В 2005г. была разработана и принята новая версия стандарта ИСО/МЭК 17025 основанная на положениях стандартов ИСО 9000 версии 2000. В новой версии введены положения с необходимостью оценки эффективности обучения персонала и постоянным улучшением деятельности и системы менеджмента качества лаборатории.

В соответствии с вводной частью стандарта «лаборатории, выполняющие требования настоящего стандарта, будут действовать и в соответствии с требованиями ИСО 9001». Это означает, что если лаборатория соответствует требованиям ИСО/МЭК 17025, то ее система менеджмента применительно к деятельности по проведению испытаний, соответствует принципам ИСО 9001.

Таким образом, при рассмотрении вопросов связанных с системой менеджмента лаборатории (формирование, внедрение, оценка, улучшение) можно и нужно применять общие подходы к системам менеджмента качества в соответствии с требованиями ИСО 9001.

В мировой практике подтверждение компетентности может проводиться различными способами:

- Первой стороной – проводится самой организацией или от ее имени приглашенными специалистами для внутренних целей организации

(самооценка, сбор информации для различных видов планирования, внутренние проверки деятельности и т.п.);

- Второй стороной – проводятся сторонами, заинтересованными в деятельности организации (например: проверка со стороны заказчика) или от их имени приглашенными специалистами;

- Третьей стороной – проводится внешними, независимыми сторонами (типичным примером проверки третьей стороной является аккредитация).

Из всех перечисленных способов подтверждения компетентности лабораторий, наиболее доказательным является аккредитация, так как проводится независимыми организациями.

В последнее время расширяется количество аккредитованных лабораторий по испытаниям нефтепродуктов. Это связано с тем, что с развитием транспортной техники повышаются требования к ассортименту и свойствам нефтепродуктов. Комплекс требований, предъявляемых к параметрам горючесмазочных материалов (ГСМ) изложен в ряде стандартов, в частности, ГОСТ 2084-77, ГОСТ 305-82, ГОСТ Р 51105-97, ГОСТ 8226-82. В них нормируются эксплуатационные и физико-химические характеристики автомобильных бензинов, дизельного топлива и автотракторных масел.

Однако, качество ГСМ, поступающих к потребителю, часто отличается от стандартного, в основном из-за нарушения условий транспортировки и хранения. Поэтому возникает необходимость постоянного контроля качества ГСМ в местах их хранения и продажи. В этой связи растет значение анализа физико-химических параметров нефтепродуктов «на месте» (on site). На практике же на сегодняшний день контроль качества ГСМ осуществляется только на крупных предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса, оснащенных аккредитованными стационарными лабораториями. В остальных структурах этого комплекса, особенно на топливно-заправочных пунктах и АЗС, контроль качества ГСМ отсутствует, несмотря на очевидность подобного контроля. Основная причина – недостаток необходимой измерительной техники, с помощью которой можно было бы оперативно определить параметры ГСМ.

Добиться обеспечения массового контроля нефтепродуктов, возможно, несколькими путями. Среди них можно назвать упрощение процедур анализа и соответствующих технических средств, не снижающих качество анализа, а также осуществление контроля непосредственно в тех местах, где находится контролируемый объект. Последнее дает возможность исключить операции с пробами, связанные с их транспортировкой и хранением, а также разгрузить специализированные лаборатории от проведения массовых анализов. Кроме того, в большинстве случаев решение по результатам анализов должно приниматься на месте и быстро (пример – проверка качества нефтепродуктов на АЗС).

Наиболее эффективным способом массового контроля качества ГСМ в местах хранения и продажи является применение специализированных передвижных лабораторий, оснащенных необходимыми средствами измерений.

Применение передвижных лабораторий дает возможность на базе маршрутных схем создать четкую систему контроля качества ГСМ при приемке, хранении и отпуске топлива.

Для осуществления оперативного контроля качества нефтепродуктов в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии были разработаны комплектные лаборатории анализа нефтепродуктов типа «КЛАН-1»[1].

Лаборатории выпускаются двух модификаций: стационарные и передвижные, размещенные в специально оборудованном автомобиле. В состав лаборатории входит комплект измерительных приборов (анализаторов), измерительное и вспомогательное оборудование.

Средства измерений, измерительное и вспомогательное оборудование позволяют измерять параметры нефтепродуктов, условно разделенных на три группы:

- Автомобильные бензины;
- Дизельное топливо;
- Моторные и автотракторные масла.

Количество измеряемых параметров нефтепродуктов определяется объемом проводимого анализа (приемо-сдаточный, контрольный или полный).

Комплектные лаборатории для измерения параметров нефтепродуктов оснащаются средствами измерений, которые изготавливаются в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии.

Все приборы, входящие в состав передвижной лаборатории, прошли государственные испытания и утверждены Госстандартом как типы средств измерений. Большинство из указанных приборов реализуют стандартные методы испытаний нефтепродуктов, изложенные в соответствующих государственных стандартах (за исключением экспресс-анализатора октанового числа и определение механических примесей).

В комплект передвижной лаборатории входит персональная ЭВМ «NOTE BOOK» для ведения базы данных результатов анализа и их вывода в виде протокола стандартной формы. Кроме того, имеется база нормативных данных параметров автомобильных бензинов и масел, что позволяет оперативно контролировать отклонение измеряемых параметров от их номинальных значений.

Передвижная лаборатория представляет собой комплекс перечисленных средств измерений, смонтированных на базе автомобиля «Газель».

Рассмотренная передвижная лаборатория прошла, государственные испытания и внесена в Государственный реестр средств измерений (сертификат № 26145-03 от 19.01.2004 г).

Особенностью лаборатории является то, что в ускоренные сроки на ней провести анализ бензинов, дизельного топлива и автотракторных масел по основным параметрам в местах их хранения и продажи с выдачей протокола испытаний. Время, необходимое для проведения анализов, как показывает практика, составляет не более 2,5 часов.

В 2002–2006 годах такие лаборатории были изготовлены и поставлены ФГУП «Госэнергонадзор по Курганской области» и ФГУП «Госэнергонадзор по республике Марий-Эл», а также в Республику Казахстан «Казмунай газ», ООО «Сибнефть-Красноярскнефтепродукт».

Для повышения статуса указанных лабораторий и признания результатов измерений, организации приобретающие передвижные лаборатории, как правило, имеют желание аккредитоваться в системе ГОСТ Р. Однако, бытует мнение что аккредитации подлежит только стационарные лаборатории. На самом деле п. 4.1.1 ИСО/СЭК 17025 содержит совокупность требований, которые лаборатории должны выполнять, чтобы доказать своим клиентам и регулирующим органам, что они применяют систему менеджмента, позволяющую полностью контролировать действующие в лаборатории процессы, и обладают действительно технической компетентностью.

Стандарт применим для всех организаций, осуществляющих испытания, вне зависимости от организационной и правовой собственности организации, распространяется на все лаборатории независимо от численности персонала или видов их деятельности, и не только на лаборатории контроля качества продуктов, но и на лаборатории участвующие в деятельности, связанных с контрольно-ревизионными мероприятиями (например: оценка остатков товарной массы продукции).

Стандарт ИСО/МЭК 17025 не устанавливает однозначного требования к тому, что испытания должны проводиться только в стационарных условиях и стандартизованными («гостированными») методами испытаний. А это означает, что требования ИСО/МЭК 17025 можно применять при оценке компетентности лабораторий осуществляющих испытания на передвижных комплексах (передвижные испытательные лаборатории) экспресс-методами и методами, не включенными в стандарты.

МЭК 17025 требования стандарта распространяются на организацию в целом (применительно к деятельности по проведению испытаний), а не на отдельное структурное подразделение.

Это подтверждает и практика работ по аккредитации в Ростехрегулировании (в Системе сертификации ГОСТ Р), когда требования ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 распространяется на юридическое лицо в целом, применительно к деятельности по оценке соответствия (организация и проведение испытаний в определенной области деятельности), а не на отдельное структурное подразделение и аттестат аккредитации оформляется на юридическое лицо.

Таким образом, передвижная лаборатория «КЛАН-1» позволяет решать задачу осуществления оперативного инструментального контроля качества реализуемых ГСМ и организация, в составе которой имеется такая лаборатория, может быть аккредитована в системе ГОСТ Р.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка приборов для определения качества судовых нефтепродуктов / Шувалов, Г.В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2003. – №2. – С. 146–149.

© Г.В. Шувалов, А.Ю. Жуков, О.В. Ясырова, 2007

УДК 666.3: 666.11.01

Л.Б. Воробьева

СГТА, Новосибирск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВИНЦОВОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Обеспечение высоких требований к точности и чистоте поверхностей оптических элементов были и остаются одной из технологических проблем приборостроения. Настоящая работа посвящена изучению влияния состава оптического материала на его физико-механические свойства и на способность к механической обработке.

Объектом исследования были выбраны специально синтезированные трехкомпонентные силикатные стекла системы $K_2O - PbO - SiO_2$. Такая система является основой промышленных стекол марки «Флинт». Отказ от применения в качестве образцов промышленных флинтовых стекол объясняется многокомпонентностью последних и желаем в исследовании исключить влияние нескольких параметров одновременно. Стекла исследуемого разреза $PbO - K_2O \cdot 9SiO_2$ диаграммы равновесия системы $K_2O - PbO - SiO_2$ выбраны таким образом, что отношение в них содержания окиси калия к кремнезему сохраняется равным 1:9, а соотношение окиси свинца и кремнезему изменяется как $n:9$, где $n = 0; 1; 2; \dots; 7$. Состав стекол по синтезу приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав образцов стекол (по синтезу)

№ образца	Состав, мол. %		
	K_2O	PbO	SiO_2
1	10,00	0,00	90,00
2	9,09	9,09	81,82
3	8,33	16,67	75,00
4	7,69	23,08	69,23
5	7,14	28,57	64,29
6	7,67	33,33	60,00
7	6,25	37,50	56,25
8	5,88	41,18	52,94

Положение синтезированных стекол относительно фазовых полей диаграммы равновесия системы $K_2O - PbO - SiO_2$ показывает, что образцы № 1 и № 2 относятся к фазовому полю тридимита, образец № 3 находится на границе поля тридимита, образец № 4 является сложным силикатом свинца, а образцы № 5-8 принадлежат фазовому полю силиката состава $K_2O \cdot 4PbO \cdot 8SiO_2$.

Такое положение образцов стекол на диаграмме состояния дает основание для прогноза их механических прочностных свойств. Прочность стекол № 1–3

соответствует прочности кремнезема с мозаичной структурой. Прочность стекол № 4–8 прочности высоконефтемистого кристаллического бисиликата свинца $PbO \cdot 2SiO_2$. Атомы свинца и калия в структуре стекол ведут себя как модификаторы кристаллической решетки кварца.

Измерение теплового линейного расширения выполнялось на кварцевом dilatометре мод. ДКВ – I. Температура измерялась хромель-алюминиевой термопарой с точностью $\pm 0,02$. Для устранения систематической ошибки измерения проводились на трех dilatометрах. Общая погрешность определения величины коэффициента термического расширения составляла $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹.

Устойчивость стекол к механической обработке оценивалась величиной полирующей способности – количеством удаленного с образца материала за определенный промежуток времени. В работе использовался стандартный способ определения полирующей способности с использованием в качестве полирующего агента водной суспензии двуокиси церия.

Результаты определения термического расширения и споллировываемости стекол приведены в табл. 2.

Таблица 2. Термическое расширение и способность к механической обработке стекол

№ образца стекла	Коэффициент линейного термического расширения (КТР) $\times 10^7$ град ⁻¹ , средний в интервале температур, °C ($t_{ком.} - 70$) (100 – 200)		Температура dilatометрического размягчения, °C	Скорость сколировывания, $\frac{мкм}{30 мин}$
1	62,0	63,0	580	0,36
2	68,5	74,0	546	0,54
3	74,0	86,0	520	0,63
4	76,0	86,0	500	0,72
5	82,0	100,0	437	1,08
6	90,5	110,0	434	1,38
7	95,0	111,0	431	1,59
8	97,0	111,0	430	1,83

Анализ показывает, что суммарное действие K_2O и PbO на КТР при одинаковом содержании SiO_2 слабее, чем влияние отдельно K_2O и сильнее, чем PbO . Для более корректного анализа влияния состава стекол на физико-механические свойства целесообразно привлечь весьма чувствительную структурную характеристику – молярный объем. Сравнение влияния состава стекол на молярный объем и КТР показывает, что, если на величину КТР подавляющим является воздействие K_2O , то величина молярного объема при введении PbO сначала почти не изменяется (стекло № 2), затем его значение постепенно убывает (стекла № 3–4). У стекла № 4 молярный объем имеет минимальное значение. При дальнейшем увеличении содержания PbO (стекла № 5–8) зависимость молярного объема от содержания PbO – линейно возрастающая. Анализ изменения скорости споллировывания происходит неравномерно с увеличением содержания PbO в стекле. Для стекол, лежащих в фазовом поле сложного силиката свинца (стекла № 5–8) скорость

сполировывания более отчетливо зависит от содержания PbO, как и термическое расширение.

Установленная корреляция между термическим расширением стекол и их устойчивостью к механической обработке с одной стороны и составом с другой стороны показывает, что физико-механические свойства стекол подчиняются общим закономерностям. Стеклам, принадлежащим одному фазовому полю и имеющим единую структуру, характерен линейный участок зависимости «физический параметр – технологический параметр». Установленная зависимость позволяет рассматривать физико-химические свойства материала и его технологические характеристики с единой точки зрения.

© Л.Б. Воробьева, 2007

УДК 681.1:006

А.В. Непочатова, В.Я. Черепанов

СГГА, Новосибирск

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕПЛОМЕРОВ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Одним из перспективных путей повышения точности учета тепла, передаваемого системами теплоснабжения потребителю, является использование прямого измерения количества теплоты контактными тепломерами, установленными в теплообменниках, осуществляющих передачу тепла [1, 2]. Такие теплообменники являются измерительными, так как они осуществляют преобразование измеряемого теплового потока, возникающего между средами с разными температурами, в электрический сигнал тепломеров, разделяющих эти среды (рис. 1а).

В зависимости от назначения измерительные теплообменники (ИТ) могут выполнять функции исходных эталонных средств измерения, входящих в состав измерительной установки, реализующей абсолютный метод измерения теплового потока и количества теплоты (погрешность на уровне 0,2 %); рабочих эталонных средств измерения, входящих в состав поверочных установок, осуществляющих поверку теплосчетчиков (погрешность 0,6 %), и рабочих средств измерений – теплосчетчиков (погрешность 1,5–2,0 %).

Главным элементом ИТ, определяющим уровень их точности, являются тепломеры – контактные преобразователи теплового потока типа «дополнительной стенки» [3]. Общие требования к преобразователям теплового потока содержатся в ГОСТ 30619 – 98. Однако теплофизические свойства тепломеров для ИТ и их метрологические характеристики должны удовлетворять специальным дополнительным требованиям, которые определяются назначением теплообменников. Рассмотрению этих требований посвящена данная работа.

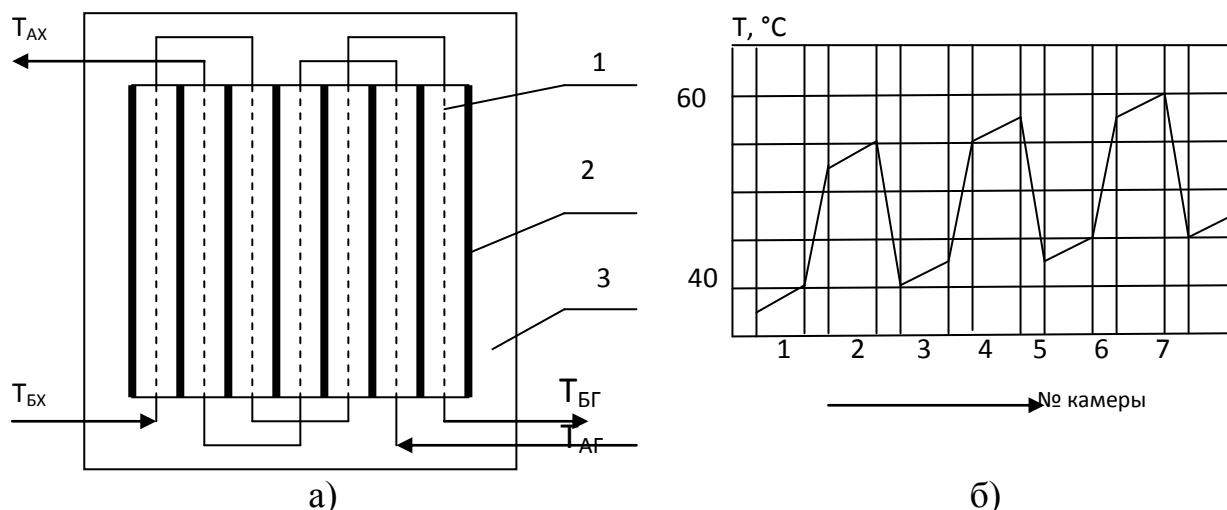


Рис. 1: а) схема измерительного теплообменника (1 – камеры теплообменника, 2 – тепломер, 3 – теплоизоляция; T_{AG} , T_{AH} – температуры на входе и выходе контура А с горячим теплоносителем, T_{BH} , T_{BG} – температуры на входе и выходе контура Б с холодным теплоносителем); б) характер распределения температуры в теплообменнике (1, 3, 5, 7 – камеры с холодным теплоносителем, 2, 4, 6 – камеры с горячим теплоносителем)

Основной метрологической характеристикой тепломеров является погрешность коэффициента преобразования K_q , устанавливающего связь между плотностью q теплового потока, проходящего через тепломер (преобразователь), с его сигналом E :

$$K_q = q / E, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ}). \quad (1)$$

Сигнал тепломера, основанного на термоэлектрическом преобразовании разности ΔT температур, возникающей при прохождении теплового потока, в значение термо- э.д.с. последовательно соединенных дифференциальных термопар, измеряющих эту разность, равен [4]

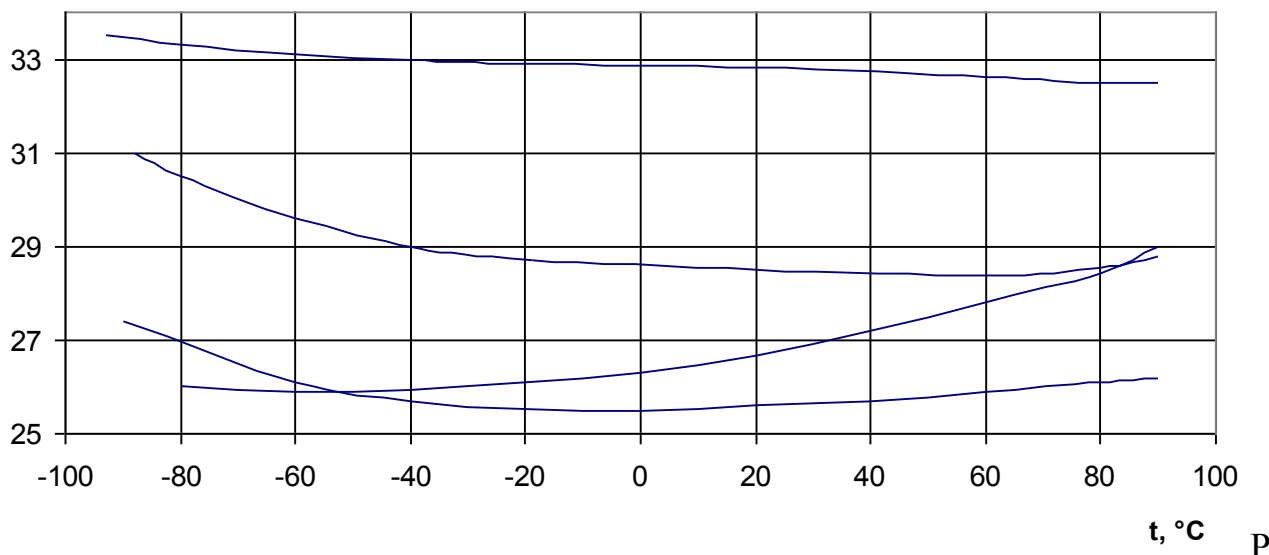
$$E = n \cdot S \cdot \Delta T = (n \cdot S \cdot d \cdot q) / \lambda, \quad (2)$$

где n – число термопар; S – их чувствительность; d – толщина тепломера; λ – его теплопроводность.

К сожалению, некоторые входящие в формулу (2) параметры и свойства тепломера, зависят от его температуры. Это, прежде всего, чувствительность S дифференциальных термопар и теплопроводность тепломера λ , которая зависит от свойств материала, образующего тепловое сопротивление тепломера. Кроме этого имеется зависимость λ от дополнительной тепловой проводимости термоэлектродов термопар, например, у гальванических термоэлектрических тепломеров, разработанных в Институте технической теплофизики НАН Украины и нашедших широкое применение в России.

На рис. 2 приведены типичные кривые температурной зависимости коэффициента преобразования K_q этих тепломеров. Видно, что в диапазоне температур, наиболее используемом в приборах и системах учета тепла, относительное изменение этого коэффициента может достигать 1 % при изменении температуры на 10 °C. Для полупроводниковых термоэлектрических тепломеров эта зависимость достигает 5 % на 10 °C. Отсюда следует вывод, что каждый тепломер в ИТ эталонного назначения должен быть снабжен средством

измерения его температуры, позволяющим проводить правильное установление коэффициента K_q . Кроме этого, перепад температуры в продольном и поперечном направлении гальванических термомеров не должен превышать при этом $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а полупроводниковых – $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Требования к термомерам в составе рабочих средств измерений – теплосчетчиков на порядок менее жесткие (с учетом указанного выше соотношения погрешностей ИТ в составе исходных эталонных и рабочих средств измерений).



ис. 2. Температурная зависимость коэффициента преобразования термомеров: 1 – НИИИТ, 2 – ИТТФ

Характер распределения температуры в ИТ этого назначения представлен на рис. 1б. Само значение перепада ΔT на термомере можно подбирать исходя из измеряемых значений теплового потока путем подбора значений эффективной теплопроводности и толщины слоя материала, образующего термическое сопротивление термомера.

На рис. 3 приведено схематическое изображение конструкции термомеров, которые применялись при экспериментальном исследовании процессов теплопередачи в двух- и трехкамерном теплообменниках [4]. Они выполнены из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм и площадью $0,04\text{ м}^2$ и содержат 20 последовательно соединенных дифференциальных медь-константановых термопар. Достоинством такой конструкции является идентичность свойств и простота изготовления термомеров, недостатком – достаточно высокое термическое сопротивление, которое не позволяет обеспечить большие значения измеряемых тепловых потоков при малых допустимых значениях перепада температур ΔT .

В настоящее время ведутся работы по поиску новых оптимальных конструкций и повышению точности термомеров, которые обеспечат их широкое применение при решении задач теплоснабжения.

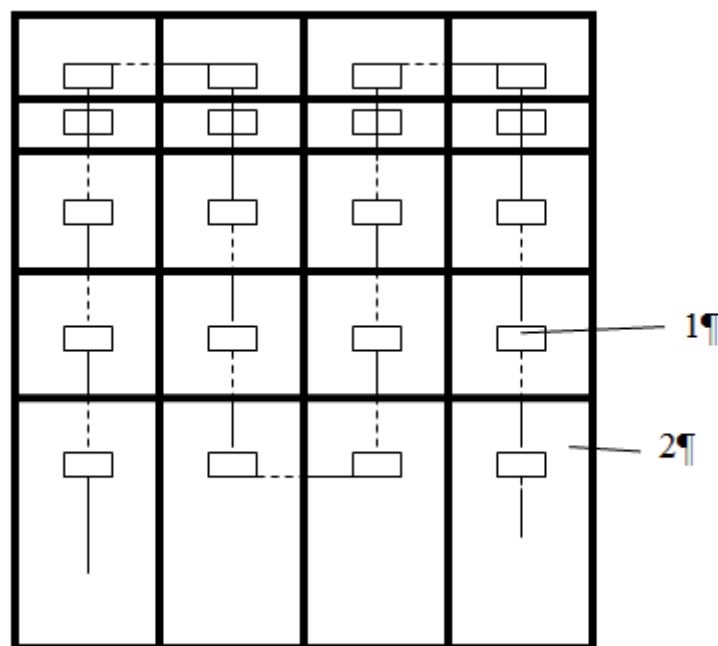


Рис. 3. Схема термоэлектрического 20-ти спайного тепломера:

1 – спай термопар, 2 – контактные площадки из медной фольги

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2152008 Российская Федерация. Устройство для поверки теплосчетчиков / Баталов, С.С., Черепанов, В.Я.; опубл. 2000, Бюл. № 18. – 2 с.
2. Измерительные теплообменники. Вопросы теории и применения / Черепанов, В.Я. // Материалы 4-й Междунар. научно-практ. конф. «Теплосиб – 2005». – Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2005. – С. 72–81.
3. Основы теплотрии / Геращенко, О.А. – Киев: Наукова думка, 1971. – 191 с.
4. Измерительные теплообменники. Вопросы теплопередачи и требования к свойствам тепломеров/ Непочатова, А.В., Черепанов, В.Я. // Материалы 5-й Междунар. научно-практ. конф. «Теплосиб – 2006». – Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2006. – С. 76–83.

© А.В. Непочатова, В.Я. Черепанов, 2007

УДК 536.5

А.Ф. Бродников, В.Я. Черепанов

СГГА, Новосибирск

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ АМПУЛ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ

Важнейшим средством воспроизведения, хранения и передачи температурной шкалы является аппаратура для реализации реперных точек с хорошо известными значениями температур фазовых переходов в чистых веществах [1].

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, обусловленная выделением теплоты, равной теплоте плавления (рис. 1). В данной работе проведена оценка возможности создания миниатюрных ампул для реализации реперных точек (АРТ).

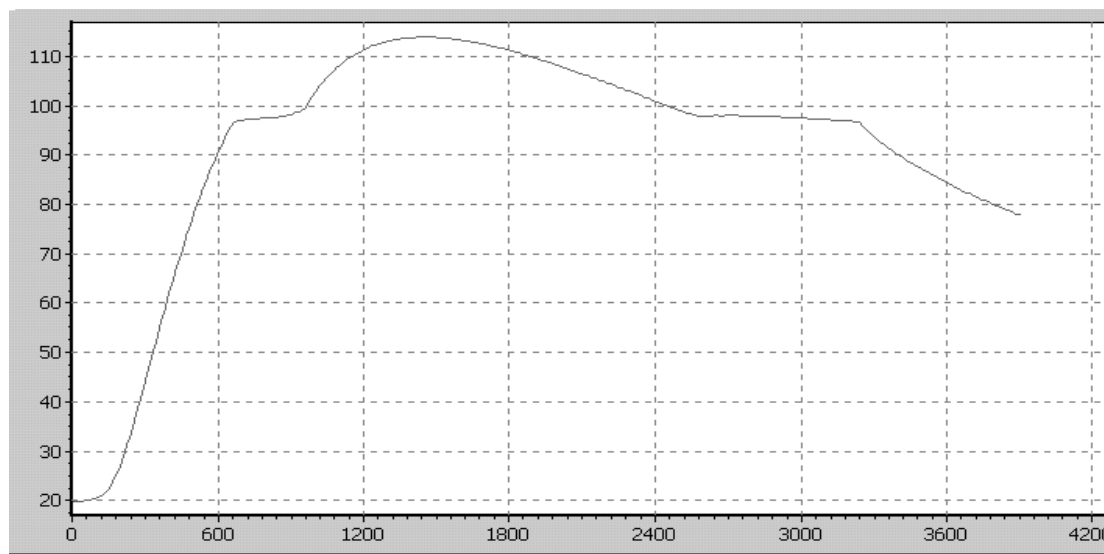


Рис. 1. Кривая зависимости температуры (°C) навески натрия (3,5 г) от времени (с) в области фазовых переходов плавления и затвердевания

Основные свойства реперных точек Международной температурной шкалы МТШ-90 [2], действующей в настоящее время, приведены в табл. 1.

Реперные точки реализуются в ампулах, содержащих чистое вещество. Конструкция ампул, рекомендуемая в приложениях к МТШ-90, приведена на рис. 2. Такая конструкция обеспечивает воспроизведение температурной шкалы с минимальными погрешностями, составляющими менее 0,05 мК ($5 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$) [3].

Таблица 1. Реперные точки МТШ-90

№ п/п	Вещество	Температура, °C	Тип точки	Теплота плавления, кДж/моль	Изобарная теплоемкость, Дж/(моль·K)
1	Ртуть (Hg)	-38,834 4	тройная	2,30	28,0
2	Вода (H ₂ O)	0,010 0	тройная	6,01	37,0
3	Галлий (Ga)	29,764 4	плавления	5,59	26,1
4	Индий (In)	156,5985	затвердевания	3,34	26,9
5	Олово (Sn)	231,928	– // –	7,20	25,8
6	Цинк (Zn)	419,527	– // –	7,20	25,4
7	Алюминий (Al)	660,323	– // –	10,8	24,3
8	Серебро (Ag)	961,78	– // –	11,3	25,3
9	Золото (Au)	1064,18	– // –	12,6	25,4
10	Медь (Cu)	1084,62	– // –	13,0	24,4

Некоторое время назад реализация реперных точек была доступна лишь метрологическим институтам, хранящим государственные первичные и вторичные эталоны. Это было обусловлено необходимостью использования сложной дорогостоящей электронной и электроизмерительной аппаратуры, служащей для задания тепловых режимов ампул и высокоточных измерений электрических сигналов эталонных термометров. По мере совершенствования электронной аппаратуры и развития измерительной техники реперные точки стали использовать уже на уровне образцовых (эталонных) средств измерений 1-ого разряда [4].

Главное преимущество реперных точек при воспроизведении шкалы заключается в том, что они являются наиболее стабильными и естественными физическими генераторами точных значений температурной шкалы. Основные требования к АРТ – чистота веществ, исключение возможности их загрязнения или утечки в процессе эксплуатации, достаточно большая масса для обеспечения необходимой глубины погружения термопреобразователей и уменьшения влияния загрязнений вещества при долговременном контакте с окружающей средой.

В настоящее время наметилась тенденция к дальнейшему внедрению реперных точек в качестве носителей температурной шкалы на более низких звеньях поверочной схемы для средств термометрии. Это обусловлено, с одной стороны, необходимостью повышения точности и стабильности средств проверки, например, термометрических каналов теплосчетчиков [5]. С другой стороны – возможностью использования для этой цели малогабаритных и даже миниатюрных АРТ за счет допустимого снижения точности воспроизведения, а также в связи с появлением миниатюрных эталонных термопреобразователей, например, на основе напыленных чувствительных элементов. Работы по созданию малогабаритных АРТ с массой вещества в несколько сотен граммов превелик положительных результатам [6].

Возможно ли дальнейшее уменьшение размеров АРТ и соответствующее снижение массы навески чистого вещества? Для ответа на этот вопрос целесообразно рассмотреть тепловой процесс нагревания (охлаждения) АРТ. Если навеска вещества имеет объем V , удельную изобарную теплоемкость c_p , плотность ρ , то значение теплового потока Q , необходимого, например, для

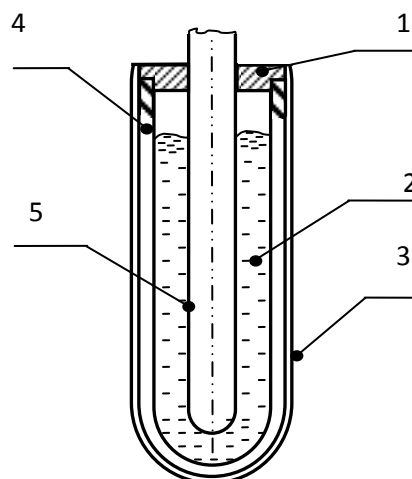


Рис. 2. Конструкция полногабаритной ампулы (АРТ):

- 1 – графитовая крышка, 2 – чистое вещество, 3 – кварцевая колба (50 x 180 мм), 4 – графитовый тигель, 5 – термометрический канал из кварца

нагревания навески вещества со скоростью изменения температуры ν , можно определить по формуле [7]:

$$Q = c_p \rho \nu V \quad (1)$$

При фазовом переходе плавления или затвердевания происходит дополнительное поглощение или выделение теплоты, которое приводит к стабилизации температуры навески вещества на некоторый период времени $\Delta\tau$, равный

$$\Delta\tau = \Delta H / Q, \quad (2)$$

где ΔH – теплота плавления (затвердевания). С учетом связи ΔH с молярной теплотой плавления Δh и удельной теплоемкости c_p с молярной теплоемкостью c_p^m из (2) следует

$$\Delta\tau = \Delta h / c_p^m \nu. \quad (3)$$

Соотношение (3) показывает важную особенность рассматриваемого процесса: независимость продолжительности «площадки» фазового перехода на кривой плавления или затвердевания от массы навески чистого вещества. Поэтому одной из главных задач при создании миниатюрных АРТ – это обеспечить сохранения чистоты малой навески вещества при эксплуатации АРТ. При этом для исключения влияния теплоотвода по термопреобразователю необходимо соблюдать пропорции АРТ, приведенные на рис. 2, в соответствии с теорией подобия. В этом случае масса навески вещества при уменьшении диаметра и высоты графитового тигля в 5 раз может составлять менее $30 \div 50$ г.

Такие АРТ в комплекте с жидкостными и твердотельными термостатами могут применяться в качестве эталонных (образцовых) средств измерения 2-го и 3-го разрядов, а также в схемах прецизионного регулирования температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Температура/ Куинн, Т.; пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 448 с.
2. The International Temperature Scale of 1990 // Metrologia. – 1990. – № 27. – С. 70.
3. Государственные эталоны России: каталог / Вступ. ст. Г.П. Воронина. – М.: Изд-во «Андреевский флаг», 2000. – 184 с.
4. ГОСТ 8.558-93. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры. – Минск: Изд-во стандартов, 1994. – 8 с.
5. Вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах учета количества теплоты/ Черепанов В.Я. // Приборы. – 2002. – № 6. – С. 63-66.
6. Реализация реперных точек температурной шкалы в малогабаритных ампулах/ Шевелев Ю.В., Черепанов В.Я. // Измерительная техника. – 2004. – № 2. – С. 39-42.
7. Температурные измерения: справочник / Геращенко, О.А. и др. – Киев: Наукова думка, 1989. – 704 с.

© А.Ф. Бродников, В.Я. Черепанов, 2007

ВНЕДРЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА «О ТЕХНИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ» В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

В настоящее время остро стоит вопрос гармонизации отечественных правил по метрологии, стандартизации и сертификации с международными, поскольку это сдерживает вступление России во Всемирную торговую организацию (ВТО), а значит и дальнейшее развитие страны. Понимая это, ведущие специалисты страны в этой области технического регулирования неоднократно ставили проблемы и методы решения законодательного технического регулирования с целью обеспечения качества и безопасности товаров и услуг для устранения технических барьеров в торговле при вступлении России в ВТО [1].

Как видно из рис. 1 основной целью деятельности по метрологии, стандартизации и оценки соответствия (сертификации) является обеспечение качества и безопасности товаров и услуг.



Рис. 1. Обеспечение качества и безопасности товаров и услуг в техническом регулировании

Введённый в действие 1 июля 2003 года Федеральный закон «О техническом регулировании» (далее-ФЗ) кардинально решает сегодня подходы к стандартизации и оценке соответствия. Интенсивно осуществляется работа по приведению в соответствие с ФЗ законодательной нормативно-правовой базы технического регулирования (ТР) в соответствии с планами мероприятий «Агентства по техническому регулированию и метрологии» созданного в 2003 г.

Цели и задачи закона. Цель ФЗ – создать гармонизированное техническое законодательство, т.е. совокупность правовых норм, регламентирующих

требования к техническим объектам: продукции, процессам её жизненного цикла, работам (услугам), контролю (надзору) за соблюдением требований и принципов технического регулирования, установленных в Соглашениях: по техническим барьерам в торговле, по применению санитарных и фитосанитарных мер, в Кодексе добровольной практики. Это является основными условиями вступления России в ВТО.

Техническое регулирование осуществляется в соответствии с принципами:

- Применения единых правил установления требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки. Реализации и утилизации, выполнению работ или оказания услуг;
- Соответствия технического регулирования уровню развития национальной экономики, развития материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития;
- Независимости органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей;
- Единой системы и правил аккредитации;
- Единства правил и методов исследований (испытаний) и измерений единства применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок;
- Недопустимости ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации;
- Недопустимости совмещения полномочий органа государственного контроля и органа по сертификации;
- Недопустимости совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и сертификацию;
- Недопустимости внебюджетного финансирования государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов [2].

На разработку новых правил и процедур, введение новых нормативных документов в связи с отменой «Закона о стандартизации» и закона «О сертификации» Правительством отведено семь лет с момента введения ФЗ. В настоящее время «Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии» (Госстандарт России) решают ряд крупных организационных и методических вопросов по созданию национальных органов по стандартизации и сертификации (оценки соответствия) для гармонизации их с международными требованиями и практикой. Интенсивно ведётся работа по приведению в соответствие нормативно-правовой базы технического регулирования. Законом предусмотрено, что технические регламенты будут содержать формы и схемы обязательного подтверждения соответствия продукции, услуг, существенным требованиям этих регламентов. Основным критерием для принятия решения по выбору форм и схем обязательного подтверждения соответствия является степень риска не достижения установленных в регламенте целей, при анализе риска для окружающей среды, здоровья и имущества граждан, при исследовании продукции, оказании услуг.

Проблем по внедрению ФЗ при разработке технических регламентов, переработке и гармонизации национальных стандартов, контролирующих

органов возникает очень много. Предстоит масштабная работа по подготовке и переподготовке специалистов во всех областях и на всех уровнях технического регулирования, разработке новых учебных программ и пособий, подготовке преподавателей. Необходимы специальные семинары и конференции особенно региональные, где специалисты в области стандартизации и сертификации имеют смутные представления о Законе его целях и задачах. В Государственном образовательном стандарте (ГОС) высшего профессионального образования по подготовке специалистов нет даже упоминания о ФЗ, хотя он уже действует три года.

В СГГА на кафедре этот недостаток учтён и уже в течение двух лет курс «Стандартизация, сертификация и метрология» дополнен изучением ФЗ, проведён региональный семинар при переподготовке специалистов в геодезии и картографии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев Л.К. Обеспечение качества: стандартизация, единство измерений, оценка соответствия / Л.К. Исаев, В.Д. Малинский. – М.:ИПК Издательство стандартов, 2001.
2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

© В.Д. Лизунов, Л.Г. Куликова, 2007

УДК 528.854

Г.В. Симонова, Е.П. Хлебникова

СГГА, Новосибирск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОНОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Основными признаками различных объектов, которые могут изучаться дистанционно, являются их спектральные отражательные свойства, выраженные через спектральные коэффициенты яркости и спектральные коэффициенты отражения.

Традиционно к дистанционным методам относят получение информации с использованием аппаратуры, установленной на борту аэро- и космических аппаратов.

Использование данных космических снимков позволяет осуществлять картографирование и оценку экологического состояния территории, контролировать деятельность природопользователей, а также соблюдение режима водоохранных зон и особо охраняемых территорий. По разновременным космическим снимкам можно отследить изменение техногенной нагрузки в разные периоды времени, появление новых нефтяных загрязнений, осуществить мониторинг водных объектов – динамики гидрологического режима водоёма.

Различные отражательные свойства исследуемого объекта и состояние окружающей среды влияют на характеристики излучения и фиксируются приборами дистанционного зондирования.

На протяжении последних сорока лет развивается многозональный метод дистанционного зондирования (метод идентификации природных объектов и явлений). На этом методе основан ряд систем мониторинга.

Многозональная съемка основана на разделении всего спектрального диапазона на зоны, в которых получают изображение. Вместо одного снимка получают несколько, каждый содержит изображение заданного спектрального диапазона, что облегчает анализ и интерпретацию изображения.

Многоспектральные сканеры формируют изображения в нескольких узких зонах спектра и, таким образом, позволяют определить спектральные характеристики объектов на поверхности Земли и дать информацию для дискретного спектрального анализа с целью распознавания, т. е. распознавание объектов.

Под дешифрированием понимают теорию и способы получения информации о внешних и внутренних элементах местности по их изображению; установление их количественных и качественных характеристик; обозначение распознанных объектов условными знаками, принятых для топографических и специализированных (тематических) карт.

В основу автоматизированного дешифрирования положены методы классификации, основанные на теории распознавания образов, и методы расслоения.

Задача автоматической классификации в общем виде сводится к отысканию некоторой функции, отображающей все многообразие распознаваемых объектов в виде множества, элементами которого являются классы образов.

Для всех разновидностей машинных способов дешифрирования характерны очень жесткие требования к отбору признаков. Выбор оптимального набора признаков, т.е. создание эталона – первоочередная проблема, связанная с распознаванием образов.

Для осуществления дешифрирования в цифровых системах необходимо выделить дешифровочные признаки объекта на изображении и представить их численно.

Одним из наиболее удобных и легко получаемых эталонов признаков при дешифрировании в цифровых системах является численно выраженное значение тона для каждого элемента изображения.

Характерной особенностью дистанционных методов регистрации изображений является наличие значительного влияния помех на полезный сигнал: физические и оптические характеристики атмосферы, геометрическое положение объекта на земной поверхности по отношению к космическому аппарату, активность Солнца и ее влияние на атмосферу и др.

Существующие методы атмосферной коррекции спутниковой информации основаны на решении прямых и обратных задач атмосферной оптики, в которых используются, как правило, математические модели переноса излучения,

использующие данные наземных измерений параметров атмосферы на момент съёмки.

Однако данные методы позволяют выполнять именно коррекцию воздействий различных параметров, но не устранять их влияние полностью. Следовательно, сформированный на таком изображении эталон относится не только объекту для одного конкретного снимка.

Таким образом, для получения достоверной количественной характеристики параметра, выбранного как эталон признаков объекта, необходима измерительная система, однозначно регистрирующая данную величину, и методика измерений, гарантирующая, что измеряется заданный параметр.

Поэтому, если нет дополнительной, правильно выбранной методики обработки результатов измерений, то невозможно говорить не только о количественной характеристике выбранного параметра, но и о характере его изменения, а выводы могут иметь только качественный оценочный характер.

Для получения основания количественной оценки признака, т. е. его измерения, необходимо разработать и провести калибровку соответствующей измерительной системы, что означает установление количественного соответствия и его однозначности во всем диапазоне результатов с помощью принятого за эталон объекта или условия.

В настоящее время при дешифрировании цифровых изображений отсутствует однозначно определенная количественная связь между признаками объекта и регистрируемыми параметрами.

Проведенный анализ показывает, что, несмотря на большое количество разработанных и используемых методик формирования эталонов при автоматизации дешифрирования снимков существует ряд нерешенных проблем:

- Отсутствие объективного набора признаков объекта;
- Отсутствие однозначной количественной связи между параметрами объекта и регистрируемыми характеристиками;
- Присутствие многочисленных дополнительных составляющих, не относящихся к дешифрируемому объекту;
- Невозможность использования заранее созданных эталонов для оперативного дешифрирования многозональных снимков;
- Ограничения в использовании разновременной информации;
- Существенная роль оператора.

Сложившуюся ситуацию можно изменить, создавая эталоны признаков на основе относительных характеристик.

Известно, освещенность на приемнике связана с яркостью исходного объекта следующим соотношением:

$$E_{np_i} = \frac{L_{об_i} \cdot S_{об_i} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{H_{\phi}^2} \cdot \tau_{атм}, \quad (1)$$

где $L_{об_i}$ – яркость объекта;

$S_{об_i}$ – площадь объекта;

H_{ϕ} – расстояние от объекта до регистрирующей системы;

$\tau_{атм}$ – коэффициент пропускания атмосферы;

α_1 – угол между нормалью к поверхности объекта и направлением съемки;

α_2 – угол между нормалью к площадке регистрирующего устройства и направлением съемки.

Таким образом, яркость объекта и яркость его изображения связаны довольно сложным соотношением:[1]

$$L_{изоб_i} = f_{у.с.} \cdot \frac{L_{об_i} \cdot S_{об_i} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{H_{\phi}^2} \cdot \tau_{атм}, \quad (2)$$

и абсолютные величины яркостей изображения не могут являться основанием для достоверной идентификации объектов.

Если изображение получено в одном спектральном диапазоне, то для данного снимка большинство параметров в формуле (2) будет одинаково. В этом случае отношение яркостей изображений объектов будет равно отношению яркостей самих объектов:

$$\frac{L_{изоб_i}}{L_{изоб_j}} = \frac{L_{об_i}}{L_{об_j}} = K_{ij}, \quad (3)$$

где $L_{об_j}, L_{изоб_j}$ – яркость некоторого «опорного» объекта и его изображения на снимке соответственно;

K_{ij} – нормированное значение яркости изображения объекта.

Вычисляя K_{ij} , можно сформировать новые изображения, значение яркости каждого элемента которых $p_{ij} = K_{ij}$ зависит только от свойств объекта. В результате преобразования формируется m изображений, где m – количество съемочных каналов.

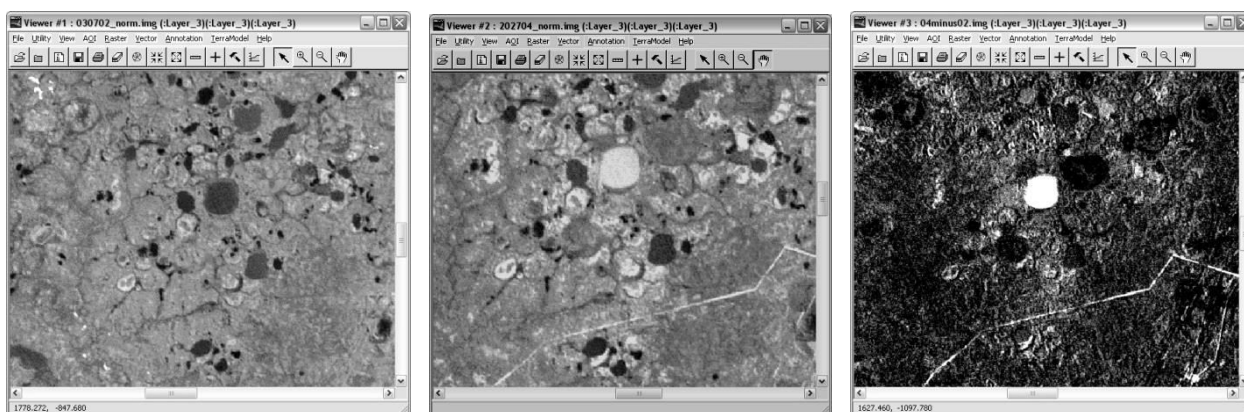
Предложенное нормирование яркостей отличается от традиционного тем, что в данном случае K_{ij} – это отношение яркостей разных объектов (искомого и опорного) для одного и того же спектрального канала, а обычно нормируются яркости изображения одного и того же объекта в разных каналах. [2]

Таким образом, при дешифрировании цифрового изображения становится возможным исключить влияние параметров, не связанных с объектом. Для этого все яркости изображения необходимо поделить на яркость изображения какого-либо "опорного" объекта, выбранного на этом же снимке, т.е. выполнить нормирование яркостей.

Возможность выявления изменения объектов на основе формирования разностных изображений была исследована на тестовом участке по снимкам со спутниковой системы Метеор на территорию Харвутинской площади Ямбургского месторождения.

На рис. 1 представлен пример практической реализации применения разностных снимков, показывающий изменение состояния озера и появление дороги за период времени с 2002 по 2004 год. Полученные результаты

подтверждаются картографическими материалами и данными полевого дешифрирования.



а) снимок от 03.07.02

б) снимок от 20.07.04

в) разностное изображение

Рис. 1

Представленная методика позволяет определить не только сам факт наличия изменений, произошедших за исследуемый промежуток времени, но и оценить их количественную величину. Такая возможность появляется за счет использования, сформированных из численных значений изменения яркостей нормированных изображений различных объектов на разные даты.

Данный метод обработки разновременных многозональных космических снимков позволяет повысить информативность как визуального, так и автоматизированного дешифрирования, может использоваться для изучения динамики любых объектов, в том числе сезонных быстротекущих процессов, при экологическом мониторинге территорий, изучении гидрологических процессов, для лесоустроительных и природоохранных мероприятий.[3]

Следует отметить, что использование эталонов признаков на основе нормированных значений яркости позволит увеличить достоверность результатов при любых способах дешифрирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нормирование яркости при обработке результатов оптических измерений / Симонова Г.В., Хлебникова Е.П. // Вест. Сиб. гос. геодез. акад. / СГГА. – 2005. – Вып.10. – С. 166–167.
2. Влияние нормирования яркости на достоверность дешифрирования многозональных космических снимков / Хлебникова Е.П. // Геодезия и картография. – 2005. – №12. – С. 24–28.
3. Определение динамики изменения природных объектов по многозональным космическим снимкам / Хлебникова Е.П. // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 3. Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия. Ч. 1: сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2006», 24-28 апр. 2006г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2005. – С.227–232.

© Г.В. Симонова, Е.П. Хлебникова, 2007

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ ПО ЕЕ СВЕТОПРОПУСКАНИЮ

Высокое и стабильное качество керамических изоляторов в значительной мере обеспечивается использованием объективных методов контроля изделий, в том числе неразрушающих методов. Это особенно важно при производстве вакуумноплотной алюмооксидной керамики [1], подлежащей спаиванию с металлами, так как для получения надежного соединения необходима не только вакуумная плотность керамической детали, но и определенная структура материала. Принятая система контроля в керамическом производстве предусматривает визуальную проверку изделий после их обработки в растворах красителей, выборочное определение объемной массы и водопоглощения, а также микроструктурный анализ. Подобная система контроля не гарантирует надежной оценки качества изготавливаемых керамических изделий. Перспективными являются неразрушающие методы контроля качества изделий, особенно радиотехнические и оптические.

Сложный комплекс показателей, характеризующий качество вакуумноплотной алюмооксидной керамики, многообразие конструкций изделий при сравнительно небольших их размерах определяют высокие требования к методам неразрушающего контроля керамических изделий:

- Регистрируемый показатель качества должен иметь существенную связь с основными параметрами структуры материала;
- Метод должен обладать высокой чувствительностью к изменениям структуры изделий;
- Должна быть обеспечена возможность контроля изделий разнообразной конструкции, автоматизация и механизация процесса контроля;
- Эксплуатация средств контроля должна быть несложной и исключать вредные условия труда.

Наибольший интерес для оценки качества спеченного керамического изделия представляет неразрушающий контроль, основанный на взаимосвязи светопропускания керамики с ее структурой [2].

Керамика как оптическая среда относится к средам, для которых характерно многократное рассеяние света на оптических неоднородностях – кристаллах, порах, участках стеклофазы, включениях.

Кроме рассеяния в этих случаях ослабляющим фактором являются отражение и поглощение света.

Методика и результаты эксперимента

Экспериментальные исследования светопропускания и отражения лучистого потока керамики проводились на оптической установке, в комплект которой использовались инфракрасный микроскоп МИК-4, фотометр ФМ-58, микрофотометр МФ-4, интерференционные светофильтры и несколько наборов

спектрографических фотопластинок. Керамические образцы из керамики ВК95-1 (ВГ-IV) [1] представляли собой диски диаметром 30 мм и толщиной 3 мм. Спекание образцов проводилось в два этапа:

- Предварительный обжиг (удаление термопластичной связки) при температуре 1 350 °С на воздухе;
- Окончательный обжиг – в среде влажного водорода (точка росы +20 °С) при температурах 1 640, 1 660, 1 680, 1 670, 1 720 °С.

С помощью микроскопа осуществлялась визуальная оценка и фотографирование в проходящем и отраженном свете.

Для определения интенсивности света, прошедшего через образец керамики от источника – лампы накаливания типа КИМ-12-100, использовалась известная из техники спектроскопии зависимость

$$S = \gamma \lg J, \quad (1)$$

где S – почернение пластинки; γ – коэффициент ее контрастности.

Измерив с помощью МФ-4 почернение фотопластинки и зная ее контрастность, определяли

$$\lg J = \frac{S}{\gamma} \quad (2)$$

J_0 определяется аналогично J (в этом случае образец отсутствует).

Результаты измерений и расчетов светопропускания образцов керамики от используемой длины волны света и температуры обжига показали:

- Процесс спекания керамики продолжается до температуры обжига 1 700 °С; при этом происходит увеличение числа рассеивающих частиц по экспоненте в интервале 1 640–1 700 °С с одновременным уменьшением размера рассеивающих частиц с 5 мкм до 2,5 мкм;

- В интервале 1 700–1 720 °С наблюдается уплотнение рассеивающих частиц с образованием скин-слоя порядка 2λ , что свидетельствует о стабилизации плотности керамического материала.

Подтверждение результатов по светопропусканию получено из анализа оптических характеристик светорассеяния при отражении светового луча от поверхности этих керамических образцов. Измерения проводились на фотометре ФМ-58.

Коэффициент отражения определяется из зависимости

$$R = rR_{\text{пл}}, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения образца; r – отношение коэффициента яркости образца к коэффициенту яркости баритовой пластинки; $R_{\text{пл}}$ – коэффициент отражения баритовой пластинки ($R_{\text{пл}} = 0,84$).

Таким образом, измерение коэффициента отражения на приборе ФМ-58 сводится к измерению коэффициента яркости. Результаты измерения спектральной отражательной способности керамических образцов масс при спекании свидетельствуют:

- В интервале температур 1 640–1 660 и 1 680–1 700 °С происходит уменьшение отражательной способности, что свидетельствует о сильной

неоднородности поверхности в связи с увеличением числа рассеивающих частиц и общим уменьшением показателя преломления этих частиц;

- В интервале температур 1 660–1 680 наблюдается увеличение отражательной способности в связи с образованием скин-слоя порядка λ и увеличением показателя преломления возникшего скин-слоя;

- В интервале 1 700–1 720 °С и далее отражательная способность постоянная для керамической поверхности (соответственно показатель преломления также постоянен).

Реализация контроля керамических изделий

Теоретический анализ и экспериментальные результаты по взаимодействию оптического излучения алюмооксидной керамики свидетельствуют о реальной возможности использования оптического контроля для оценки качества керамических изделий.

В настоящее время имеются мощные малогабаритные долговечные источники света и высокочувствительные приемники излучения, что обеспечивает хорошую основу для создания средств контроля с высокой разрешающей способностью.

Авторы [3] использовали оптический метод неразрушающего контроля для оценки качества вакуумноплотных керамических изоляторов.

Светопропускание керамических деталей определялось с помощью измерительных схем, в которых источником излучения являлась лампа накаливания типа КИМ-12-100. В качестве приемника излучения использовался фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-58 с электрометрическим усилителем У1-7. Источники питания лампы накаливания и ФЭУ были стабилизированными, это обеспечивало постоянство интенсивности падающего светового потока. Количественная оценка светопропускания образцов осуществлялась по величине фототока, пропорционального интенсивности проходящего светового потока.

При прочих равных условиях наибольшее светопропускание керамики фиксируется при использовании составного фильтра типа ЖС, кривая пропускания которого охватывает практически весь световой диапазон. С целью упрощения методики контроля в дальнейшем использовался сплошной спектр видимого излучения.

В начале была исследована взаимосвязь светопропускания со свойствами керамики и параметрами, характеризующими ее структуру.

Следует отметить ряд особенностей изменения показателей спеченности керамики ВК95-1 (ВГ-IV) в зависимости от температуры обжига изделий и их связь со светопропусканием (рис. 1).

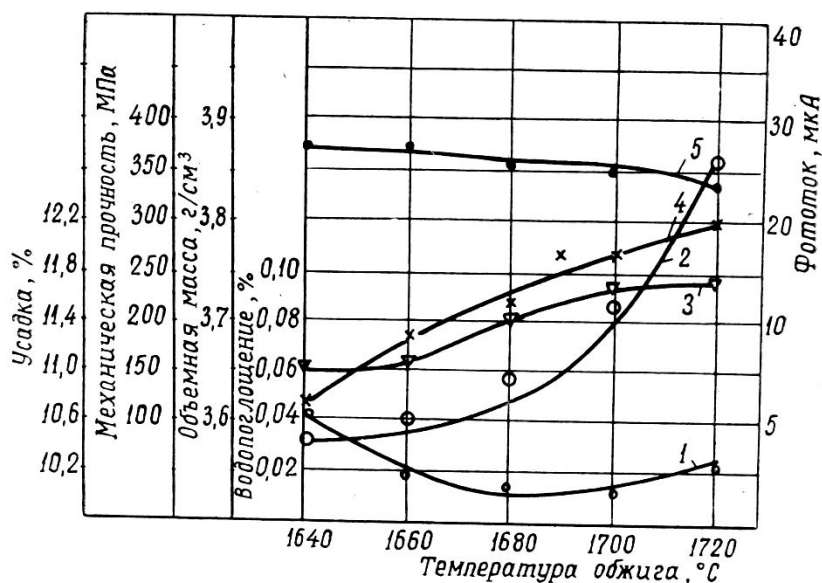


Рис. 1. Зависимость показателей спеченности и светопропускания керамики ВК95-1 от температуры обжига:

1 – водопоглощение; 2 – фототок; 3 – усадка; 4 – объемная масса; 5 – механическая прочность

– С повышением температуры обжига от 1 640 до 1 720 °C происходит постепенное увеличение объемной массы, усадки и светопропускания материала, что указывает на непрерывно протекающие процессы уплотнения изделий; наибольшего значения (3,75–3,80 г/см³) объемная масса достигает при температурах обжига 1 700–1 720 °C;

– Керамика достигает вакуумноплотного состояния (водопоглощение близкое к нулю) при температурах обжига 1 660–1 700 °C, при дальнейшем повышении температуры обжига (до 1 720 °C) наблюдается некоторое увеличение водопоглощения образцов;

– Максимальное значение механической прочности достигается при температуре обжига образцов 1 640–1 680 °C, при дальнейшем увеличении температуры предел прочности несколько уменьшается.

Аномальные изменения рассматриваемых свойств керамики ВК95-1 происходят потому, что с поверхности изделий, омываемой газовой средой, при высоких температурах (1 700 °C) улетучиваются SiO₂ и MgO. Это приводит к образованию рыхлой, неоднородной, дефектной структуры поверхностного слоя керамики. При этих же температурах наблюдается интенсивный рост кристаллов корунда.

Такое поверхностное состояние керамики соответствует ее отражательной способности. Светопропускание очень чувствительно к изменениям структуры материала при увеличении температуры обжига, так как при этом происходит уменьшение микропористости и рост кристаллов корунда.

Содержание стеклофазы в изделиях при увеличении температуры обжига до 1 680–1 700 °C возрастает, а при более высоких температурах уменьшается за

счет ее рекристаллизации. Прослеживается прямая связь светопропускания с величиной кристаллов корунда и обратная связь с микропористостью (рис. 2).

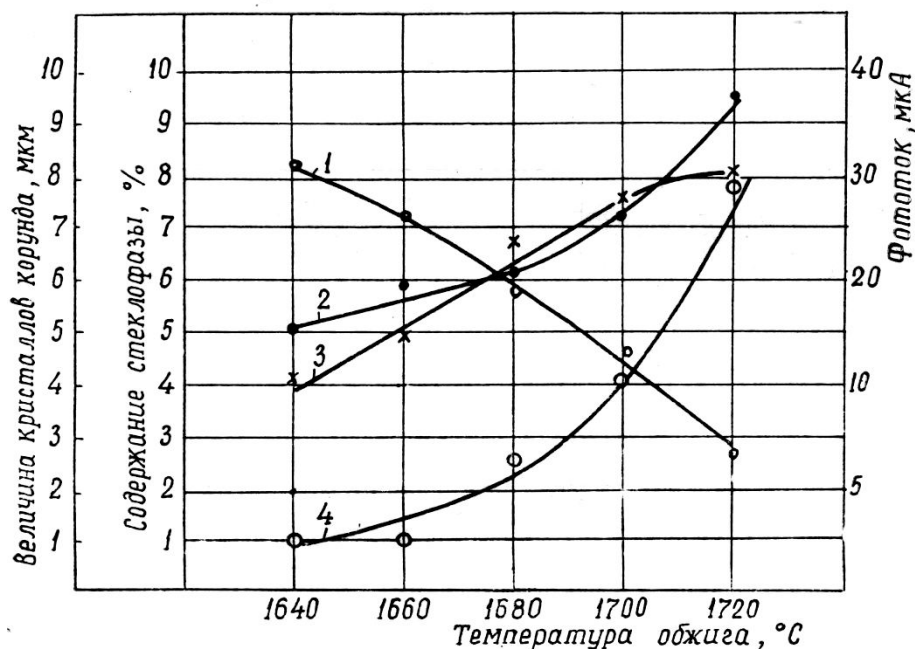


Рис. 2. Зависимость параметров структуры и светопропускания керамики ВК95-1 от температуры обжига:

1 – микропористость; 2 – величина кристаллов корунда; 3 – содержание стекло фазы; 4 – фототок

Светопропускание керамики зависит от неоднородностей материала, начиная от зернистости, легко наблюдаемой в оптическом микроскопе, и кончая субмикронеоднородностями (внутрикристаллическая пористость, микротрещины и т. д.). Сложный характер изменения параметров, характеризующих структуру керамики в зависимости от температуры обжига изделий, затрудняет установление строгого соотношения, отражающего связь этих параметров со светопропусканием. Однако, четко установленная корреляция светопропускания керамики с параметрами ее структуры позволяет установить браковочные показатели качества материала и организовать неразрушающий 100 %-ный контроль изделий.

Таким образом, светопропускание керамических изделий можно рассматривать как комплексную характеристику керамики, которая отражает степень ее спеченности и особенности структуры.

Важным преимуществом рассматриваемого метода является возможность создания на его основе, как простых измерительных средств, так и автоматических приборов для контроля изделий.

Градуировка прибора и выбор критериев оценки изоляторов должны выполняться с учетом результатов микроскопического анализа, исходя из следующих требований по структуре керамики ВК95-1: микропористость не должна превышать 6 %, величина кристаллов должна быть не менее 5,5 мкм, а содержание стеклофазы должно находиться в пределах от 4 до 9 %. Путем сравнения значений силы фототока, зарегистрированных для контролируемого

и эталонного изоляторов, осуществляется разбраковка изделий с толщиной от 1 до 10 мм и диаметром 10–150 мм. Использование данного метода контроля обеспечивает получение керамических деталей, дающих надежные герметичные вакуумноплотные спаи с металлом.

Заключение

Важным «достоинством» оптического метода является: количественная оценка результатов контроля, объективность, возможность контроля изделий сложной формы, достаточно высокая производительность. Отсутствие специальных требований к условиям труда обеспечивает его применение в условиях серийного производства и надежность отбора изделий с однородной структурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Термостойкие материалы / Бердов Г.И., Рубашев М.А., Гаврилов В.Н. и др. – М.: Атомиздат, 1980.
2. А. с. 337855, кл. НО 17/00 СССР. Способ контроля качества керамики / Росинский В.А., Клепикова Н.Г. – Бюл. 1972, № 15.
3. Неразрушающий оптический контроль качества керамических изделий / Бердов Г.И., Плетнев П.М., Киселев А.М. и др. // Стекло и керамика. – 1988. – № 8. – С. 17–18.

© П.М. Плетнев, В.И. Рогов, С.А. Степанова, 2007

УДК 550.831:006

В.А. Войтенко

ФГУП ПО «Инжгеодезия», Новосибирск

Р.Э. Миникес

СГГА, Новосибирск

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГРАВИМЕТРОВ

Основные положения метрологического обеспечения гравиметрических съемок в системе бывшего Министерства Геологии, ныне Министерство природных ресурсов (МПР), были разработаны в 50-70-х годах прошлого века. Они соответствовали техническому уровню гравиметрических измерений того времени и до сих пор остались практически на том же уровне, хотя с тех пор существенно повышена инструментальная точность гравиметров, появились новые технические средства для метрологических исследований (наклономерные установки) и разработана методика эталонирования высокоточных гравиметров [1, 2]. Особенно актуальной стала проблема метрологического обеспечения в последние годы в связи со значительным (на порядок) повышением инструментальной точности гравиметров.

Уже с конца 70-х годов точность эталонирования на полигонах перестала соответствовать инструментальной точности гравиметров. Тогда же появились и переданы в производственные подразделения высокоточные наклономерные установки для определения цены деления [1]. Однако, несмотря на непригодность эталонных полигонов для точных определений цены деления [3,

4], они до сих пор используются в гравиметрических подразделениях МПР, что до сих пор узаконено ГОСТом [5].

Причины несоответствия метрологического обеспечения гравиметров современным требованиям, в основном, субъективного характера. Привычка использовать эталонные полигоны для определения цены деления гравиметров, выработанная в организациях МинГео в результате многолетней практики, плюс предпочтение, до сих пор отдаваемое этому методу в руководящих технических материалах МПР, сформировали стойкое предубеждение против метода наклона.

Основные причины, по которым эталонные полигоны непригодны для точных определений цен делений гравиметров следующие.

1. На них невозможно обеспечить необходимый технологический (по температуре) режим эталонирования, то есть невозможно обеспечить постоянную температуру приборов (как того требует ГОСТ) в течение всего периода эталонировочных рейсов.

2. На них невозможно определить нелинейность цены деления.

3. В измеряемых значениях приращений силы тяжести между пунктами полигона, присутствует псевдогравитационная составляющая, которую невозможно отделить от гравитационного сигнала. Она может значительно (на порядок и даже более) превышать инструментальную погрешность гравиметра. Эта составляющая никакого отношения к гравитации не имеет, она вызвана воздействием эндогенных микросейсмических волн (ЭМС-волн) [6] на чувствительную систему гравиметра в момент измерения. Ее величина зависит от места измерения, изменяется с течением времени, хотя и очень медленно, что обусловлено природой ЭМС-волн, а также зависит от индивидуальных качеств чувствительной системы гравиметра. В работе [7] приведены данные о результатах измерений над заброшенной штольней (глубина 28 м) разными типами статических гравиметров. В результатах гравиметрических определений, выполненных в ПО «Инженерная геодезия» абсолютными гравиметрами ГАБЛ и статическими гравиметрами ГНУ – КВ и ГНУ – КВ2 расхождение между измеренными статическими гравиметрами приращениями силы тяжести и вычисленными по результатам измерений ГАБЛ достигали 0,2 мГал. Чисто гравитационный сигнал от штольни был менее 5 мкГал ($5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$). Гравиметр ГВТ показал над штольней аномалию $\sigma = -60$ мкГал, а менее чувствительный гравиметр «Уорден» – аномалию $\sigma = -130$ мкГал. Если эталонные значения разностей силы тяжести определены статическими гравиметрами, то в них также присутствует псевдогравитационная составляющая, существовавшая на момент определений эталонных значений. Есть предположение, что сейсмические волны воздействуют даже на результаты измерений абсолютными баллистическими гравиметрами [8].

Именно поэтому погрешности определения цен делений гравиметров на полигонах зачастую на порядок (!) превышают допустимые ГОСТом [5]. По признанию специалистов ВНИИГеофизики «у двух третей гравиметров наблюдается относительное расхождение между значениями цены деления, определенными наклоном и на полигоне, превышающее $1 \cdot 10^{-3}$, при объеме

выборки порядка 500 гравиметров» [9]. (По ГОСТу допустимое расхождение составляет $3 \cdot 10^{-4}$).

На рис. 1 показаны результаты определения цен делений гравиметров ГНУ-КВ на полигоне и на наклонномерной установке УЭГП. Разбросы между значениями цен делений, определенных в разные годы на полигоне, более чем в 10 раз превышают разбросы значений, определенных на УЭГП.

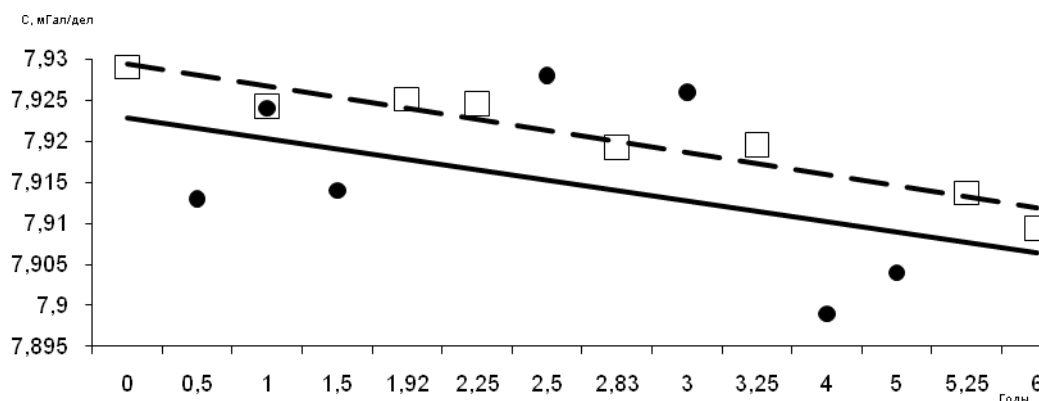


Рис.1. Изменение цен делений гравиметров ГНУ-КВ по определениям: ● — на полигоне
□ — на УЭГП

Рис. 1. Изменение цен делений ГНУ-КВ по определениям:

● — на полигоне; □ на УЭГП

Чем объяснить, что в организациях МПР эталонированию гравиметров не уделяется должного внимания? Возможно, что высокая точность эталонирования не считается условием высокой точности гравиметрических измерений? Даже в нормативно-технических материалах по гравиметрическим измерениям, к сожалению, не уделено должного внимания вопросам метрологического обеспечения. В Инструкции по гравirazведке [10] отсутствуют не только рекомендации по определению цен делений гравиметров, но даже технические требования к точности определения цен делений. Есть только ссылка на ГОСТ 13017-83 [5]. В качестве практического руководства используются «Методические указания по методике поверки наземных гравиметров» [11]. Справедливости ради следует отметить, что и в ГОСТе, и в «Методических указаниях» метод эталонирования наклоном заявлен вроде бы, как равноправный, однако инструкции по эталонированию на полигоне расписаны очень подробно (в ГОСТе на 7 страницах), в то время, как метод эталонирования на наклонномерных установках — очень кратко (в ГОСТе мелким шрифтом на 1,5 страницах в приложении).

На практике точность, регламентированная ГОСТом, как правило, не выдерживается. Допуски для точности эталонирования принимаются исходя из точности предстоящей съемки, а не по классу прибора, как требуется по ГОСТ.

Такой подход еще можно было понять при проведении площадных съемок масштабов 1:1 000 000–1:100 000, и, даже, с некоторой натяжкой, 1:50 000. Но для высокоточных измерений он категорически не приемлем.

Такое отношение к метрологическому обеспечению, узаконенное нормативно-техническими материалами, не могло не отразиться в практике подготовки гравиметров к съемкам.

В практической работе гравиметрических подразделений МПР налицо пренебрежительное отношение к точности эталонирования гравиметров. Отсутствует контроль и приемка результатов эталонирования гравиметров. В экспедициях нет отделов технического контроля. Работники гравиметрических подразделений сами исследуют гравиметры, сами у себя принимают работу. Все вопросы качества решает начальник гравиметрической партии. В лучшем случае главный инженер экспедиции. При этом полностью игнорируются требования ГОСТ оценивать результаты исследования гравиметров по классам приборов независимо от точности съемки, для которой предназначаются гравиметры. При этом начальник партии сам решает, соответствуют ли гравиметры точности предстоящих работ. Нетрудно догадаться, какое решение примет начальник партии. Если результаты эталонирования на полигоне расходятся с результатами эталонирования методом наклона, принимаются полигонные.

Все перечисленные недостатки метрологического обеспечения гравиметров отсутствуют в работе гравиметрических подразделений Роскартографии. Для определения цен делений гравиметров используются наклономерные установки. Полигонные испытания проводятся только для определения точности измерений. «Цель эталонирования на базисе – контроль работы гравиметров в полевых условиях» [2]. Результаты метрологических исследований обязательно принимаются (или не принимаются) отделом технического контроля в точном соответствии с нормативно-техническими документами, утвержденными в установленном порядке метрологическими службами.

Такое различие в подходах к выполнению измерений подразделениями МПР и Роскартографии объясняется, на наш взгляд, той ролью, которую играют эти подразделения в народном хозяйстве страны. Главной задачей геодезических служб является производство измерений с необходимой точностью, главной задачей геолого-геофизических организаций является геологическая и инженерно-геологическая интерпретация полученных результатов измерений. И эти службы успешно выполняют свои задачи. Каждая – свою.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эталонирование гравиметров методом наклона / Козьякова К.Я., Романюк В.А., Рукавишников Р.Б. и др. – М.: Наука, 1979. – 206 с.
2. Инструкция по развитию Государственной гравиметрической сети СССР (фундаментальной и 1 класса). – М.: ОНТИ ЦНИИГАиК. – 1988. – 253 с.
3. Метрологическое обеспечение гравиметров / Миникес Р.Э., Прихода А.Г. // Геофизический вестник. – 1998. – № 1. – С. 15–18.
4. Эталонирование гравиметров для высокоточных измерений // Геофизическая аппаратура. – 1999. – Вып. 102. – С. 105–114.
5. ГОСТ 13017-83 (СТ СЭВ 5576-86). Гравиметры наземные. Общие технические условия. – М., 1987.

6. О перспективах разведки методом проходящих микросейсмических волн естественного эндогенного происхождения / Дедов В.П., Омельченко О.К., Тригубович Г.М., Филимонов Б. П. // Геофизика. – 2006. – №. 3. – С. 30–40.
7. Инерционные аномалии – новый источник геологической информации / Веселов К.Е., Горин В.П., Глухова Е.В., Наumenко-Бондаренко, О.И. // Прикладная геофизика. – 1992. – Вып. 127. – С. 54–61.
8. Исследование абсолютного баллистического гравиметра и пути повышения точности измерений / Худзинский Л.Л., Барташевич Л.М., Сорокин В.Л. // Материалы Всерос. науч. конф. «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков», Москва, 8-10 окт. 2002. Т. 3. Геофизика. – М.: Регион. обществ.орг. учен. по пробл. прикл. геофиз. – 2002.
9. 9 Комментарии к статье «Метрологическое обеспечение гравиметров» / Стакло А.В., Немцов Л.Д. Геофиз. вестн. – 1998. – № 1. – С. 18–19.
10. Инструкция по гравиметрической разведке. – М., 1980. – 80 с.
11. Методические указания по методике поверки наземных гравиметров. – М.: Мингео СССР, 1987. – 15 с.

© В.А. Войтенко, Р.Э. Миникес, 2007

УДК 006: 621.317.744

С.В. Савелькаев, М.Б. Устюгов, Л.Г. Плавский

СГГА, НГТУ, Новосибирск

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ДВУХСИГНАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ СВЧ-ЦЕПЕЙ

Физическая сущность проблемы. Измерение комплексного коэффициента отражения (ККО) Γ анализаторами СВЧ-цепей (АЦ) [1–4] основано на регистрации трех значений мощностей $P_k, k=1, 2, 3$ стоячей волны с последующим определением измеряемого ККО Γ , что на его комплексной плоскости графически иллюстрируется рис. 1.

Предельная погрешность Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ зависит как от динамического диапазона $\Delta = 10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$ стоячей волны с минимумом и максимумом $P_{\min, \max}$, так и от фазового сдвига $\theta_{2,3}$ ее регистрируемых мощностей P_k . При выполнении двухстороннего амплитудного ограничения $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ и фазового условия $\theta_{2,3} \cong \theta_0$ предельная погрешность Δ_{Γ}^1 измерения не превышает заданного предела ее допуска $\Delta_{\Gamma}^1 \leq \Delta_{\Gamma}$, как показано на рис. 1, где $\Delta_{\min, \max}$ и θ_0 – предельно допустимые минимальное и максимальное значения динамического диапазона Δ и оптимальный фазовый сдвиг стоячей, при которых предельная погрешность Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ имеет минимум минимума $\Delta_{\Gamma}^1 = \min \min \Delta_{\Gamma}^1$.

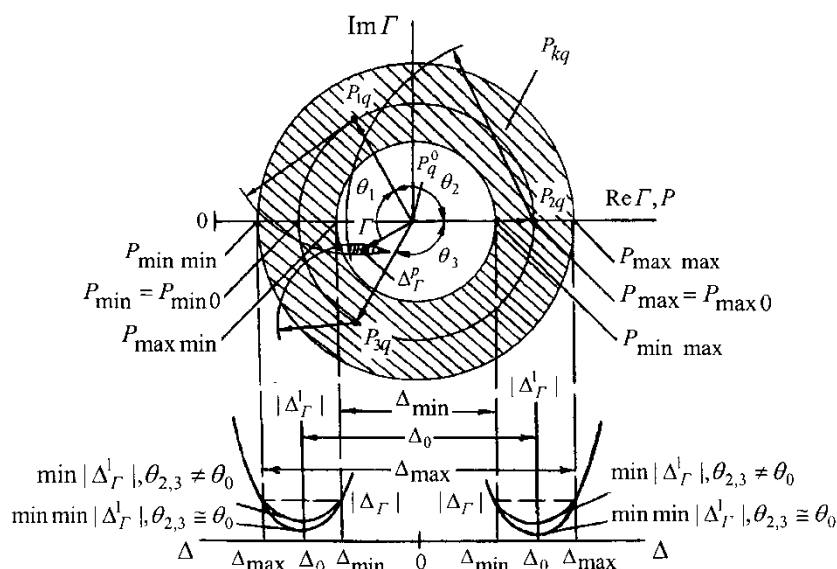


Рис. 1. Графическое определение измеряемого ККО Γ

Таким образом, можно ввести в рассмотрение понятие амплитудной адаптации АЦ как его свойство в широком динамическом диапазоне, а именно для любых измеряемых ККО Γ с модулем $0 < |\Gamma| \leq 1$ поддерживать двухстороннее амплитудное ограничение $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$ и фазовой адаптации АЦ как его свойство поддерживать в широком частотном диапазоне фазовое условие $\theta_{2,3} \equiv \theta_0$.

Недостатком классических односигнальных АЦ [1], имеющих генератор одного зондирующего сигнала a , является то, что они могут поддерживать только их амплитудную адаптацию в виде одностороннего амплитудного ограничения $0 \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$, при котором предельная погрешность Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ с модулем $|\Gamma| < 0,3$ превысив предел ее допуска Δ_{Γ} неограниченно возрастает $\Delta_{\Gamma}^1 \gg \Delta_{\Gamma}$. Кроме того, способность таких АЦ поддерживать в широком частотном диапазоне фазовое условие $\theta_{2,3} \equiv \theta_0$ определяется частотными свойствами их $2n$ -полюсника, что в широком частотном диапазоне требует его замены.

Для улучшения свойств адаптивности односигнальных АЦ их $2n$ -полюсник был заменен на перестраиваемый [2–4]. Такие АЦ не получили дальнейшего развития из-за сложностей технической реализации их перестраиваемого $2n$ -полюсника.

В статье предложен принцип построения двухсигнального АЦ [4], имеющего генератор двух зондирующего a и сдвигаемого по фазе φ_k^0 опорного a_{kq}^0 сигналов. Конструкция его $2n$ -полюсника намного проще чем у известных АЦ имеющих $n \geq 4$ выходных плеч.

Математическая модель АЦ. Структурная схема двухсигнального АЦ показано на рис. 2. Комплексная амплитуда сигнала b_{kq} на выходном плече его $2n$ -полюсника может быть определена как в [3, 4]

$$b_{kq} = \frac{A_1 + B_1 \Gamma}{1 + C\Gamma} a + \frac{A_2 + B_2 \Gamma}{1 + C\Gamma} a_{kq}^0, \quad (1)$$

где a и a_{kq}^0 – опорный и зондирующий сигналы на его входных плечах; A_i , B_i , $i = 1, 2$ и C – эквивалентные комплексные константы $2n$ -полюсника; Γ – ККО исследуемой СВЧ-цепи в плоскости $n - n'$ ее подключения к измерительному плечу $2n$ -полюсника.

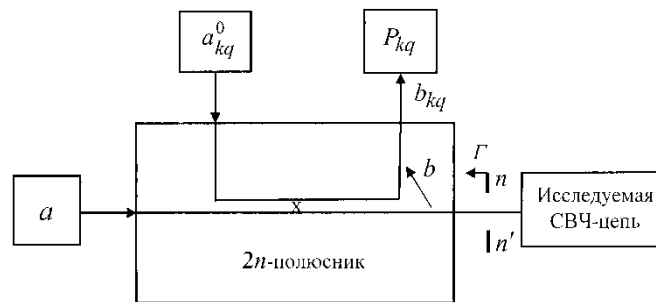


Рис. 2. Двухсигнальный АЦ

Из выражения (1) можно получить уравнение физического преобразования измеряемого ККО Γ в мощности P_{kq} в виде

$$P_{kq} = \frac{1}{2} |b_{kq}|^2 = E_q [1 + |\rho_q|^2 + 2|\rho_q| \cos(\varphi_\rho + \varphi_k)], \quad (2)$$

где $q = 1, 2, \dots, N$ и $k = 1, 2, 3$ – индексы состояний амплитуды $|a_q^0|$ и фазы φ_k^0 опорного сигнала a_{kq}^0 , первый из которых определяет поддиапазон измерения ККО Γ в виде двухстороннего амплитудного ограничения $\Delta_{\min} \leq \Delta \leq \Delta_{\max}$, а второй – текущий k -й сдвиг

$$\varphi_k = \pm \sum_k \theta_k \quad (3)$$

фазы φ_k^0 опорного сигнала a_{kq}^0 относительно фазы φ зондирующего сигнала a ; $\theta_k = \varphi - \varphi_k^0$ – начальная фаза θ_1 и фазовый сдвиг $\theta_{2,3}$, характеризующий дискретное приращение фазы φ_k^0 , $k = 2, 3$ опорного сигнала a_{kq}^0 относительно фазы φ зондирующего сигнала a (фазовая метрика стоячей волны); $|\rho_q|$ и φ_ρ – модуль и фаза эквивалентного ККО

$$\rho_q = C_1 \frac{1 + C_2 \Gamma}{1 + C_3 \Gamma} \chi_q \quad (4)$$

измеряемого ККО Γ ; $C_1 = (A_1 / A_2) A \exp j\theta$, $C_2 = B_1 / A_1$ и $C_3 = B_2 / A_2$ – приведенные комплексные константы $2n$ -полюсника АЦ; $A = |a / a^0|$ и $\theta = \varphi - \varphi^0$ – неизвестные начальное отношение амплитуд и начальный сдвиг фазы φ_k^0 опорного сигнала a_{kq}^0 относительно фазы φ зондирующего сигнала a , подлежащие исключению при калибровке АЦ; χ_q – относительная амплитуда

$$\chi_q = |a / a_q^0| = A \cdot 10^{\alpha_q / 20} \quad (5)$$

зондирующего a и опорного a_{kq}^0 сигналов на q -м поддиапазоне измерения ККО Γ (амплитудная метрика стоячей волны), задающая посредством модуля $|\rho_q|$ эквивалентного ККО ρ_q (4) динамический диапазон

$$\Delta = 10 \lg \frac{1 + |\rho_q|^2 + 2|\rho_q|}{1 + |\rho_q|^2 - 2|\rho_q|} = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (6)$$

стоячей волны, определяющийся минимумом и максимумом $P_{\min, \max}$ ее возможных значений, как показано на рис. 1; α_q – ослабление амплитуды $|a_q^0|$ опорного сигнала a_{kq}^0 на q -м поддиапазоне измерения; E_q – амплитудный коэффициент, зависящий от мощности $P_q^0 = |a_q^0|^2 / 2$ опорного сигнала a_{kq}^0 .

Уравнение физического преобразования (2) было преобразовано в систему измерительных уравнений вида

$$x_1 + a_{k2}x_2 + a_{k3}x_3 = a_{kq4}; k = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где $a_{kq4} = P_{kq}$, $a_{k2} = 2 \cos \varphi_k$, $a_{k3} = -2 \sin \varphi_k$.

Решение системы уравнений (7) относительно переменных x_k для $k = 1, 2, 3$ мощностей P_{kq} при $q = \text{const}$ позволяет определить модуль $|\rho_q|$ и фазу φ_ρ эквивалентного ККО ρ_q (4) как:

$$|\rho_q| = 1/2\beta \pm \sqrt{1/4\beta^2 - 1}, \quad \varphi_\rho = \arctg(x_3 / x_2), \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{(x_2 / x_1)^2 + (x_3 / x_1)^2}.$$

Для определения измеренного ККО Γ через эквивалентный ККО ρ_q (8) было использовано выражение

$$\Gamma = \frac{G_1 \tilde{\chi}_q - \tilde{\rho}_q}{G_3 \tilde{\rho}_q - G_2 \tilde{\chi}_q}. \quad (9)$$

где $\tilde{\rho}_q = \rho_q / \rho_{14}$ и ρ_{14} – нормированный эквивалентный ККО измеряемого ККО Γ и нормирующий эквивалентный ККО, измеряемый при калибровке АЦ короткозамкнутой коаксиальной мерой с ККО $\Gamma = W_4 = -1$ на $q = 1$ поддиапазоне измерения; $\tilde{\chi}_q$ – нормированная относительная амплитуда

$$\tilde{\chi}_q = \chi_q / \chi_1 = 10^{(\alpha_q - \alpha_1)/20}; \quad (10)$$

χ_1 – относительная амплитуда на $q = 1$ поддиапазоне измерения

$$\chi_1 = |a/a_1^0| = A \cdot 10^{\alpha_1/20}; \quad (11)$$

α_1 – ослабление амплитуды $|a_q^0|$ опорного сигнала a_{kq}^0 на $q = 1$ поддиапазоне измерения; $G_1 = (1 - C_3)/(1 - C_2)$, $G_2 = C_2(1 - C_3)/(1 - C_2)$ и $G_3 = C_3$ – нормированные комплексные константы $2n$ – полюсника АЦ, подлежащие определению при его калибровке.

В случае, когда в (10) ослабление α_q амплитуды $|a_q^0|$ опорного сигнала a_{kq}^0 неизвестно нормированную относительную амплитуду $\tilde{\chi}_q$ на q -м поддиапазоне измерения, входящую в (9), можно определить из формулы

$$\tilde{\chi}_q = \left| \tilde{\rho}_{qq} \frac{1 + G_3 W_q}{G_1 + G_2 W_q} \right|, \quad (12)$$

где $\tilde{\rho}_{qq} = \rho_{qq} / \rho_{14}$ – нормированное значение эквивалентного ККО ρ_{qq} , измеряемого при калибровке АЦ коаксиальной мерой с ККО $\Gamma = W_q$ на q -м поддиапазоне измерения.

Выражения (2), (7)–(10) представляют собой математическую модель двухсигнального АЦ в виде физической (2) и логической (7)–(10) частей, последняя из которых позволяет определить измеренный ККО Γ . Эта модель применима к гомодинному АЦ в который может быть преобразован двухсигнальный АЦ посредством замены генератора опорного сигнала a_{kq}^0 на прецизионный аттенюатор-фазовращатель отражательного типа.

Таким образом, предложен принцип построения двухсигнального АЦ, альтернативного классическим, а также разработана его математическая модель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Engen G.F. A (historical) review of the six-port measurement technique//IEEE Trans. – 1977. – Vol. MTT-45, No. 12. – P. 2414–2417.

2. А.с. 1682942 СССР, G 01 R 27/28. Держатель транзисторов в устройствах для измерения электрических параметров / В.П. Петров, С.В. Савелькаев, А.В. Борисов. – Оpubл. Бюл. № 37 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 37.
3. А.с. 1656419 СССР, G 01 R 27/28. Измеритель комплексного коэффициента отражения / В.П. Петров, С.В. Савелькаев. – Оpubл. Бюл. №22 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 22.
4. Савелькаев, С.В. Теоретические основы построения адаптивных цифровых анализаторов СВЧ-цепей /С.В. Савелькаев // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып. 9. – С. 34–39.
5. Петров, В.П. К вопросу адаптации двухсигнальных цифровых анализаторов СВЧ-цепей /В.П. Петров, С.В. Савелькаев // Тр. второй IEEE-Рос. конф. «Микроволновая электроника: измерения, идентификация, применение», сент., 1999, Новосибирск, НГТУ. – Новосибирск, 1999. – С. 68–71.
6. А.с. 1830564 СССР, G 01 R 27/28. Способ калибровки двухсигнального анализатора цепей / С.В. Савелькаев. – Оpubл. Бюл. № 28 // Открытия. Изобретения. – 1993. – № 28.

© С.В. Савелькаев, М.Б. Устюгов, Л.Г. Плавский, 2007

УДК 621.317.744

С.В. Савелькаев, Б.П. Филимонов, М.Б. Устюгов

СГГА, СНИИМ, Новосибирск

К ОЦЕНКЕ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛИЗАТОРОВ СВЧ-ЦЕПЕЙ

Для оценки суммарной погрешности измерения анализаторов СВЧ-цепей (АЦ) традиционно используют ряд Тейлора [1]. Основным недостатком такой оценки является громоздкость ее коэффициентов влияния, что существенно сказывается при большой неопределенности АЦ по инструментальным погрешностям и нелинейности его математической модели, требующей учета коэффициентов влияния порядка выше второго, а также коэффициентов корреляции. Кроме того, ряд Тейлора не обеспечивает отдельную оценку среднеквадратического отклонения (СКО) и систематической погрешности (СП), вызванной нелинейностью математической модели АЦ. Все это в целом ограничивает применение такой оценки в инженерной практике.

В статье для оценки суммарной погрешности измерения АЦ использована вариационная методика [2]. В ее основу положена вариация инструментальных погрешностей АЦ по их доверительным интервалам, при условии того, что измеряемая и измеренная АЦ величины связаны между собой его математической моделью. Методика применима к АЦ с нелинейной математической моделью и обеспечивает оценку как СКО, так и СП.

Математическая модель АЦ. Структурная схема АЦ приведена на рис. 1.

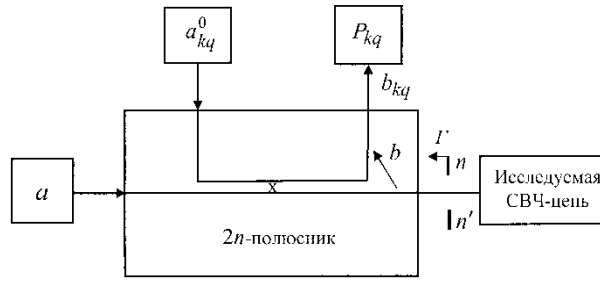


Рис. 1. Структурная схема АЦ

Уравнение физического преобразования измеряемого комплексного коэффициента отражения (ККО) Γ в регистрируемые мощности P_{kq} (физическая часть математической модели) имеет вид [3]

$$P_{kq} = \frac{1}{2} |b_{kq}|^2 = E_q [1 + |\rho_q|^2 + 2|\rho_q| \cos(\varphi_\rho + \varphi_k)], \quad (1)$$

где $q = 1, 2, \dots, N$ и $k = 1, 2, 3$ – индексы состояний амплитуды $|a_q^0|$ и фазы φ_k^0 опорного сигнала a_{kq}^0 , первый из которых определяет поддиапазон измерения ККО Γ в виде двухстороннего амплитудного ограничения $6 \leq \Delta \leq 14$ дБ по динамическому диапазону

$$\Delta = 10 \lg \frac{1 + |\rho_q|^2 + 2|\rho_q|}{1 + |\rho_q|^2 - 2|\rho_q|} = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (2)$$

стоячей волны на выходном плече $2n$ -полюсника АЦ с ее минимумом и максимумом $P_{\min, \max}$, а второй – k -й дискретный сдвиг

$$\varphi_k = \pm \sum_k \theta_k \quad (3)$$

фазы φ_k^0 опорного сигнала a_{kq}^0 относительно фазы φ зондирующего сигнала a в виде фазового условия $\theta_{2,3} = \pm 2\pi/3$; $|\rho_q|$ и φ_ρ – модуль и фаза эквивалентного ККО

$$\rho_q = C_1 \frac{1 + C_2 \Gamma}{1 + C_3 \Gamma} \mu_q \quad (4)$$

измеряемого ККО Γ ; $C_1 = A_1 / A_2$, $C_2 = B_1 / A_1$ и $C_3 = B_2 / A_2$ – приведенные комплексные константы $2n$ – полюсника АЦ; μ_q – относительная амплитуда

$$\mu_q = |a / a_q^0| = |a / a^0| 10^{\alpha_q / 20} \quad (5)$$

зондирующего a и опорного a_{kq}^0 сигналов на q -м поддиапазоне измерения ККО Γ ; $|a / a^0|$ и α_q – начальное отношение амплитуд зондирующего a и

опорного a_{kq}^0 сигналов и ослабление амплитуды $|a_q^0|$ опорного сигнала a_{kq}^0 на q -м поддиапазоне измерения, задающие посредством модуля $|\rho_q|$ эквивалентного ККО ρ_q (4) динамический диапазон Δ (2) стоячей волны; E_q – амплитудный коэффициент, зависящий от мощности $P_q = |a_q^0|^2 / 2$ опорного сигнала a_{kq}^0 .

В случае детектирования мощности P_{kq} (1) должны быть преобразованы в регистрируемые напряжения

$$U_{kq} = f(b_r, U_{kq}) \sqrt{2P_{kq}}, \quad (6)$$

где b_r и $r = 0, 1, 2, \dots$ – члены ряда $f(b_r, U_{kq}) = \sum_r b_r U_{kq}^r$ детектирования и их текущий индекс.

Обратное решение (1) относительно эквивалентного ККО ρ_q позволяет получить систему измерительных уравнений АЦ (логическая часть математической модели) в виде [3]

$$x_1 + a_{k2}x_2 + a_{k3}x_3 = U_{kq}; \quad k = 1, 2, 3, \quad (7)$$

где $a_{k2} = 2 \cos \varphi_k, a_{k3} = -2 \sin \varphi_k$.

Решение системы уравнений (7) относительно переменных x_k для $k = 1, 2, 3$ регистрируемых напряжений U_{kq} (6) при $q = \text{const}$ позволяет определить модуль $|\rho_q|$ и фазу φ_ρ эквивалентного ККО ρ_q (4) как:

$$|\rho_q| = 1/2\beta \pm \sqrt{1/4\beta^2 - 1}, \quad \varphi_\rho = \arctg(x_3 / x_2), \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{(x_2 / x_1)^2 + (x_3 / x_1)^2}.$$

По эквивалентному ККО ρ_q (8) измеренный ККО Γ^* можно определить из (4) в виде

$$\Gamma^* = \frac{G_1 \tilde{\mu}_q - \tilde{\rho}_q}{G_3 \tilde{\rho}_q - G_2 \tilde{\mu}_q}, \quad (9)$$

где $\tilde{\rho}_q = \rho_q / \rho_{14}$ и ρ_{14} – нормированный эквивалентный ККО измеряемого ККО Γ и нормирующий эквивалентный ККО, измеряемый при калибровке АЦ короткозамкнутой коаксиальной мерой с ККО $\Gamma = W_4 = -1$ на $q = 1$ поддиапазоне измерения; $\tilde{\mu}_q$ – нормированная относительная амплитуда

$$\tilde{\mu}_q = \mu_q / \mu_1 = 10^{(\alpha_q - \alpha_1) / 20} \quad (10)$$

на q -м поддиапазоне измерения; μ_1 и α_1 – относительная амплитуда (5) и начальное ослабление амплитуды $|a_q^0|$ опорного сигнала a_{kq}^0 на $q = 1$ поддиапазоне измерения; $G_1 = (1 - C_3)/(1 - C_2)$, $G_2 = C_2(1 - C_3)/(1 - C_2)$ и $G_3 = C_3$ – нормированные комплексные константы $2n$ -полюсника АЦ, подлежащие определению при его калибровке.

Ослабление α_q (10) на q -м поддиапазоне измерения должно быть выбрано так, чтобы для меры с модулем ККО $|W_q| = (|G_{\min q}| + |G_{\max q}|)/2 \cong \{1; 0,7; 0,5; 0,33; 0,18\}$ динамический диапазон Δ (6) составлял $\Delta \cong \Delta_0 = 10 \text{ дБ}$, где $|G_{\min q, \max q}| = \{[1; 0,8], [0,8; 0,6], [0,6; 0,4], [0,4; 0,25], [0,25; 0,13]\}$ – граничные значения, разбивающие модуль $0 < |G| \leq 1$ измеряемого ККО G на $N = 5$ поддиапазонов измерения.

Граничные значения $|G_{\min q, \max q}|$ на любом из $q = 1, 2, \dots, N$ поддиапазонов измерения должны быть выбраны так, чтобы для них на этих поддиапазонах динамический диапазон Δ (6) составлял $\Delta \cong \Delta_{\min, \max} = 6; 14 \text{ дБ}$, что обеспечивает выполнение на каждом из этих поддиапазонов двухстороннего амплитудного ограничения $6 \leq \Delta \leq 14 \text{ дБ}$.

Выполнение двухстороннего амплитудного ограничения $6 \leq \Delta \leq 14 \text{ дБ}$ и фазового условия $\theta_{2,3} = \pm 2\pi/3$ обеспечивает минимальную погрешность $\Delta_F^p = \min \Delta_F^p$ измерения ККО G .

Выражения (6)–(10) представляют собой логическую часть математической модели АЦ, позволяющую определить измеренный ККО G^* . Она совместно с уравнением физического преобразования (1) в виде физической и логической частей образуют математическую модель АЦ.

Калибровка АЦ. Так как на $q = 1$ поддиапазоне измерения нормированная относительная амплитуда $\tilde{\mu}_q = 1$ (10), то выражение (9) при $G = W_m$ было преобразовано в систему уравнений калибровки вида [2]

$$G_1 + a_{m2} G_2 + a_{m3} G_3 = a_{m4}, \quad m = 1, 2, 3, \quad (11)$$

где $a_{m2} = -W_m$; $a_{m3} = -\tilde{\rho}_{1m} W_m$; $a_{m4} = \tilde{\rho}_{1m}$ и $\tilde{\rho}_{1m} = \rho_{1m}/\rho_{14}$ и ρ_{14} – нормированный эквивалентный ККО измеряемого ККО W_m подвижной короткозамкнутой меры для $m = 1, 2, 3$ состояний ее фазы

$$\varphi_m = 2\beta l_m \pm \pi, \quad (12)$$

и нормирующий эквивалентный ККО измеряемого ККО $W_4 = -1$ этой меры при $m = 4$; $\beta = 2\pi/\lambda$ и $l_m \leq \lambda/4$ – фазовая постоянная и фазовая переменная шкалы этой меры; λ – длина стоячей волны.

Решение системы уравнений (11) позволяет определить комплексные константы G_1 , G_2 и G_3 $2n$ -полюсника АЦ.

В целом уравнение физического преобразования (1) в виде физической части и система уравнений (6) с ее решением (7), а также система уравнений (11) и выражения (10) в виде логической части образуют математическую модель калибровки АЦ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров В.П. О некоторых статистических свойствах и их применения к оценке точности функционирования радиоустройств и систем / В.П. Петров, Ю.В. Рясный // Труды третьей междунар. научно-техн. конф. – Новосибирск, 1996. – Т.9. – С. 17–20.
2. Журавин Л.Г. Методы электрических измерений / Л.Г. Журавин, М.А. Мироненко. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
3. Савелькаев С.В. Теоретические основы построения двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей / С.В. Савелькаев // Измерительная техника. – 2005. – № 3. – С. 41–46.

© С.В. Савелькаев, Б.П. Филимонов, М.Б. Устюгов, 2007

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛИЗАТОРОВ СВЧ-ЦЕПЕЙ

Для оценки Δ_G^P суммарной погрешности $\Delta G = G^* - G$ измерения ККО G анализаторами СВЧ-цепей [1] на основе вариации инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}] = \{\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta C, \Delta\theta_k, \Delta\alpha_q, \Delta b_r; i=1,2; k=1,2,3; q=1,2,\dots,5; r=0,1,2\}$ уравнения физического преобразования, а также инструментальных погрешностей $[\Delta\chi_k] = \{U_{kqm}; k=1,2,3; q=1,2,\dots,5; m=1,2,3,4\}$ и $[\Delta\chi_{\Pi}] = \{\Delta U_{kq}; k=1,2,3; q=1,2,\dots,5\}$ измерителя напряжений $U_{kqm,kq}$ при калибровке АЦ и измерении ККО G принимается оценка вида

$$\Delta_G^P = \Delta_K^P + \Delta_{\Pi}^P, \quad (1)$$

где $P = P_1 P_2 \dots P_n$ – ее доверительная вероятность в виде произведения $P_1 P_2 \dots P_n$ доверительных вероятностей инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$, $[\Delta\chi_k]$ и $[\Delta\chi_{\Pi}]$; Δ_K^P и Δ_{Π}^P – составляющие:

$$\Delta_K^P = \max_{g=1,2,\dots,n_B} (G_K^{*g} - G), \quad \Delta_{\Pi}^P = \max_{g=1,2,\dots,n_B} (G_{\Pi}^{*g} - G), \quad (2)$$

первая из которых представляет собой погрешность измерения ККО G , обусловленную погрешностями $[\Delta\zeta_k] = \{\Delta G_j; j=1,2,3\}$ калибровки АЦ из-за инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_k]$ при его калибровке, а вторая – погрешность измерения ККО G , обусловленная инструментальными погрешностями $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_{\Pi}]$ при измерении ККО G , как показано на рис. 1.

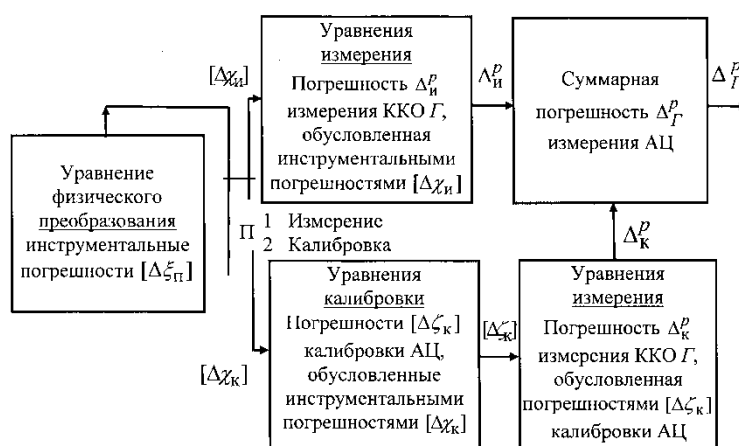


Рис. 1. Суммарная погрешность Δ_G^P измерения ККО G

Измеренные ККО Γ_K^{*g} (2) были определены посредством моделирования процедуры измерения известного измеряемого ККО Γ с модулем $0 < |\Gamma| \leq 1$. При моделировании этой процедуры случайным инструментальным факторам $[\xi_{\Pi}]$ и $[\chi_{\Pi}]$ присваивались номинальные значения $[\xi_{\Pi}] = [\xi_{\Pi}^0]$ и $[\chi_{\Pi}] = [\chi_{\Pi}^0]$, тогда как при математическом моделировании процедуры калибровки АЦ для каждого из $g = 1, 2, \dots, n_B$ измеряемого ККО Γ осуществлялась их вариация:

$$[\xi_{\Pi}] = [\xi_{\Pi}^0] + [\Delta\xi_{\Pi}]_{\nu}, [\chi_K] = [\chi_K^0] + [\Delta\chi_K]_{\nu} \quad (3)$$

относительно их номинальных значений $[\xi_{\Pi}^0]$ и $[\chi_K^0]$ по симметричному допуску $[\Delta\xi_{\Pi}]_{\nu} = \{-[\Delta\xi_{\Pi}]/2; 0; +[\Delta\xi_{\Pi}]/2\}$ и $[\Delta\chi_K]_{\nu} = \{-[\Delta\chi_K]/2; 0; +[\Delta\chi_K]/2\}$ $\nu = 1, 2, 3$ доверительных интервалов инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_K]$. И наоборот при определении измеренных ККО Γ_{Π}^{*g} (2) случайные инструментальные факторы $[\xi_{\Pi}]$ и $[\chi_{\Pi}]$ варьировались

$$[\xi_{\Pi}] = [\xi_{\Pi}^0] + [\Delta\xi_{\Pi}]_{\nu}, [\chi_{\Pi}] = [\chi_{\Pi}^0] + [\Delta\chi_{\Pi}]_{\nu} \quad (4)$$

относительно их номинальных значений $[\xi_{\Pi}^0]$ и $[\chi_{\Pi}^0]$ по симметричному допуску $[\Delta\xi_{\Pi}]_{\nu} = \{-[\Delta\xi_{\Pi}]/2; 0; +[\Delta\xi_{\Pi}]/2\}$ и $[\Delta\chi_{\Pi}]_{\nu} = \{-[\Delta\chi_{\Pi}]/2; 0; +[\Delta\chi_{\Pi}]/2\}$, $\nu = 1, 2, 3$ доверительных интервалов инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_{\Pi}]$, тогда как при математическом моделировании процедуры калибровки АЦ им присваивались номинальные значения $[\xi_{\Pi}] = [\xi_{\Pi}^0]$ и $[\chi_K] = [\chi_K^0]$.

При необходимости также можно исследовать зависимость составляющей Δ_K^P суммарной погрешности Δ_{Γ}^P (1) измерения ККО Γ от погрешности аттестации калибровочных мер с ККО W_m . Для этого необходимо осуществить вариацию погрешностей аттестации по их доверительным интервалам.

Общее число n_B вариаций (3) и (4) случайных инструментальных факторов $[\xi_{\Pi}]$ и $[\chi_{K,\Pi}]$ на q -м поддиапазоне измерения определялось по формуле

$$n_B = n_K + n_{\Pi}, \quad (5)$$

где n_K и n_{Π} – количество вариаций при калибровке АЦ и измерении ККО Γ

$$n_K = C_1 n_1, n_{\Pi} = C_1 C_2 n_1; \quad (6)$$

$n_1 = 3^{n_{\Phi}}$ и n_{Φ} – число вариаций случайных инструментальных факторов $[\xi_{\Pi}]$ и количество этих факторов, за исключением случайных инструментальных факторов $[\chi_{K,\Pi}]$ измерителя напряжений, вариация которого учтена в (6) множителем $C_1 = 3$; $C_2 = 4$ – общее количество измеряемых ККО W_m при калибровке АЦ.

Оценка среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma_{K,\Pi}^P$ и систематической погрешности (СП) $h_{K,\Pi}^P$ осуществлялась по формулам:

$$\sigma_{\kappa,и}^P = \sqrt{\sum_{g=1}^{n_B} (\Gamma_{\kappa,и}^{*g} - \bar{\Gamma})^2}, \quad h_{\kappa,и}^P = \bar{\Gamma} - \Gamma, \quad \bar{\Gamma} = \frac{1}{n_B} \sum_{g=1}^{n_B} \Gamma_{\kappa,и}^{*g}. \quad (7)$$

В случае, когда в качестве инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_{\kappa,и}]$ принимаются их предельные отклонения оценки Δ_{Γ}^P (1) и $\sigma_{\kappa,и}^P, h_{\kappa,и}^P$ (7) переходят в предельные.

Вариация (3) и (4) случайных инструментальных факторов $[\xi_{\Pi}]$ и $[\chi_{\kappa,и}]$ может быть осуществлена методом Монте-Карло.

Графики оцененной предельной суммарной погрешности Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ коаксиальных нагрузок с модулем $0 < |\Gamma| \leq 1$ в диапазоне частот 4–18 ГГц представлены на рис. 2, а и б: I – без адаптации АЦ $0 \leq \Delta \leq \infty$, II – при адаптации АЦ сверху $0 \leq \Delta \leq 14$ дБ и III – при безусловной адаптации АЦ $6 \leq \Delta \leq 14$ дБ.

Уровень инструментальных погрешностей $[\Delta\xi_{\Pi}]$ и $[\Delta\chi_{\kappa,и}]$ по предельным отклонениям их доверительных интервалов составлял 1 % по модулю и 1^0 по фазе для комплексных величин и 1 % для скалярных.

Общее количество n_B (5) вариаций случайных инструментальных факторов $[\xi_{\Pi}]$ и $[\chi_{\kappa,и}]$ составило $n_B = 15 \times 10^{21}$.

Согласно графикам приведенным на рис. 2, а и б важным свойством АЦ при его безусловной адаптации $6 \leq \Delta \leq 14$ дБ является то, что он на всех $q = 1, 2, \dots, 5$ поддиапазонах измерения обеспечивает предельную суммарную погрешность Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ нагрузок с модулем $0,13 \leq |\Gamma| \leq 1$ не превышающую $|\Delta_{\Gamma}^1| \leq 0,07 |\Gamma|$ по модулю и $\Delta\varphi_{\Gamma}^1 \leq 4^0$ по фазе.

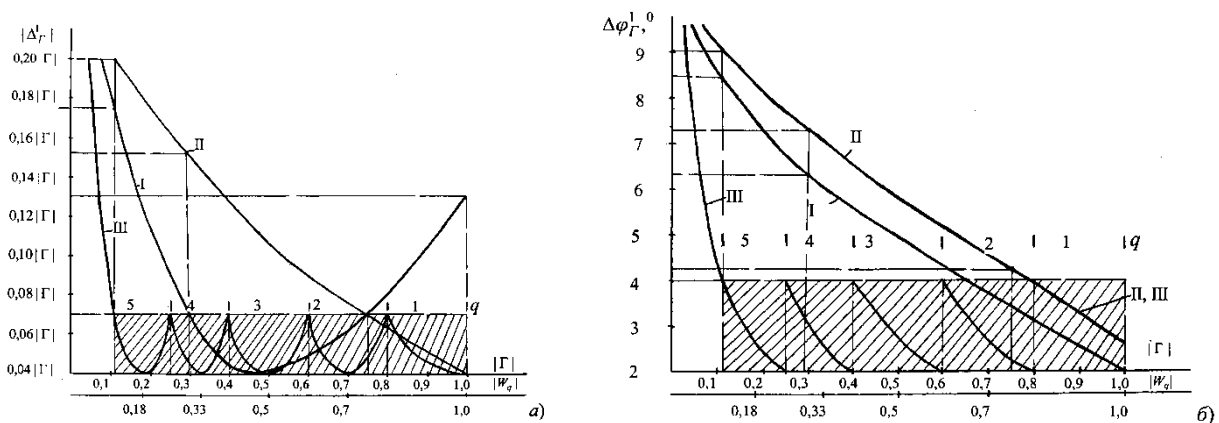


Рис. 2. Модуль $|\Delta_{\Gamma}^1|$ (а) и фаза $\Delta\varphi_{\Gamma}^1$ (б) предельной суммарной погрешности Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ

Для повышения точности измерения ККО нагрузок с модулем $|\Gamma| \leq 0,13$ необходимо увеличение количества N поддиапазонов измерения.

Сличение результатов оценки предельной суммарной погрешности Δ_{Γ}^1 измерения ККО Γ предложенной методикой с результатами ее экспериментальной оценки было осуществлено на основе измерения ККО Γ

коаксиальных нагрузок с модулем $0 < | \Gamma | \leq 1$ в диапазоне частот 4–18 ГГц. Нагрузки были аттестованы ФГУП СНИИМ с погрешностью $| \Delta_{\Gamma} | \leq 0,024 | \Gamma |$ по модулю и $\Delta \varphi_{\Gamma} \leq 1^{\circ}$ по фазе. Расхождение оценок составило не более $| \Delta_{\Gamma}^1 | \leq 0,05 | \Gamma |$ по модулю и $\Delta \varphi_{\Gamma}^1 \leq 5^{\circ}$ по фазе, тогда как на основе ряда Тейлора оно составляло $| \Delta_{\Gamma}^1 | \leq 0,15 | \Gamma |$ и $\Delta \varphi_{\Gamma}^1 \leq 15^{\circ}$.

Заключение. Таким образом, рассмотрена вариационная методика оценки суммарной погрешности АЦ. Она позволяет эффективно оценить эту погрешность при любой неопределенности математической модели АЦ по инструментальным погрешностям и любом характере ее нелинейности. Методика позволяет оценить суммарную погрешность измерения АЦ как по СКО, так и СП и может найти широкое применение при разработке АЦ, а именно при оптимизации процедуры измерения ККО Γ и калибровки АЦ, а также при выборе его метрологических характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савелькаев С.В. К оценке суммарной погрешности измерения анализаторов СВЧ-цепей / С.В. Савелькаев, Б.П. Филимонов, М.Б. Устюгов // Труды третьего международного научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ – 2007». – Новосибирск, 2007.

© С.В. Савелькаев, Б.П. Филимонов, М.Б. Устюгов, 2007

УДК 528.088

А.Н. Теплых

СГГА, Новосибирск

К ВОПРОСУ О ПОНЯТИЯХ «ОШИБКА» И «ПОГРЕШНОСТЬ» ИЗМЕРЕНИЯ

В статье рассматриваются вопросы определения терминов «ошибка» и «погрешность». Отмечается, что по природе происхождения эти термины неравнозначны и несут в себе различный физический смысл. Отмечается, что применительно к геодезическим измерениям необходимо применять термин «ошибка». В настоящее время в геодезическом производстве равнозначно применяются термины «ошибка измерений» и «погрешность измерений». Несмотря на такую равнозначность, считаем, что следует всё-таки различать эти термины по природе их происхождения. Рассмотрим некоторые вопросы дискуссий по данному вопросу, которые были в 70–90-е в геодезической литературе. В толковых словарях русского языка термины «ошибка» и «погрешность» поясняются как синонимы без раскрытия различий между ними. В целях борьбы с синонимией, но вопреки правилу отдавать предпочтение более употребительному и удобному термину ГОСТ 16263–70 не рекомендовал применять термин ошибка и вместо него применять термин погрешность. О неудовлетворительности такой рекомендации высказался Б.С. Кузьмина в статье «О терминах «ошибка», «поправка», «точность» и «погрешность» [1]. Он считает, что исключение из употребления слова ошибка заденет всю

геодезическую науку, между тем на геодезической науке, литературе и производстве ничуть не отразится исключение термина погрешность. Погрешность и ошибка понятия далеко не равноценные по удобству их использования, хотя и являются неразличимыми по смыслу друг от друга синонимами. Термин ошибка в «Толковом словаре» В. Даля определяется как погрешность, неправильность, неверность, промах, огрех, а термин погрешность – как ошибка, неверность, неточность, неправильность, промах. Слово ошибка применяется в геодезической литературе несравненно шире, чем погрешность, с ним связано название дисциплины «Теория ошибок измерений», оно вошло в названия видов ошибок измерений, в ряд определений научных понятий, например «ошибка веса» и т. д. Слово ошибка почти в два раза короче, чем слово погрешность, от него просто образуются новые слова: ошибочность, ошибаться, ошибочный и т. д. Оно гибче слова погрешность, и легко сочетаются с производными от него словами другие слова и строятся предложения.

В методических указаниях по разработке стандартов на термины и определения требуется считаться при отборе термина с его распространенностью, учитывать его удобство для образования новых слов и сочетаний его с другими словами, таким образом, исключение из употребления слова ошибка противоречит этим указаниям. Можно также отметить, что в вычислительной практике все неизвестные, входящие в нередко употребляемый термин «уравнение погрешностей» являются поправками, а не погрешностями, что противоречит действительному значению этого термина, потому что слово погрешность также входит в этот термин. Слово погрешность читатель воспринимает как устаревшее, что, по-видимому, происходит не без влияния того обстоятельства, что в термине погрешность явно слышится родство со словом грех, прямой смысл которого – «нарушение религиозно нравственных предписаний». Не рекомендуется при отборе терминов отдавать предпочтение тем из них, которые вызывают ложные, ненужные ассоциации. В борьбе с синонимией вряд ли разумно устранять термин ошибка, безусловно, более употребляемый в коллективе геодезистов, чем идентичный ему по смыслу термин погрешность и не правильнее ли будет не рекомендовать термин погрешность, или, чтобы не продолжать спора между метрологами и геодезистами, принять равноправность этих терминов и предоставить самой жизни решать вопрос об их применении.

В 1979 г. в редакцию журнала «Геодезия и картография» поступило письмо, подписанное видными учеными-геодезистами, докторами, профессорами Н.Н. Вороковым, П.А. Гайдаевым, А.А. Изотовым, А.Н. Кузнецовым, Е.Г. Ларченко, Г.П. Левчуком, М.М. Машимовым, В.П. Морозовым, С.С. Ураловым, Н.В. Яковлевым, С.Г. Судаковым, в котором авторы выражают свое несогласие с изъятием из геодезической литературы термина «ошибка».

Термин «ошибка» геодезисты применяют в связи с производством измерений как название явления, неизбежно сопровождающего все измерения. Можно добавить к изложенному в упомянутой статье Б.С. Кузьмина, что стремление изъять термин «ошибка» проистекает из недостаточного понимания

его значения как в геодезии вообще, так и в отечественных геодезических трудах в частности, особенно по теории ошибок измерений. От всего содержания геодезической науки термин «ошибка» неотделим, так как вопросы производства измерений и их обработки являются основными в этой науке, он связан с вопросами точности – основными в постановке и организации всех видов геодезических работ. В геодезии термин «ошибка» один из наиболее употребляемых. Изъятие этого термина «зачеркнет» названия многочисленных учебных трудов и монографий по теории ошибок измерений, а также прочно вошедшие в геодезические дисциплины такие термины, как «ошибка единицы веса», укоренившиеся названия всех видов ошибок. Скрипящее слово «погрешность», оставшись в одиночестве, утяжеляет стиль изложения вопросов производства измерений и их обработки. Замена термином «погрешность» термина «ошибка» противоречит главному принципу терминологической стандартизации – отдавать предпочтение более употребительному термину и более удобному для образования производных от него слов и сочетаний с другими словами. Например, такие необходимые слова, как «ошибочный», «безошибочный», не могут быть образованы от слова «погрешность».

В 1980 г. Госстандарт СССР рассмотрел ходатайство рабочей группы «Научная терминология в метрологии» о сохранении наряду с термином «погрешность» термина «ошибка» и ввиду широкого применения последнего в математике, физике, химии, астрономии, геодезии и других науках снял запрет на применение термина «ошибка измерения» в учебниках, инструкциях, научно-технической литературе по геодезии, картографии, фотограмметрии, аэросъемке, геодезическому приборостроению.

Однако среди специалистов нет единого мнения, в каких случаях правильнее применять термин «погрешность измерения», а в каких «ошибка измерения». Я приведу одну из точек зрения по данному вопросу высказанную В.С. Кусовым [2]. Сторонники термина «ошибка измерения» обычно прибегают к истории, приводя имена известных авторов, в работах которых этот термин использовался, и указывают на невозможность образования таких необходимых слов, как «ошибочный» и «безошибочный» при замене термина «ошибка измерения» на «погрешность измерения». Обратимся к истории. Автор первого специального учебного руководства на русском языке по геодезии С.К. Котельников (1766 г.) применяет только термин «погрешность измерения», академик В.Я. Буняковский в первой работе на русском языке, посвященной теории вероятностей, приводит целую главу «О наивыгоднейших результатах наблюдений», где оперирует с термином «погрешность измерения». В геодезическую литературу примерно с середины прошлого столетия начинает проникать термин «ошибка измерения». Так, в фундаментальном труде В.Я. Струве главный критерий точности именуется «вероятная погрешность», но, переходя к разбору источников погрешностей, автор приводит составляющие ошибки. Академик А. Савич уже пишет, что «погрешность или ошибка есть разность между истинною величиною искомого количества и тою величиною, которая выходит из непосредственного измерения этого количества». В геодезической литературе в XX в термин «ошибка измерения» встречается

чаще. Только молодой А.С. Чеботарев назвал свою работу 1906 г. «Исследования в области теории погрешностей». В 1955г. издано полное собрание сочинений М.В. Ломоносова, в котором приведены оригинальные тексты автора на русском и латинском языках, а также в переводе Я.М. Боровского на современный русский язык. М.В. Ломоносов везде употребляет термин «погрешность измерения». Так, он говорит об астрономических наблюдениях, «которые не токмо, себя взаимно поправляя, умножают вероятность, но и самих часов погрешность открывают». В переводе же приведено: «которые не только взаимно исправляют себя, увеличивая достоверность результата, но и вскрывают ошибки самих часов». И далее все погрешности превращены в ошибки.

Спустя три года после снятия запрета с термина «ошибка измерения» своё мнение по данному вопросу ещё раз высказал Б.С. Кузьмин [3]. Он считает, что во многих отношениях термин ошибка более удобен и в геодезической литературе всегда применялся гораздо шире, чем погрешность. Он прочно связан с неизбежными случайными и систематическими ошибками, сопровождающими результаты любых измерений. Неизбежные ошибки изучаются в их массе при анализе рядов измерений. Термин погрешность В.В. Витковский, Ф.Н. Красовский и другие выдающиеся отечественные геодезисты применяли целенаправленно, как синоним для улучшения стиля изложения и в случаях, когда речь шла о влиянии на измерения отдельных причин, например о действии инструментальных погрешностей. Действие погрешностей в известных случаях может ослабляться, они могут не допускаться, что существенно отличает их от ошибок, неизбежных в результатах любых измерений даже при безупречном их выполнении.

Допускаю, что попытка исключения из геодезической литературы термина «ошибка измерения» принадлежит математикам. Пояснение термина погрешность в «Толковом словаре русского языка» под ред. Д.Н. Ушакова наводит на эту мысль. Но геодезия не чисто математическая наука, в которой отклонения от истины в расчетах и разработках происходят по причинам субъективных погрешностей. Картографо-геодезическое изучение поверхности Земли является главной задачей этой прикладной математической дисциплины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузьмин Б.С. О терминах «ошибка», «поправка», «точность» и «погрешность» / Б.С. Кузьмин // Геодезия и картография. – 1972. – № 8. – С. 21–23.
2. Кусов В.С. Термины «ошибка измерения» и «погрешность измерения» – не синонимы / В.С. Кусов // Геодезия и картография. – 1980. – №4. – С. 41–42.
3. Кузьмин Б.С. Еще раз о терминах «ошибка» и «погрешность» / Б.С. Кузьмин // Геодезия и картография. – 1983. – № 3. – С. 29–30.

© А.Н. Теплых, 2007

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИНДИКАТОРОВ ВЕСА НА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЕ МР-500

Важное место в нефтяной промышленности занимают приборы для определения натяжения неподвижного конца талевого каната при бурении и капитальном ремонте скважин. Одними из таких приборов являются индикаторы веса. В статье решалась задача выявления предельных отличий погрешностей приборов. Проведен анализ погрешностей индикаторов веса ГИВ6-М2 и ИВЭ-50 при помощи разрывной машины МР-500. Анализ включает в себя расчеты приведенных погрешностей приборов, рассмотрены их сравнительные характеристики. Машина разрывная МР-500 предназначена для статических испытаний на растяжение при нормальной температуре по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение». На разрывной машине МР-500 поверяют индикаторы веса и динамометры. Наибольшая предельная нагрузка 500 кН. Гидравлический индикатор веса ГИВ6-М2 предназначен для измерения и регистрации усилий натяжения неподвижного конца талевого каната при бурении и капитальном ремонте скважин. В зависимости от назначения индикатор выпускается в семи модификациях, различающихся типом трансформатора давления и составом вторичных приборов. Принцип действия индикатора основан на преобразовании усилия натяжения каната 2, преломленного между крайними опорами на корпусе 1 и средней опорой 3, опирающейся на мембрану 4, в давление в камере трансформатора и последующем его измерении манометром 5. Индикатор (рис. 1) состоит из трансформатора давления 3 и блока вторичных приборов 1, соединенных трубопроводом 2.

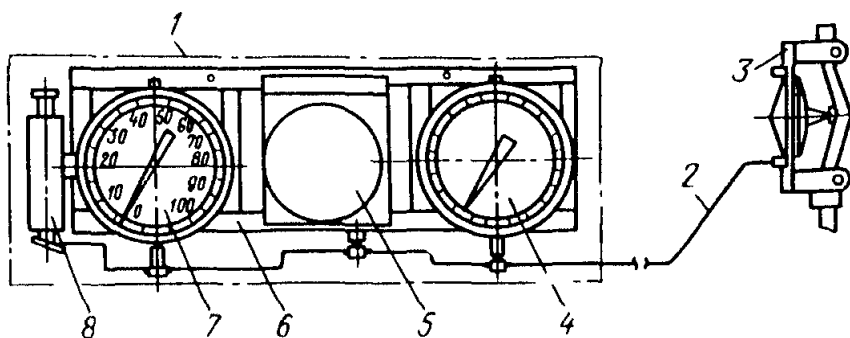


Рис. 1. Конструкция индикатора веса типа ГИВ6-М2

Трансформаторы давления используются в индикаторе двух типов, одинаковых по конструкции и различающихся эффективной площадью мембраны и расстоянием между крайними опорами и, следовательно, размерами составных частей.

Индикатор веса электронный ИВЭ-50 (динамометр) предназначен для применения во взрывоопасной зоне при регистрации параметров

спускоподъемных операций при капитальном и подземном ремонте скважин, в нефтяной и газовой промышленности и других отраслях народного хозяйства. Индикатор веса электронный ИВЭ-50 предназначен для измерения и регистрации стационарных и медленно меняющихся натяжений неподвижного конца талевого каната подъемников в процессе производимых работ.

Индикатор веса позволяет:

- Сигнализировать о предельных нагрузках, которые могут быть установлены в зависимости от характера выполняемой работы и типа подъемника (звуковая и световая сигнализация);
- Переписывать полученную информацию на жесткие и гибкие магнитные диски для создания базы данных;
- Вести подсчет количества нагружений на крюке подъемника за час, смену, год и т.д., а также учитывать время простоев бригады;
- Просмотреть на экране ПЭВМ гистограмму нагрузок в реальном масштабе времени.

Анализ включает в себя выявление отличий погрешностей и проведение сравнительных характеристик. Для этого исследуется пять гидравлических индикаторов веса ГИВ6-М2 и пять электронных индикаторов веса ИВЭ-50, имеющих одинаковую предельную погрешность, но отличающихся принципом определения силы. Рассматриваемые приборы настраиваются на канате Ø25 мм при определенных нагрузках. ГИВ6-М2 до 100 кН (10 т), а ИВЭ-50 до 600 кН (60 т) с талевой системой имеющей 3 подвижных ролика. Проводится расчет и определение абсолютной и приведенной погрешностей. Абсолютная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\Delta_i = \pm(P_{i \max} - P_{i \text{cp}}), \quad (1.1)$$

где $P_{i \max}$ – максимальное показание разрывной машины МР-500 в i -точке;
 $P_{i \text{cp}}$ – среднее значение показание в i -точке.

Приведенная погрешность рассчитывается:

$$\gamma_i = \pm \frac{\Delta_i}{P_{100\text{cp}}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где $P_{100\text{cp}}$ – среднее величина усилия натяжения каната на 100-м делении манометра [1].

Прибор №1

Рассчитаем абсолютную погрешность по формуле (1.1):

$$\begin{aligned} \Delta_{10} &= \pm(8.75 - 8.38) = \pm 0.38 \text{ (кН)}; \Delta_{20} = \pm(18.25 - 18.13) = \pm 0.13 \text{ (кН)}; \\ \Delta_{60} &= \pm(58.5 - 58.25) = \pm 0.25 \text{ (кН)}; \Delta_{80} = \pm(81.25 - 81.13) = \pm 0.13 \text{ (кН)}; \\ \Delta_{90} &= \pm(91.25 - 91.25) = \pm 0.25 \text{ (кН)}; \Delta_{100} = \pm(101.25 - 101.13) = \pm 0.13 \text{ (кН)}; \\ \Delta_{30} &= \Delta_{40} = \Delta_{50} = \Delta_{70} = 0 \text{ (кН)}. \end{aligned}$$

Рассчитаем приведенную погрешность по формуле (1.2):

$$\begin{aligned} \gamma_{10} &= \pm \frac{0.38}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.4\%; \\ \gamma_{20} &= \pm \frac{0.13}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.1\%; \end{aligned}$$

$$\gamma_{60} = \pm \frac{0.25}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{80} = \pm \frac{0.13}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.1\% ;$$

$$\gamma_{90} = \pm \frac{0.25}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{100} = \pm \frac{0.13}{101.13} \cdot 100\% = \pm 0.1\% ;$$

$$\gamma_{30} = \gamma_{40} = \gamma_{50} = \gamma_{70} = 0.$$

Максимальная приведенная погрешность $\pm 0.4\%$.

Для приборов № 2, № 3, № 4 и прибора № 5 абсолютную и приведенную погрешность рассчитаем аналогично. Для прибора № 2 максимальная приведенная погрешность $\pm 0.5\%$. Для прибора № 3 максимальная приведенная погрешность $\pm 0.5\%$. Для прибора № 4 максимальная приведенная погрешность $\pm 0.6\%$. Для прибора № 5 максимальная приведенная погрешность $\pm 0.4\%$. Наибольшая, рассчитанная для всех приборов ГИВ6-М2, основная приведенная погрешность равна $\pm 0.6\%$. Теперь проанализируем погрешность ИВЭ-50. Для того чтобы рассчитать приведенную погрешность воспользуемся формулой [2]:

$$\gamma_i = \pm \frac{\max[P_i - P_{oi} \cdot 2n]}{P_H \cdot 2n} \cdot 100\% , \quad (1.3)$$

где $\max[P_i - P_{oi} \cdot 2n]$ – максимальное значение абсолютной погрешности из всех циклов нагружения и разгружения, вычисленное, как разность значения P_i (величина усилия на индикаторе) и величины усилия P_{oi} , задаваемого на силоизмерительной машине для i -й точки измерения; n – количество подвижных роликов талевой системы подъемника; P_H – значение максимальной нагрузки, взятое из тарифовочной таблицы, установленное на силоизмерительной машине [3].

Прибор № 1

Рассчитаем приведенную погрешность, воспользовавшись формулой (1.3).

При первой нагрузке:

$$\gamma_{10} = \pm \frac{(60 - 59)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ; \gamma_{20} = \pm \frac{(120 - 118)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.3\% ;$$

$$\gamma_{30} = \pm \frac{(180 - 179)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ; \gamma_{40} = \pm \frac{(240 - 239)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{50} = \pm \frac{(300 - 299)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ; \gamma_{60} = \pm \frac{(360 - 359)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{70} = \pm \frac{(420 - 419)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ; \gamma_{80} = \pm \frac{(480 - 479)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{90} = \pm \frac{(540 - 539)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ; \gamma_{100} = \pm \frac{(600 - 599)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% .$$

При первой разгрузке:

$$\gamma_{10} = \pm \frac{(60 - 55)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.8\% ; \gamma_{20} = \pm \frac{(120 - 114)}{600} \cdot 100\% = \pm 1.0\% ;$$

$$\gamma_{30} = \pm \frac{(180 - 177)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.5\% ; \gamma_{40} = \pm \frac{(240 - 239)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\% ;$$

$$\gamma_{50} = \pm \frac{(300 - 300)}{600} \cdot 100\% = 0; \gamma_{60} = \pm \frac{(360 - 361)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.2\%;$$

$$\gamma_{70} = \pm \frac{(420 - 423)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.5\%; \gamma_{80} = \pm \frac{(480 - 484)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.7\%;$$

$$\gamma_{90} = \pm \frac{(540 - 544)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.7\%; \gamma_{100} = \pm \frac{(600 - 604)}{600} \cdot 100\% = \pm 0.7\%.$$

Далее для последующих нагрузок и разгрузок рассчитывается аналогично. По расчетным данным максимальная основная приведенная погрешность для прибора № 1 составляет $\pm 1\%$.

Для приборов № 2, № 3, № 4 и прибора № 5 приведенную погрешность рассчитаем аналогично. По расчетным данным максимальная основная приведенная погрешность для прибора № 2 составляет $\pm 0.8\%$, для прибора № 3 $\pm 1.2\%$, для прибора № 4 $\pm 0.8\%$, для прибора № 5 $\pm 1.0\%$. Таким образом, наибольшая для приборов ИВЭ-50 основная приведенная погрешность $\pm 1.2\%$.

По результатам работы был сделан следующий вывод:

– Индикатор веса электронный ИВЭ-50 при всех своих функциональных возможностях существенно уступает в достоверности результатов, так как имеет большую приведенную погрешность в отличие от гидравлического индикатора ГИВ6-М2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вишенков А.С. Методы и средства аттестации, поверки и испытаний силоизмерительных приборов / А.С. Вишенков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. –161 с.
2. Чаленко Н.С. Методы и средства измерения силы / Н.С. Чаленко. – М.: Изд-во стандартов, 1991. –136 с.
3. Министерство нефтяной промышленности. Типовые нормы времени на ремонт КИП в нефтяной промышленности. – М., 1987. –193 с.

© А.Н. Теплых, С.В. Хатюшин, 2007

**ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЁНКОЙ
ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ**

Пленочные течения жидкости широко используются в различных современных теплообменных аппаратах, системах термостабилизации и других устройствах различного назначения. Обладая малым термическим сопротивлением пленки жидкости обеспечивают перенос высоких плотностей теплового потока при малых температурных напорах. Как показывает анализ литературы [1–6], исследования теплообмена, развития кризисных явлений в стекающих пленках жидкости были проведены при стационарном тепловыделении. Известные экспериментальные исследования [1, 2] по изучению условий образования сухих пятен, развития кризисных явлений в тонких стекающих пленках проводились как на сильно недогретых жидкостях, так и при кипении насыщенной жидкости. Достаточно обширный анализ проведенных исследований в этом направлении представлен в монографии [3] и в обзорной работе [4]. Исследования, проведенные авторами [5] с использованием высокоскоростной термографии, показали, что при течении недогретых до температуры насыщения масел метастабильные регулярные структуры возникают в остаточном слое жидкости в период между прохождением крупных трехмерных волн. В работе [6] было обнаружено, что при испарении и кипении азота в ламинарно-волновом режиме течения после возникновения сухих пятен также формируются ячеистые структуры с крупномасштабными несмоченными зонами между регулярными струями жидкости. Работы по исследованию теплообмена, кризиса теплоотдачи при нестационарном тепловыделении при пленочном течении жидкости практически отсутствуют. В то же время выявление закономерностей развития процессов теплообмена при резком изменении во времени тепловой нагрузки необходимо для обеспечения безопасной, устойчивой работы теплообменных устройств с пульсациями теплового потока, при разработке малоинерционных испарителей, теплообменников-дозаторов, смесителей, специальных отборников в измерительном оборудовании, в том числе, в биотехнологиях, биомедицине, и т. д.

Целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей развития теплообмена при ступенчатом законе тепловыделения в ламинарно-волновых пленках жидкого азота.

Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена и динамики течения волновой плёнки криогенной жидкости подробно описана в [7]. Эксперименты проводились с использованием жидкого азота, подаваемого на экспериментальный участок на линии насыщения при атмосферном давлении. Жидкий азот из бака постоянного уровня жидкости через щелевой распределитель стекал по вертикальной пластине из дюралюминия шириной 75

мм и поступал на рабочий участок, представляющий собой вертикальную поверхность.

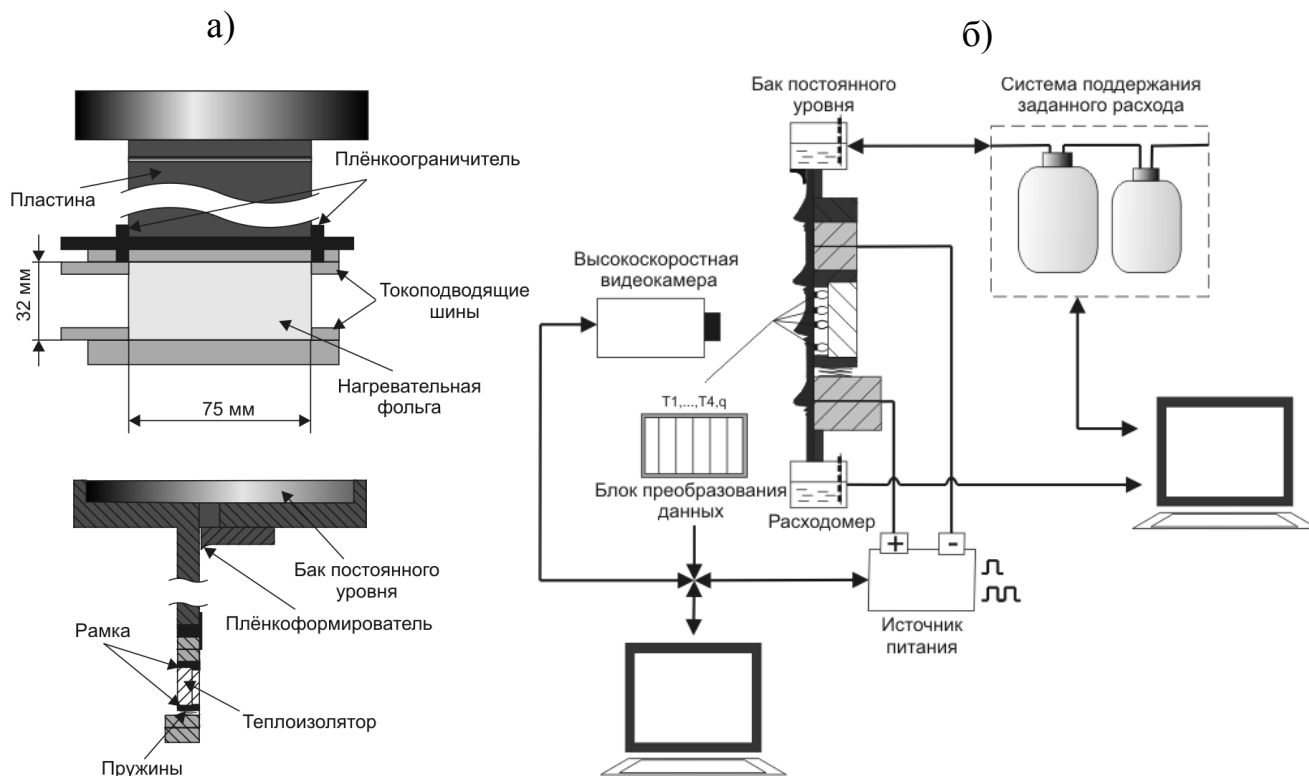


Рис. 1: а – схема экспериментального участка; б – блок-схема измерений и управления экспериментом

Исследование переходных процессов при волновом течении жидкого азота проводилось на рабочем участке, схематический вид которого представлен на рис. 1 а. Фольга из константана толщиной $25 \cdot 10^{-6}$ м и длиной $3.2 \cdot 10^{-2}$ м натягивалась на текстолитовую рамку при помощи двух пружин, размещённых в нижней части нагревателя. Тепловыделение на поверхности фольги осуществлялось пропусканием тока с использованием двух токоподводящих медных шин, расположенных на концах рабочего участка. Для обогрева использовался программируемый импульсный источник питания с фронтом нарастания тепловой нагрузки не более $3 \cdot 10^{-3}$ с. Температура теплоотдающей поверхности измерялась с помощью локальных платиновых термодатчиков сопротивления, абсолютная погрешность которых в области криогенных температур составляла ± 0.1 К. Температурные измерения, запись текущих значений напряжения и тока на экспериментальном участке, цифровая видеосъёмка были синхронизированы с моментом начала подачи тепловой нагрузки с помощью платы АЦП и программного пакета LabView (рис. 1 б).

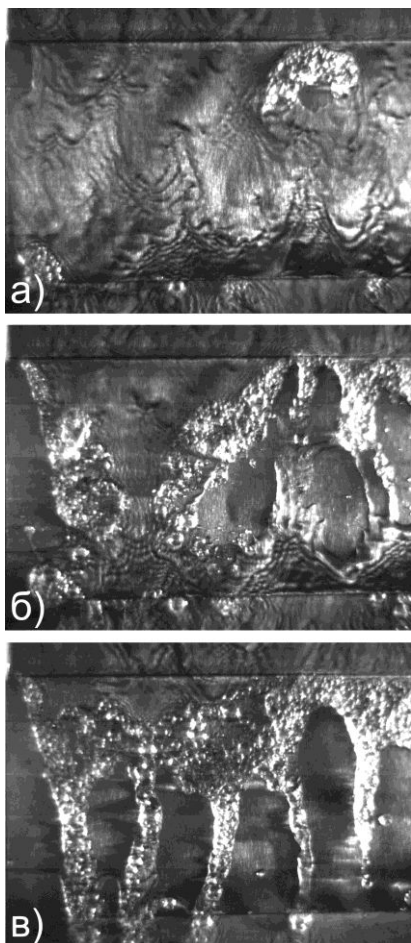


Рис. 2. Формирование метастабильных регулярных структур в плёнке:

$Re_{вх} = 847$, $q = 6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; а – $\tau = 0.074$, б – $\tau = 0.143$, в – $\tau = 0.362 \text{ с}$

особенностей, так как после возникновения локальных сухих пятен в несмоченных зонах происходит резкое увеличение температуры на теплоотдающей поверхности. В соответствии с [8], вытеснение смоченных зон при пленочном течении жидкости, обусловленное перемещением межфазных границ вследствие теплового механизма, происходит при превышении порогового значения теплового потока на тепловыделяющей поверхности, так называемого равновесного теплового потока. Достижение условий тепловой устойчивости фронта смачивания $q = q_{рав}$ зависит от граничных условий, включающих динамическую кривую теплообмена в его окрестности и характерную температуру на границе. Форма динамической кривой зависит от характера теплообмена в смоченной зоне, который в переходном процессе формирования струй различен во времени. Как было отмечено выше, на первой стадии теплообмен в струях осуществляется в режиме испарения жидкости. При развитии кипения в струях жидкости и изменении структуры двухфазного слоя в окрестности фронта смачивания, как следует из [6], коэффициент

Ниже приведены результаты по динамике развития процесса теплообмена в условиях ступенчатого тепловыделения при различных плотностях теплового потока и числах Рейнольдса на входе. При малых числах Рейнольдса и относительно небольших тепловых потоках распад пленочного течения жидкости происходит, как правило, в результате возникновения локальных сухих пятен в режиме испарения и быстрого распространения межфазных границ с вытеснением смоченных зон. При больших значениях числа Рейнольдса (рис.2 а, б, в) сухие пятна возникают при резком вскипании жидкости. Затем формируется регулярная структура со струями жидкости и крупномасштабными несмоченными зонами между ними. В работе проведено обобщение опытных данных по характерному размеру ячеистых структур – среднему расстоянию между центрами струй, в которых развивается кипение жидкости. Как было показано в [6], опытные данные при $T_n \sim \text{const}$ практически совпадают с пороговой длиной неустойчивости Релея-Тейлора $\tilde{\lambda}_{R-T} = 2\pi\Lambda$ во всей исследованной области чисел Рейнольдса, и характерные размеры при формировании ячеистых структур определяются гидродинамическими условиями. На тонкостенном нагревателе при граничном условии вдоль поверхности $q_n \sim \text{const}$ формирование регулярных структур имеет ряд

теплоотдачи резко возрастает. Это, очевидно, будет приводить к значительному росту порога тепловой устойчивости струй жидкости. Поэтому, на первом этапе часть возникающих струй вырождается с перераспределением полного расхода жидкости и увеличением локального расхода в других струях. В конечном итоге, устанавливается устойчивая структура течения, геометрические параметры которой определяются самоорганизацией данной существенно неравновесной системы, и решающую роль в которой играют автоволновые процессы.

При высоких тепловых потоках механизм распада пленки жидкости принципиально иной. В процессе нестационарного прогрева происходит резкое вскипание жидкости по всей тепловыделяющей поверхности в узком временном интервале. Быстрый рост паровых пузырей приводит к диспергированию жидкости и выбросу большого количества мелких капель.

На рис. 3 приведены опытные данные по времени ожидания вскипания в зависимости от плотности теплового потока. Точки 2, 3 на рисунке соответствуют результатам расчета времени достижения температуры закипания в приближении роста температуры теплоотдающей поверхности в

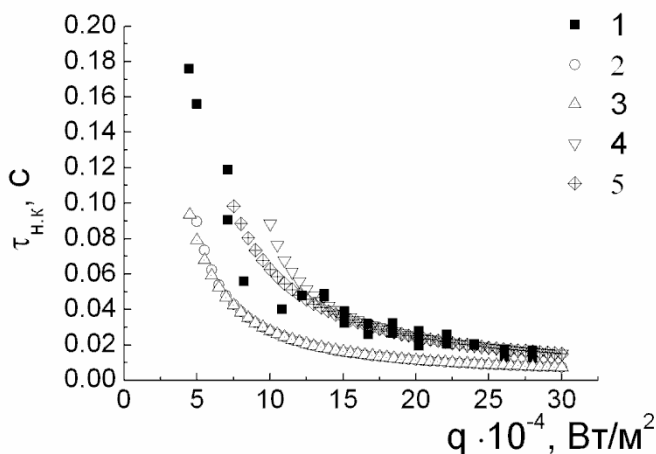


Рис. 3. Времена ожидания вскипания при $P_{\text{нас.}} = 0.1 \text{ МПа}$. $Re_{\text{вх}} = 847$.

1 – опытные данные; 2, 3 – расчет $\tau_{н.к}$ при $a = a_{\text{конд}}$ для $\delta = \delta_{\text{ост}}$, $\delta = \delta_{\text{макс}} = \delta_{\text{гр.в}}$, соответственно; 4, 5 – расчет $\tau_{н.к}$ при $a = a_{\text{эфф.конв}} = 2.23a_{\text{конд}}$ для $\delta = \delta_{\text{ост}}$, $\delta = \delta_{\text{макс}} = \delta_{\text{гр.в}}$, соответственно

режиме нестационарной теплопроводности с учетом тепловой инерционности нагревателя и испарения со свободной поверхности плёнки жидкости. Расчет проведен в условиях закипания при гомогенном зародышеобразовании ($\Delta T_{н.к} = \Delta T_{пр} = 26\text{К}$) для различных зон волновой плёнки. На рисунке так же представлены результаты расчётов, проведённых с учётом конвективного теплообмена (точки 4, 5). Величина эффективного коэффициента конвективной составляющей теплообмена $a_{\text{эфф.конв}}$ определялась с использованием среднестатистических волновых характеристик в соответствии с

[7]. Из сравнения полученных зависимостей с опытными данными видно, что при определении времени ожидания вскипания необходимо учитывать влияние конвективной составляющей теплообмена.

Границы стадий нестационарной теплопроводности до момента закипания, формирования регулярных структур ($\tau_{ф.с}$) и вытеснения струй жидкости до полного осушения теплоотдающей поверхности ($\tau_{н.осуш}$) в зависимости от степени орошения и плотности теплового потока представлены на рис. 4.

Вертикальные пунктирные линии соответствуют критическим плотностям тепловых потоков, при которых на теплоотдающей поверхности возникают стабильные сухие пятна ($q_{c.n}$) и развивается кризис осушения с полным вытеснением струй жидкости ($q_{кр.осуш}$). Линия 8 ограничивает справа область тепловых потоков $q_{хар}$, при которых до момента полного осушения реализуется режим метастабильных регулярных структур с кипящими струями жидкости и крупномасштабными несмоченными зонами между ними (рис.2 в). Более раннее полное осушение теплоотдающей поверхности при высоких числах Рейнольдса относительно расчетной зависимости для полного испарения пленки жидкости связано с значительным выбросом капель при вскипании.

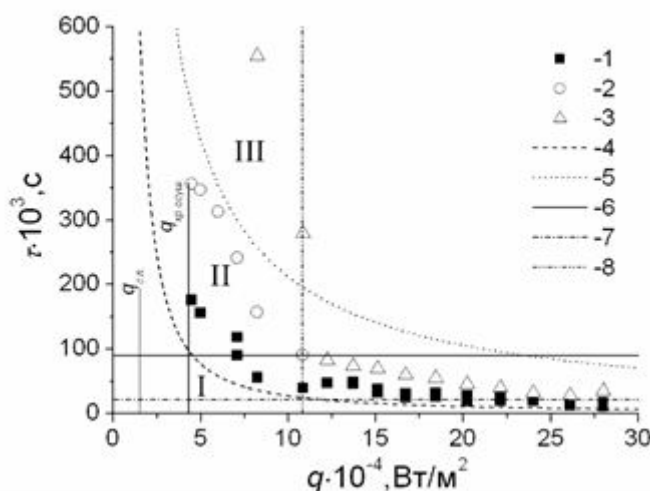


Рис. 4. Зависимость характерных времен развития процесса от плотности теплового потока.

$Re_{вх} = 847$; I, II – стадии прогрева в пленке жидкости до вскипания и развития регулярных структур; III – стадия вытеснения струй жидкости до полного осушения. 1 – $\tau_{н.к}$; 2 – $\tau_{ф.с}$; 3 – $\tau_{п.осуш}$; 4 – расчет $\tau_{н.к}$; 5 – расчет $\tau_{п.исп}^{cp}$ по средней толщине пленки $\delta = \delta_{ср}$; 6, 7 – расчеты $\tau_{тепл}$ при $\delta = \delta_{макс} = \delta_{ср.в}$, $\delta = \delta_{ост}$ соответственно; 8 – $q_{хар}$.

Впервые вскрыты закономерности динамики развития теплообмена и кризисных явлений в стекающих волновых плёнках жидкости при нестационарном тепловыделении. Получены принципиально новые результаты по выявлению механизмов распада плёночного течения жидкости, формирования переходных структур, классификации нестационарных режимов теплообмена и определению их границ при интенсивных набросах тепла. Показано, что при малых тепловых потоках в кризисных режимах в условиях ступенчатого наброса тепла распад ламинарно-волновой плёнки жидкости происходит с возникновением метастабильных регулярных структур, поперечный размер которых определяется порогом тепловой устойчивости подвижных границ смачивания в процессе самоорганизации системы с возникающими кипящими и испаряющимися струями и несмоченными зонами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-18022-а) и Интеграционного проекта СО РАН совместно с УрО РАН (№ 2.5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fujita T., Ueda T. Heat transfer to falling liquid films and film breakdown-I // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1978. V. 21. P. 97–108.
2. Mudawar I.A., Incropera T.A. and Incropera F.P. Boiling heat transfer and critical heat flux in liquid film falling on vertically-mounted heat sources // Int. J. Heat Mass Transfer. 1987. V.30. P. 2083–2095.
3. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – 232 с.
4. Katto Y. Critical heat flux // Int. J. Multiphase Flow. 1994. V. 20. P. 53–90.
5. Lel V., Stadler H., Pavlenko A., Kneer R. Evolution of metastable quasi-regular structures in heated wavy liquid films // J. Heat and Mass Transfer. 2007. V.43. № 4. P. 1311–1320.
6. Pavlenko A.N., Lel V.V. Heat transfer and crisis phenomena in falling films of cryogenic liquid // Russ. J. of Eng. Thermophysics. 1997. V. 7. № 3–4. P. 177–210.
7. Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых жидкости / Павленко А.Н., Мацех А.М., Печёркин В.В., Кнеер Р., Лель В.В., Суртаев А.С. // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, № 1. – С. 93–105.
8. Мацех А.М. Особенности теплообмена и кризисных явлений в стекающих плёнках криогенной жидкости / А.М. Мацех, А.Н. Павленко // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 1. – С. 105–119.

© А.Н. Павленко, А.С. Суртаев, А.Н. Чернявский, О.А. Володин, 2007

УДК 681.3

Н.И. Печеркин, А.Н. Павленко, В.Ю. Чехович, В.Е. Жуков, А.Ф. Серов, А.Д. Назаров
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, СО РАН, Новосибирск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В МИНИКАНАЛАХ

Каналы с некруглым поперечным сечением широко используются для охлаждения оборудования в энергетике, микроэлектронике, криогенике, авиационной и космической технике, химической технологии и многих других приложениях. Они охватывают широкий диапазон размеров от единиц и десятков микрометров до нескольких миллиметров. Чем меньше размер канала, тем больше особенностей и отличий наблюдается в закономерностях теплообмена и гидравлического сопротивления по сравнению с каналами обычных размеров. Это справедливо как для течения однофазных жидкостей, так и для двухфазных течений, включая фазовые переходы. В углах прямоугольных каналов силы поверхностного натяжения оказывают существенное влияние на формирование границы раздела, что приводит к отличию течения в них по сравнению с круглыми трубами. Если расстояние между стенками сравнимо с капиллярной постоянной, то жидкость с широкой стороны канала перетекает в углы, образуя мениски [1]. Течение потока газа вдоль поверхности раздела существенно изменяет волновой профиль поверхности, амплитудно-частотные характеристики и влияет на устойчивость

течения. Однонаправленное опускное течение позволяет достичь высоких скоростей пара без возникновения режимов захлебывания, что приводит к увеличению производительности теплообменных аппаратов. При спутном течении уменьшается минимальная толщина плёнки, и на волновой поверхности пленки появляются высокочастотные осцилляции, интенсифицируя межфазный теплообмен [2].

В данной работе проведено исследование опускного течения жидкого азота в вертикальном прямоугольном канале размером $2.6 \times 7.1 \text{ мм}^2$. Изучалось течение пленки жидкости, как со спутным потоком пара, так и без него. Для исследования режимов течения использовались визуализация, фото- и видеосъемка на стенках канала и в поперечном сечении, проведены измерения локальной толщины пленки на широкой и узкой стенках канала емкостным методом [3].

Исследования проводились в оптическом криостате, на боковой поверхности которого были расположены четыре окна. Одно окно было установлено на верхней крышке криостата. Жидкий азот подводился к

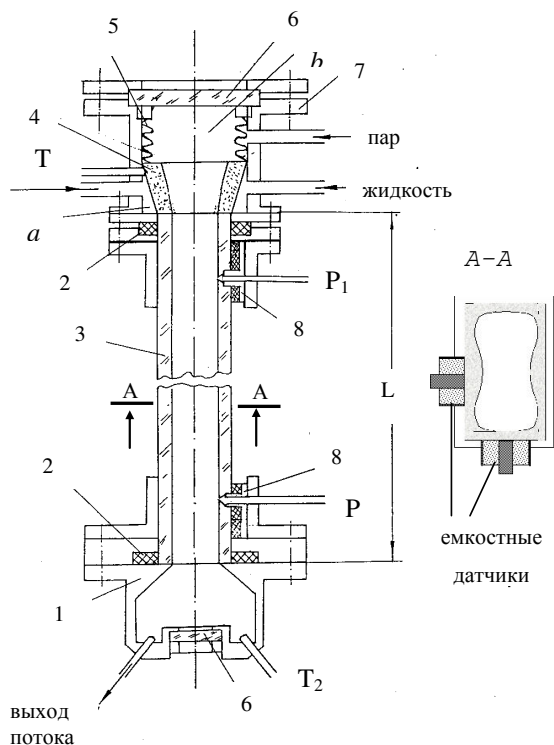


Рис. 2. Рабочий участок

рабочему участку из сосуда Дьюара через бак постоянного напора. Постоянный уровень в баке поддерживался с точностью $\pm 1 \text{ мм}$. Из бака постоянного напора жидкий азот поступал по теплоизолированному трубопроводу в верхнюю камеру рабочего участка. Для обеспечения равномерного орошения стенок канала жидкость подавалась через пористую вставку.

Газообразный азот из баллона высокого давления через расходомер поступал в теплообменник, погруженный в жидкий азот. Там он охлаждался до температуры жидкого азота и затем также поступал в верхнюю камеру рабочего участка. Стенки рабочего участка были изготовлены из оргстекла, рис. 2. Для наблюдения и фотосъемки в поперечном сечении в верхней и

нижней камерах рабочего участка были установлены окна из оптического стекла. Подсветка канала осуществлялась через боковые окна криостата. Для измерения толщины пленки на широкой и узкой стенках канала были установлены два емкостных датчика. Центральный электрод датчика был изготовлен из платиновой проволоки диаметром 0.45 мм , вваренной в стеклянный капилляр. Внешний электрод представлял собой трубку из нержавеющей стали наружным диаметром 2 мм . Датчики установлены на

расстоянии 200 мм от входа в участок, общая длина канала была 250 мм. Точность измерения толщины пленки в диапазоне до 500 мкм была не хуже 5 %.

Эксперименты проведены при атмосферном давлении. Диапазон чисел Рейнольдса жидкой фазы изменялся от 200 до 2 000, паровой фазы – от 0 до 20 000.

При низких расходах в отсутствие потока пара жидкость течет в виде пленки с почти гладкой поверхностью, на которой имеются волны малой амплитуды и частоты. Основная часть жидкости течет в углах канала, рис. 3. Для течения чистой жидкости и при небольшом расходе пара на широкой стенке

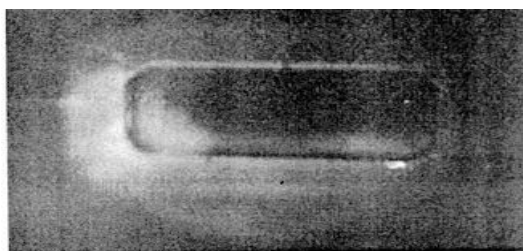
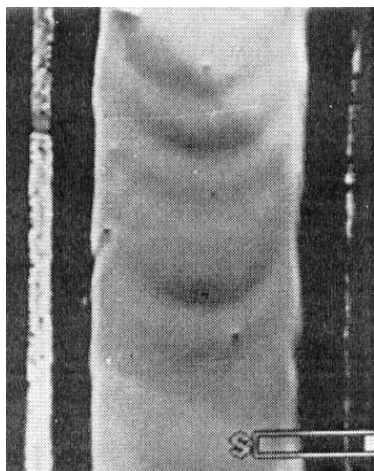


Рис. 3. Визуализация поверхности пленки на стенке 1 в поперечном сечении. $Re_L = 500$.

канала всегда наблюдались волны U-образной формы. При больших расходах жидкости U-образная форма волн на широкой стороне канала сохранялась, но частота следования волн становилась выше. При малых расходах жидкости, до чисел Рейнольдса $700 \div 800$, течение пленки на широкой и узкой стенках являются независимыми, каждое со своими волновыми характеристиками и средней толщиной пленки. Поэтому действительные локальные числа Рейнольдса пленок на широкой и узкой стенках будут отличаться от числа Рейнольдса, рассчитанного по приведенной скорости жидкости.

Когда число Рейнольдса жидкой фазы становится 1 000 и выше, течения на широкой и узкой стенках становятся взаимосвязанными. Началу этого процесса предшествует перенос части жидкости с узкой стороны на широкую волнами большой амплитуды. Вследствие этого и на широкой стороне канала практически одновременно появляются волны большой амплитуды. На рис. 4 показаны результаты измерения средней толщины пленки. При малых расходах жидкости толщина пленки на узкой и широкой стенках примерно одинакова. Далее при увеличении расхода толщина пленки на узкой стенке растет значительно быстрее, чем на широкой, и при максимальных расходах в 2–3 раза превышает последнюю. Такое

расхождение вызвано перетеканием части жидкости с широкой стенки в углы

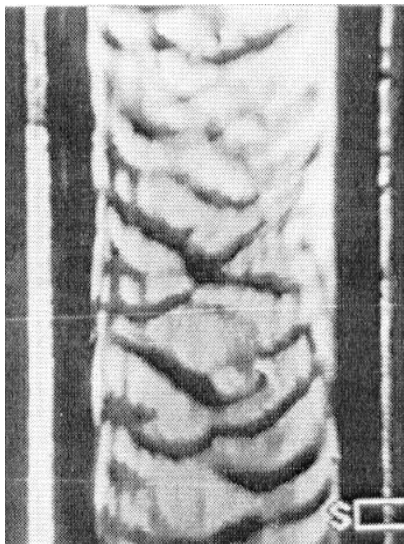


Рис. 5. Волновая поверхность пленки и распределение жидкости по периметру. $Re_L = 500$, $Re_v = 15\,000$

канала под действием сил поверхностного натяжения. По мере заполнения углов канала мениски сливаются, и далее средняя толщина пленки на узкой стенке быстро возрастает. Сравнение толщины пленки на широкой стенке с расчетом по теории Нуссельта для гладкой пластины показывает, что реальная толщина пленки становится более чем в два раза ниже расчетной.

Наблюдения и измерения толщины плёнки показывают, что значительное влияние пара на структуру течения в канале начинается при скоростях, соответствующих числу Рейнольдса паровой фазы выше 10 000. При этих условиях поперечный размер волн уменьшается, и на широкой стенке укладывается 2–3 волны. Наличие спутного потока пара приводит к значительным колебаниям толщины плёнки на узкой стенке канала. При больших скоростях парового потока ($Re_v > 15\,000$), поверхность раздела становится покрытой мелкой рябью, и плёнка жидкости равномерно распределяется по периметру

канала, а в ядре потока видны капли жидкости, рис. 5. Волны на широкой и узкой стенках взаимодействуют друг с другом, возникают катящиеся волны большой амплитуды, которые иногда перекрывают всё сечение канала. Поперечный размер волн на широкой стенке уменьшается, и частота волн увеличивается. Волны большой амплитуды способствуют переносу жидкости с одной стенки на другую. Под действием высокоскоростного потока пара толщина плёнки выравнивается по периметру при переходе к дисперсно-кольцевому течению.

Анализ волновых спектров показывает, что спутный поток пара ускоряет переход к стохастическому волновому процессу и увеличивает амплитуду пульсаций. До значения числа Рейнольдса паровой фазы $Re_v = 10\,000$ на узкой стенке наблюдаются волны с характерными частотами, но колебания толщины плёнки на широкой и на узкой стенках независимы. Для режима $Re_L = 500$ and $Re_v > 10\,000$ наблюдается переход к связанным стохастическим колебаниям на широкой и на узкой стенках, рис. 6. Для течения плёнки жидкости без пара такой переход наблюдается при больших расходах жидкости. С увеличением скорости пара вклад длинных волн уменьшается, а коротких увеличивается. Амплитуда волн на узкой стенке в 2–3 раза выше амплитуды на широкой стенке.

Получены экспериментальные данные по характеристикам волнового пленочного течения жидкого азота при спутном течении пара в узком прямоугольном канале. С использованием фотосъемки получены профили распределения толщины пленки жидкого азота по периметру канала при различных режимных параметрах. Показано, что при малых скоростях пара и малой плотности орошения жидкости на входе в прямоугольный канал величины толщины пленки жидкости на широкой и узкой сторонах существенно различаются. При увеличении числа Рейнольдса жидкости средняя толщина пленки на узкой стороне может более чем в три раза быть выше средней толщины пленки жидкости на широкой стороне.

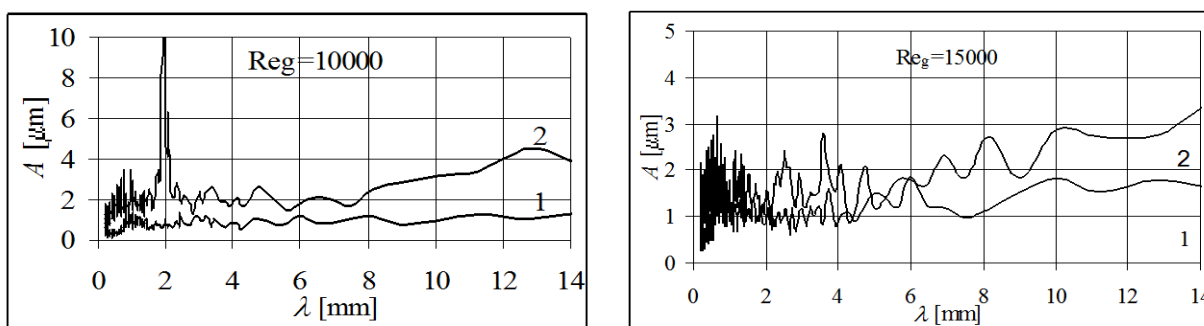


Рис. 6. Амплитудно-волновой спектр для однонаправленного течения пара и жидкости в канале. $Re_L = 500$; 1 – широкая стенка; 2 – узкая стенка

С увеличением толщины пленки крупные волны на узкой стороне канала вызывают развитие высокоамплитудных колебаний мгновенной толщины пленки и на широкой стороне прямоугольного канала. При увеличении расхода пара при спутном течении характеристики амплитудно-волнового спектра толщины пленки жидкости на узкой и широкой сторонах канала сближаются. При этом происходит выравнивание осредненной по времени толщины пленки жидкого азота по периметру прямоугольного канала.

Обозначения

A – амплитуда, мкм;

a, b – размеры прямоугольного канала, м;

$d = 2ab/(a+b)$ – эквивалентный гидравлический диаметр, м;

H – толщина плёнки жидкости, мм;

$Re = Vd/\nu$ – число Рейнольдса;

V – приведённая скорость, м/с;

Греческие символы

λ – длина волны, мм;

ИНДЕКСЫ

L – жидкая фаза;

V – паровая фаза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kuznetsov V.V., et al. Capillary Controlled Two-Phase Flow in Rectangular Channel // Proc. Int. Conf. On Compact Heat Exchangers for the Process Industries, Snowbird, Utah, 1997. pp. 291-303.

2. Кулов Н.Н. О некоторых проблемах разделения смесей / Н.Н. Кулов // Теорет. основы хим. технологии. – 2007. – Т. 41, № 1. – С. 3–15.
3. Емкостный измеритель локальной толщины плёнки жидкости / С.В. Кротов и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1997. – № 1. – С. 149–152.

© Н.И. Печеркин, А.Н. Павленко, В.Ю. Чехович, В.Е. Жуков, А.Ф. Серов, А.Д. Назаров, 2007

УДК 532.529: 537.528

В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев, А.П. Дрожжин

ИГиЛ СО РАН, Новосибирск

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ НА МНОЖЕСТВЕННЫХ КОНЦЕНТРАТОРАХ ТОКА

Введение

В данной работе представлены результаты исследований самосинхронизации автоколебаний тока в электролите, как сложного электрогидродинамического процесса. В работе рассматриваются механизмы возможных методов управления режимами синхронизации многоэлементных систем. Рассматриваются примеры возможного использования обнаруженного эффекта.

В работах [1, 2] было показано, что в электролите на одиночном концентраторе тока, представляющим собой отверстие в диэлектрической пластине, расположенной между металлическими электродами, развиваются электрогидродинамические автоколебательные процессы, пульсации тока и пузырька. Аналогичные процессы развиваются и на металлических концентраторах тока. Автоколебательные процессы развиваются в определенной (предпробойной) области напряжений, в области гетерогенного и гомогенного вскипания жидкости при электрическом нагреве.

Предполагалось, что изготовление концентраторов тока с одинаковыми размерами позволит получить синхронные автоколебания на множественных концентраторах тока, подключенных параллельно [3], что соответствовало бы синхронным пульсациям пузырьков на концентраторах. Однако, испытания таких устройств показали, что при достаточно высококачественном изготовлении одинаковых отверстий или металлических электродов в начале эксплуатации обеспечивается синхронность автоколебаний только в пределах нескольких десятков импульсов тока. То есть, в процессе эксплуатации таких устройств синхронный автоколебательный режим переходит в стохастический режим с биениями на суммарных токовых осциллограммах. В данном случае динамика пульсаций тока является косвенной характеристикой гидродинамических процессов расширения и захлопывания пузырьков на концентраторах тока [2, 3]. Анализ и скоростная киносъемка многоочаговых разрядных систем показали, что развитие стохастичности электрогидродинамических процессов на N концентраторах тока происходит за счет исходной и динамической дисперсии размеров концентраторов тока. В данной работе рассмотрен метод обеспечивающий самосинхронизацию на множественных концентраторах тока с широкой дисперсией по размерам исходных концентраторов тока.

Постановка экспериментов

На рис. 1 представлена принципиальная схема постановки экспериментов. На рис. 1а показана электрическая схема, которая состояла из заряжаемого до необходимого напряжения U конденсатора $C = 2\text{--}100\text{ мкФ}$, дополнительно включаемой индуктивности $L = 0,05\text{--}7,7\text{ мН}$, механического коммутатора K и шунта R , к которому подключался цифровой осциллограф TDS 210, данные с которого записывались на персональный компьютер. В экспериментах осуществлялась теньевая киносъемка с применением скоростной цифровой видеокамеры. В качестве электролита использовались водные растворы поваренной соли с концентрацией 0,5–20 %. Испытывались три схемы концентраторов тока: 1) с диафрагмами (рис. 1а), 2) с металлическими электродами на диэлектрической стенке (рис. 1б), 3) с удлиненными изолированными металлическими электродами с токопроводящим срезом на торце (рис. 1в). Свечение регистрировалось с помощью ФЭУ–35 (спектральный диапазон 300–600 нм).

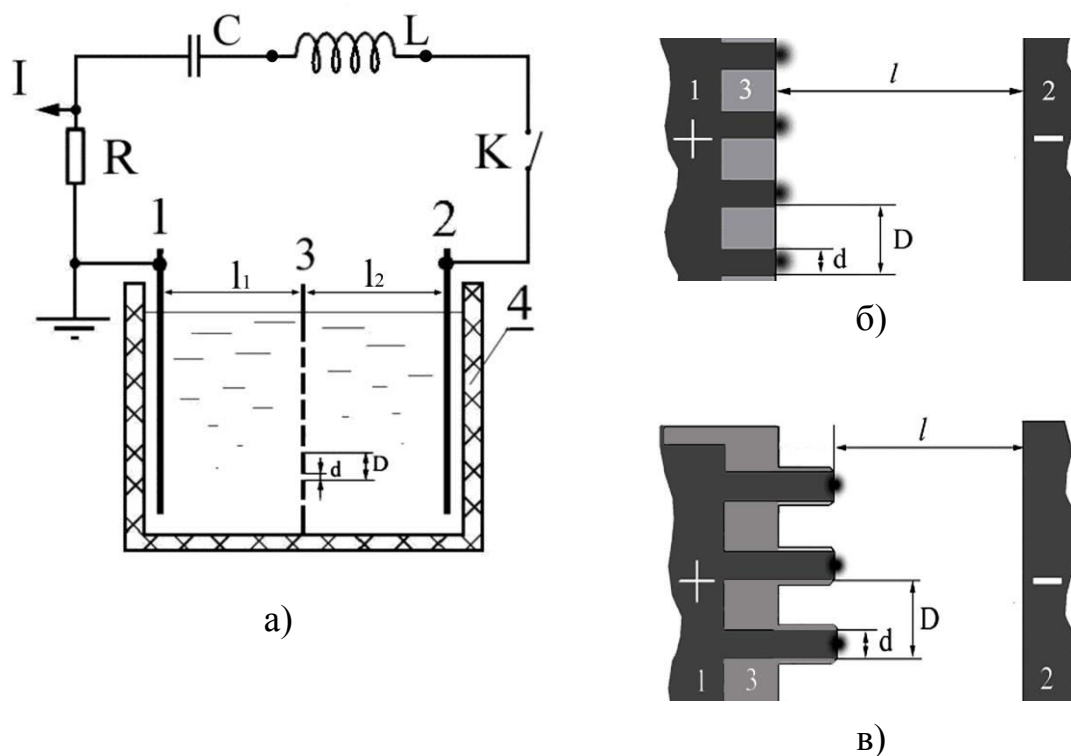


Рис. 1. Принципиальная схема постановки экспериментов:

а) концентраторы тока в виде отверстий в диэлектрической пленке, б) с металлическими токовыми концентраторами, в) с удлиненными металлическими концентраторами: 1, 2 – металлические электроды, 3 – диэлектрик, 4 – кювета с электролитом, d – диаметр концентратора, D – расстояние между концентраторами, l_1 , l_2 – расстояние между электродами и диафрагмой, l – расстояние между электродами

В данной работе представлены результаты методической разработки по формированию процессов синхронных автоциклических режимов на 2, 5, 16, 32, 56 концентраторах тока в условиях начального разброса по размерам используемых концентраторов, и после их длительной эксплуатации в режиме пробоев.

В основе постановки экспериментов была заложена идея сравнения динамики развития электрогидродинамических процессов на концентраторах тока разного диаметра для двух режимов: а) без дополнительной индуктивности в общей разрядной цепи, б) с одной дополнительной индуктивностью L в общей разрядной цепи ($L \gg L_0$, $L_0 = 5 \text{ мкН}$ – собственная индуктивность установки).

Результаты экспериментов. На рис 2 представлена теневая кинограмма процесса генерации и пульсации пузырька на одном отверстии.

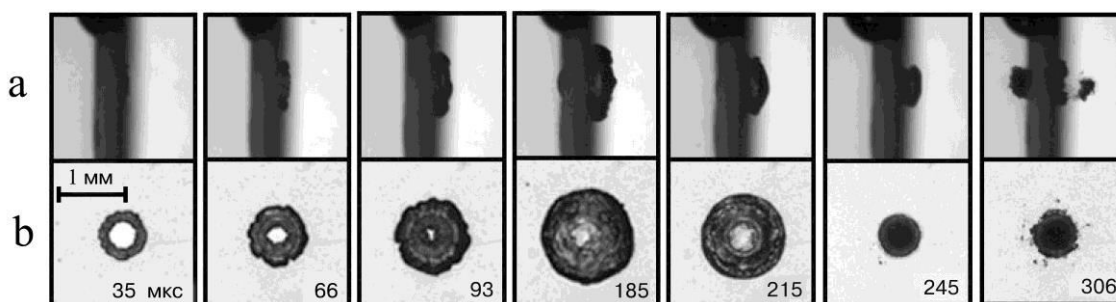


Рис. 2. Кинограмма образования и пульсаций пузырька на отверстии диафрагмы $d = 0,6 \text{ мм}$. (а-вид сбоку, б-вид с торца)

На рис. 3 представлены результаты измерений тока I и напряжения U для экспериментов в постановке (1а) для двух отверстий в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 5 %, без индуктивности (а) и с дополнительной индуктивностью (б).

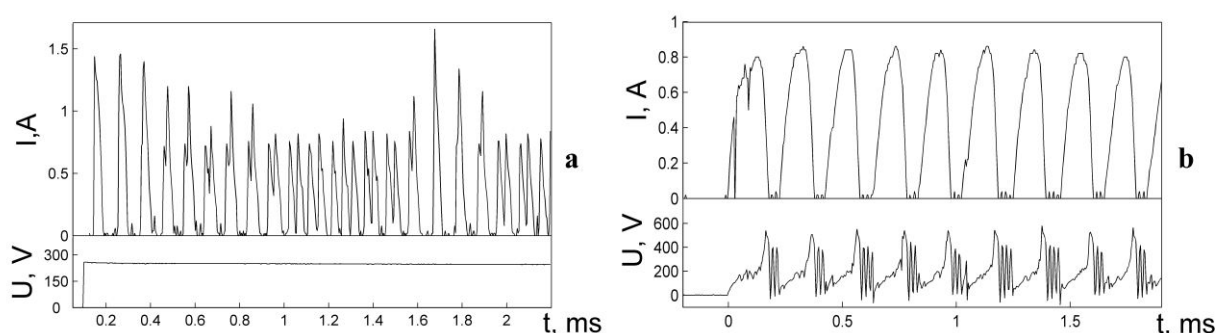


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения для концентраторов тока в виде двух отверстий ($d_1 = 0,26 \text{ мм}$, $d_2 = 0,28 \text{ мм}$) в тефлоновой пленке толщиной 20 мкм :

а) без индуктивности, $U_C = 240 \text{ В}$; б) с индуктивностью $L = 7,7 \text{ мН}$, $U_C = 200 \text{ В}$.

На рис. 4 представлены результаты измерений тока I и напряжения U для экспериментов в постановке (1б) для 32-х концентраторов тока. Эксперименты проводились в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 1 %, без индуктивности (а) и с дополнительной индуктивностью (б).

Для постановок (1а) и (1б) осуществлялась одновременная регистрация тока и теньевая киносъемка гидродинамических процессов в области электрического пробоя. Из результатов киносъемки и осциллограмм тока следует, что при включении в разрядную цепь дополнительной индуктивности наблюдается выравнивание фаз пульсаций всех пузырьков в корреляции с импульсами суммарного тока.

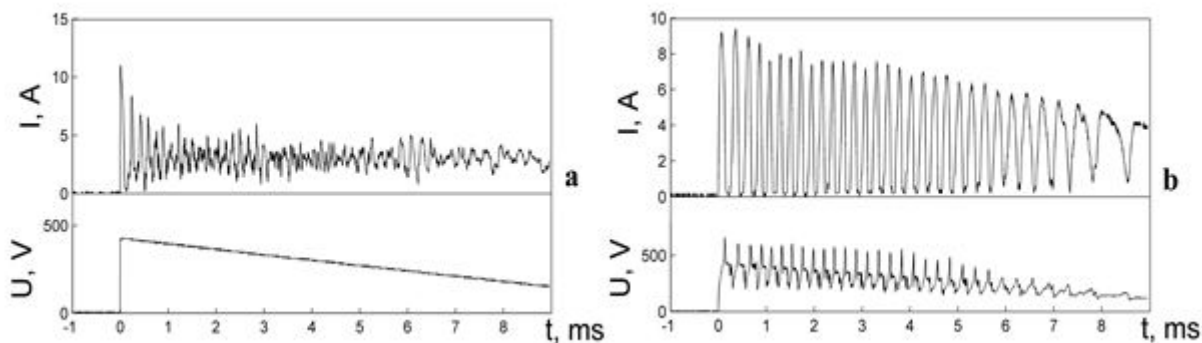


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения для 32-х концентраторов тока в виде срезов из стальных проволочек $d = 0,4 \text{ mm}$, выполненных заподлицо в пластине из эпоксидной смолы

а) без индуктивности, $U_C = 400 \text{ V}$, б) с индуктивностью $L = 0,8 \text{ mH}$, $U_C = 400 \text{ V}$

Результаты экспериментов показали, что фазовая синхронизация обеспечивается использованием дополнительной индуктивности для широкого диапазона значений дисперсии по размерам концентраторов тока. Из представленных осциллограмм наглядно следует, что для различных видов концентраторов тока и варьируемого их числа наблюдается общая закономерность изменения динамики суммарного тока с включением в электрическую цепь индуктивности L . С подключением дополнительной индуктивности L в разрядную цепь стохастический режим колебаний суммарного тока переходит в синхронный. Смена режимов колебаний тока можно объяснить с помощью представленных осциллограмм напряжения. Из данных экспериментальных результатов следует, что в периоды спада и роста тока в цепи генерируются импульсы избыточного напряжения U_L , которые могут превышать напряжение U_C на конденсаторе в каждом периоде пульсации пузырьков и тока. Величина избыточного напряжения определяется как

$$U_L = -L \sum_i dI_i/dt. \quad (1)$$

Индуктивность L мы задаем, а величина dI_i/dt определяется скоростью размыкания и замыкания электрической цепи на i -ом концентраторе, т.е. скоростью границы пузырька в периоды его расширения и захлопывания, в моменты пересечения его границей периметра концентратора тока. Именно это избыточное напряжение U_L обеспечивает синхронизацию инициирования кольцевых разрядов-пробоев между расширяющимися и захлопывающимися пузырьками. Для подтверждения этого факта осуществлялась регистрация света из области пробоев с помощью ФЭУ-35. Эксперименты показали корреляцию во времени и по амплитудам импульсов избыточного напряжения и импульсов света.

Учитывая, что период пульсаций пузырьков пропорционален диаметру концентратора, можно предполагать, что в начальной стадии развивается каскадный процесс инициирования пробоев, начиная с концентратора тока наименьшего размера. С увеличением числа концентраторов частотный режим электрогидродинамических автоколебательных циклов начинают определять концентраторы тока, имеющие среднестатистические размеры. С увеличением индуктивности и числа концентраторов увеличивается избыточное напряжение U_L , что приводит к синхронному инициированию пробоев на всех концентраторах.

Увеличение числа концентраторов тока приводит к снижению величины необходимой индуктивности для развития самосинхронизации, что согласуется с формулой (1). Следовательно, для каждого цикла существует пороговое значение инициирующего напряжения (U_P), которое определяется как:

$$U_P(t) = U_C(t) + U_L(t).$$

Для данных экспериментов средние пороговые значения развития самосинхронизации U_P составляли $\sim 2U_C$. Особо следует отметить, что существенное превышение U_L (в десятки раз) над пороговыми значениями U_C не ухудшало степени синхронизации.

Качество фазовой синхронизации можно оценивать с помощью следующего параметра:

$$K_S = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}, \quad (2)$$

где $I_{\max}$, $I_{\min}$ – максимальное и минимальное значения тока в одном цикле, определяемые по осциллограммам тока. Если в цикле падение тока до нуля не осуществляется, то это означает, что произошел сбой фаз на n концентраторах тока, и синхронизация обеспечивается только на $N-n$ концентраторах. Значение $K_S = 1$ соответствует наилучшей синхронизации.

Рассматриваются возможности использования описанного эффекта в области акустики, в спектроскопии жидкостей, в прикладной электрогидродинамике. В качестве примеров рассматриваются механизмы векторной инъекции жидкости (рис. 2), и перспективы приложений для стерилизации промышленных биологических отходов.

Выводы:

1. Экспериментально обнаружен эффект самосинхронизации электрогидродинамических автоколебательных процессов для многоочаговых разрядов в электролите;
2. Показана принципиальная возможность генерации стабильных электрогидродинамических автоколебательных процессов на множественных концентраторах тока с относительной дисперсией по размерам до 0,37, с помощью включения в разрядную цепь индуктивности;
3. Показано, что взаимная синхронизация электрогидродинамических автоколебательных процессов обеспечивается путем генерации импульсов избыточного напряжения в цепи разряда по законам самоиндукции, за счет разрыва тока пузырьками;
4. Обоснована возможность применения обнаруженного эффекта для стерилизации жидкостей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: № 05-08-18145, № 06-02-17453).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тесленко В.С. [Текст] / В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, А.М. Карташов // Письма в ЖТФ. – Т. 27, № 20. – 2001. – С. 83–88.
2. Тесленко В.С. [Электронный ресурс] / В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Г.Н. Санкин // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 4. – Режим доступа: <http://www.ioffe.ru/journals/pjtf/2006/04/p24-31.pdf>
3. Тесленко В.С. Динамика сплошной среды. [Электронный ресурс] сб. науч. тр. Ин-т гидродинамики СО РАН. 2005. Вып.123. – Режим доступа: <http://swsl.newmail.ru/publ/e-a-effect.pdf>

© В.С. Тесленко, Р.Н. Медведев, А.П. Дрожжин, 2007

УДК 536.42

В.В. Кузнецов, А.С. Шамирзаев

ИТ СО РАН, Новосибирск

РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ ХЛАДОНА R318C В КОЛЬЦЕВОМ ОБОГРЕВАЕМОМ МИНИКАНАЛЕ

Кольцевые каналы нашли широкое применение в двухфазных теплообменниках и системах охлаждения. Каналы малого размера имеют существенные преимущества, такие как высокая плотность теплообменной поверхности и компактные размеры. В таких устройствах процессы зарождения, развития и движения паровой фазы при кипении происходят в «стеснённых» условиях, при этом действие капиллярных сил очень важно и оно определяет режим течения и характер теплообмена.

Целью данной работы является исследование теплообмена при кипении хладона R318C в узком кольцевом канале с внутренним обогревом в условиях вынужденного течения. Представлены данные по локальным коэффициентам теплообмена и режимам течения. Выделены режимы пузырькового кипения и испарения в тонких плёнках жидкости.

Структура парожидкостного потока

Кипение при вынужденном течении в стеснённых условиях характеризуется значительным влиянием капиллярных сил на структуру потока. При кипении недогретой жидкости при больших скоростях течения отрывной диаметр



Рис. 1. Пузырьковое течение при кипении недогретой жидкости:

$q = 11.1 \text{ кВт/м}^2$, $G = 291 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $P = 4.8 \text{ бар}$



Рис. 2. Снарядный режим течения

при паросодержании близком к нулю:
 $x = 0.01$, $q = 23.1 \text{ кВт/м}^2$, $G = 267 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $P = 5.2 \text{ бар}$

пузыря меньше чем размер канала. Фотографии течения при недогретом кипении представлены на рис. 1. Отрывающиеся пузыри под действием гравитации собираются в верхней части канала, где происходит их коалесценция, но баланс между капиллярными силами и турбулентными напряжениями в высокоскоростном потоке поддерживает преимущественно малый диаметр пузырей в потоке [1].

С увеличением теплового потока, на измерительном участке происходит переход к интенсивному кипению насыщенной жидкости. При этом имеет место тенденция к объединению пузырей и формируется поток с большими сжатыми (Тэйлоровскими) пузырями, рис. 2. Течение стратифицируется, и жидкость в нижней части канала и в жидких пробках интенсивно кипит. В отличие от [2] кризис теплоотдачи в режиме больших Тэйлоровских пузырей при кипении движущегося хладона R318C, который хорошо смачивал стенки канала, не наблюдался.

При увеличении теплового напора и соответственно скорости пара размер Тэйлоровских пузырей растет, но переход к расслоенному режиму течения в опытах не наблюдался. Увеличение теплового напора приводит так же к тому, что в волновой плёнке смачивающей обогреваемую поверхность, возникает кипение в гребнях волн, в области, где толщина слоя жидкости максимальна, рис. 3. Такой режим кипения в волновой плёнке жидкости ранее наблюдался в [3]. При дальнейшем увеличении теплового напора возмущения на межфазной поверхности достигают верхней части канала, и формируется пробковый режим течения. Структура пробкового течения с кипящей жидкостью в перемычках показана на рис. 4.

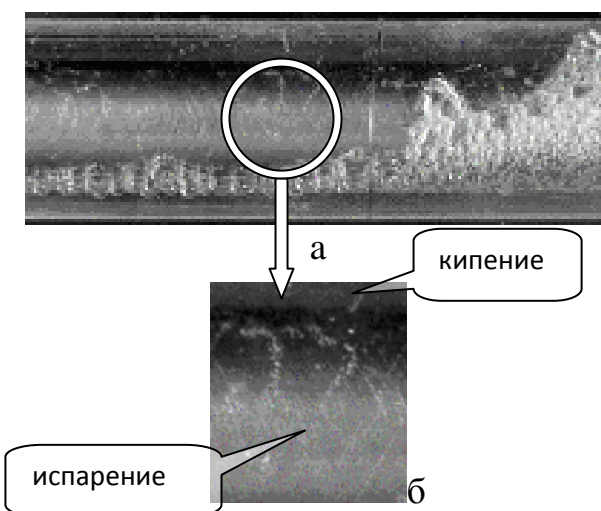


Рис. 3. Пробковый режим течения(а), на обогреваемой трубе наблюдается кипение в гребнях волн (б):

$$x = 0.1, q = 37.9 \text{ кВт/м}^2, G = 310 \text{ кг/м}^2\text{с}, P = 5.7 \text{ бар}$$

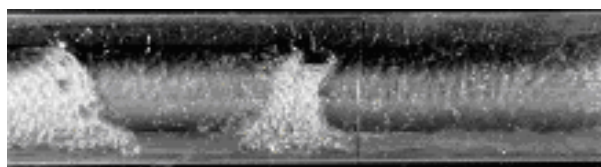


Рис. 4. Ячеистый режим течения:

$$x = 0.34, q = 56 \text{ кВт/м}^2, G = 285 \text{ кг/м}^2\text{с}, P = 5.8 \text{ бар}$$

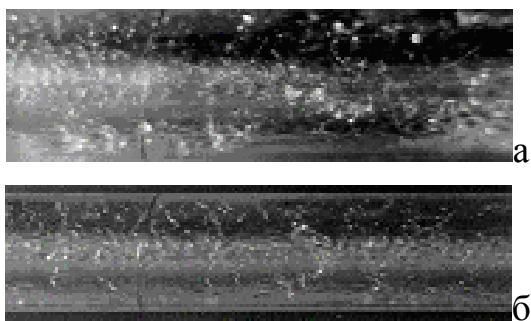


Рис. 5. Кольцевой режим течения, $P \sim 3$ бар: а) начало кризиса теплообмена $x = 0.34, q = 42.1 \text{ кВт/м}^2, G = 331 \text{ кг/м}^2\text{с}$

б) режим закризисного теплообмена $x = 0.48, q = 39.5 \text{ кВт/м}^2, G = 222 \text{ кг/м}^2\text{с}$

Кипящая пенная перемычка передвигается по каналу с гораздо большей скоростью, чем средняя скорость жидкости, что характерно для ячеистого режима течения

в каналах с большим смоченным периметром. Пробковый поток с проницаемыми для газа жидкими перегородками характеризуется большой нестационарностью течения. Капиллярные силы предохраняют перегородки от разрушения, и они двигаются независимо от течения жидкости в пленке на стенках канала.

При увеличении массового паросодержания длина перегородок уменьшается, они исчезают, и происходит переход к кольцевому течению с волнами ряби на поверхности плёнки, рис 5. В этом режиме волны возмущения очень редкие и в них может наблюдаться кипение жидкости. Приведенные на рис. 1–5 структуры парожидкостного потока показывают, что кипение хладона R318C в плёнке наблюдается только при наличии на поверхности пленки волн возмущений. При их исчезновении происходит переход к режиму испарения тонких слоев жидкости, но сухих пятен на стенках канала во всем исследованном диапазоне скоростей течения и тепловых потоков не наблюдалось.

Теплообмен при вынужденном течении

Область развитого кипения насыщенной жидкости соответствует режимам течения, показанным на рис. 1–4. Несмотря на значительное уменьшение с ростом теплового потока смоченной поверхности, на которой наблюдается кипение, перегревы стенки в области развитого кипения слабо растут с ростом теплового потока и интенсивное кипение наблюдается в жидких перегородках. При больших массовых паросодержаниях имеет место сильное уменьшение коэффициента теплоотдачи вблизи предельного значения теплового потока, которое является функцией массовой скорости и давления. Это соответствует режимам течения, показанным на рис. 5б. Вблизи критического значения теплового потока перегрев стенки сильно зависит от плотности теплового потока, но является стабильным и не изменяется во времени.

На рис. 6 приведены измеренные локальные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от паросодержания в точке измерения температуры стенки для различных давлений и массовых расходов в канале. Измеренные коэффициенты теплоотдачи отнесены к расчёту по модели С.С. Кутателадзе [4],

$$\alpha = \sqrt{\alpha_{boil}^2 + \alpha_{conv}^2} \quad (2)$$

где α_{boil} – коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объёме, а α_{conv} – конвективный коэффициент теплоотдачи. Здесь α_{boil} рассчитывалось по зависимости из работы Даниловой [5]

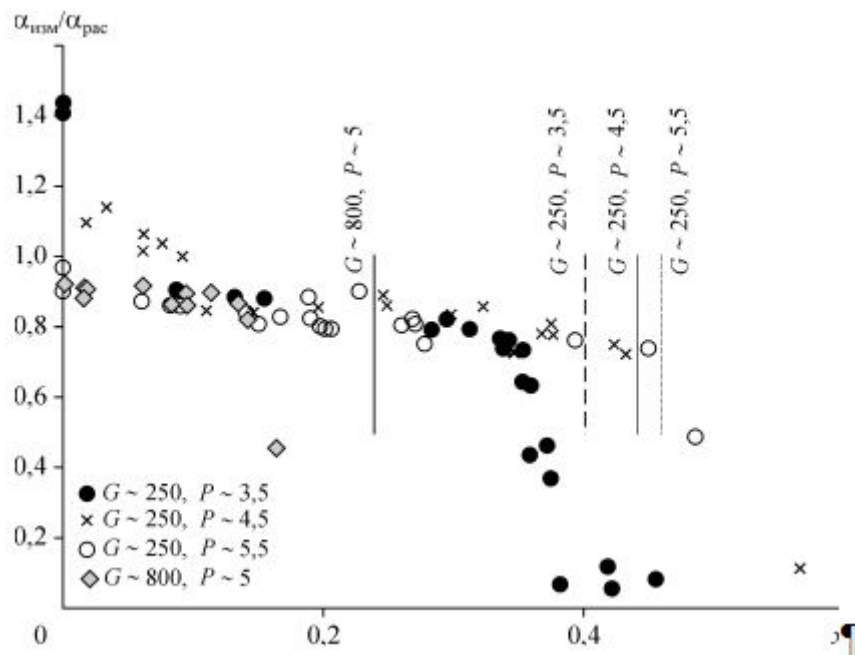


Рис. 6. Локальные коэффициенты теплоотдачи, отнесённые к расчёту по уравнению (2) в зависимости от паросодержания

$$\alpha_{boil} = 550 \frac{P_{cr}^{0.25}}{T_{cr}^{0.875} M^{0.125}} q^{0.75} R_z^{0.2} \left(0.14 + 2.2 \frac{P}{P_{cr}} \right). \quad (3)$$

Расчёт конвективного коэффициента теплоотдачи α_{conv} , выполнен по формуле Петухова [6] при турбулентном однофазном течении ($Re_{L0} > 2300$), и по соотношению из [7] в области чисел Рейнольдса жидкости меньше 2 300.

Расчёт по (2) качественно описывает теплоотдачу в кольцевом канале, но даёт в среднем завышенные значения на 10–20 %. В области низких тепловых потоков, что на рис 6 соответствует малым паросодержаниям, наблюдается существенное расслоение данных в зависимости от давления.

На рис. 6 наблюдается резкое ухудшение теплообмена при достижении критического паросодержания, характерное для кризиса теплоотдачи второго рода [8]. В работе [8] предложена эмпирическая зависимость для определения граничного паросодержания x_{cr} в зависимости от свойств теплоносителя, расхода и геометрии канала. Расчет граничного паросодержания по [8] показан линиями на рис. 6. Так же как и в работе [8] в наших опытах наблюдается уменьшение граничного паросодержания с увеличением массового расхода. Результаты расчета близки к экспериментальным данным только в области больших критических паросодержаний. В наших экспериментах мы наблюдаем более сильную зависимость граничного паросодержания от давления, чем отмечается в работе [8]. В работах [2] и [8] кризис теплоотдачи связывают с «пересыханием» теплообменной поверхности, но в нашем случае образование не смоченных областей на поверхности визуально не наблюдалось. Кризис теплоотдачи возникал только после перехода к кольцевому режиму течения с подавлением кипения в тонких слоях жидкости, при этом внутренняя обогреваемая трубка канала оставалась полностью смоченной.

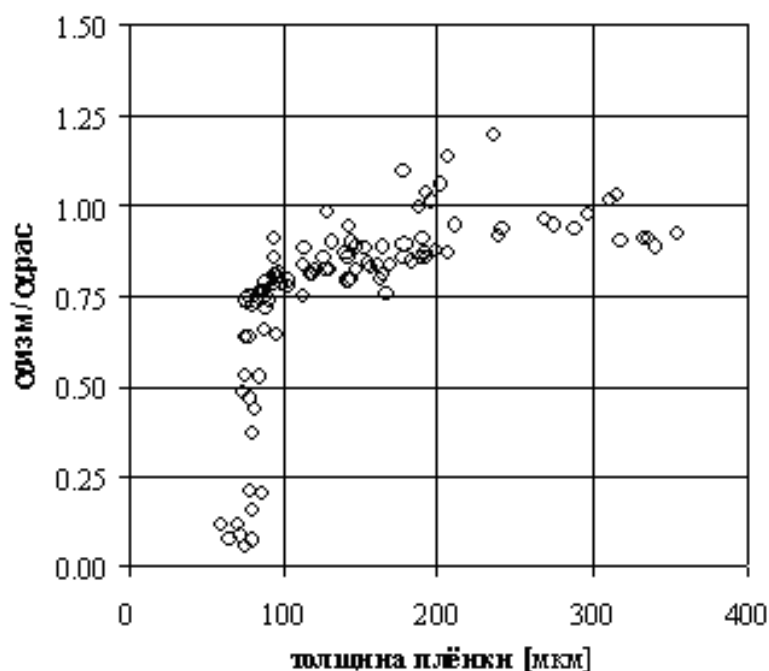


Рис. 7. Локальные коэффициенты теплоотдачи, отнесённые к расчёту по уравнению (2) в зависимости от расчётной толщины плёнки

При кольцевом режиме течения толщина плёнки жидкости уменьшается вдоль канала и для малых толщин плёнки кипение в ней подавляется, рис. 7. Переход к режиму испарения плёнки вызывает резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи и уменьшение скорости отвода тепла от обогреваемой стенки. На рис. 7 представлены коэффициенты теплоотдачи, отнесённые к расчёту по (2), в зависимости от текущей толщины плёнки. Толщина плёнки жидкости для

сечения, в котором был измерен перегрев стенки, была рассчитана с учётом зависимости толщины волновой плёнки от приведённой скорости пара, приведённой в [9].

Из рис. 10 видно, что подавление кипения для хладагona 318С происходит для плёнок с толщиной меньше 70 микрон. Для таких плёнок кипение практически подавлено и возможно только поверхностное испарение с малыми значениями коэффициентов теплообмена, что приводит к значительному ухудшению теплообмена при кипении движущейся жидкости в кольцевом миниканале.

Закключение

Капиллярные силы существенно изменяют режим течения при кипении движущейся жидкости в кольцевом горизонтальном канале с малым зазором. Преобладающим в этом случае является режим с асимметричными Тэйлоровскими пузырями и поршневое течение с проницаемыми для пара кипящими жидкими пробками. При наличии в потоке жидких перемычек специфические режимы течения в узком зазоре не оказывают значительного влияния на теплообмен при кипении движущейся жидкости из-за интенсивного кипения в перемычках. При достижении граничного паросодержания возникает ухудшение теплообмена со стенкой. Как показала визуализация потока, причиной этого является отсутствие жидких перемычек и прекращение кипения в плёнке, которое происходит для хладагona R318С при толщине пленки меньше 70 мкм. Переход к режиму конвективного испарения приводит к значительному уменьшению коэффициента теплоотдачи. Известная зависимость В.Е. Дорощука применима для расчета граничного паросодержания только при x_{cr}

больше 0.4. Оценка x_{cr} по предельной толщине пленки применима во всем рассмотренном диапазоне рабочих параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V.E. Nakoryakov, V.V. Kuznetsov, and O.V Vitovsky, Experimental Investigation of Upward Gas-Liquid Flow in a Vertical Narrow Annulus, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 18, pp. 313-326, 1992.
2. Кожелупенко Ю.Д. Кризис кипения недогретой жидкости в узких кольцевых каналах при малых скоростях движения / Ю.Д. Кожелупенко, Д.Ф. Смирнов, А.Л. Коба // Тез. док. Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации. – Рига. – 1982. Т. 1. – С. 154–155.
3. Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. Two-phase flow pattern and flow boiling heat transfer in non- circular channel with a small gap // Two-Phase Flow Modelling and Experimentation 1999, G.P. Celata, P. Di Marco and R.K. Shah (Editors), 1999 Edizioni ETS, Piza, vol. 1, pp. 249–256.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979.
5. G.N. Danilova, Correlation of Boiling Heat Transfer Data for Freons, *Heat Transfer-Soviet Research*, vol. 2(2), 73–78, 1970.
6. Петухов Б.С. Обобщенная зависимость для теплоотдачи при турбулентном течении газа в трубе кольцевого сечения / Б.С. Петухов, И.И. Розен // ТВТ. – 1964. – Т. 2. – С. 78–81.
7. K. Stephan, Wärmeübergang bei Turbulenter und bei Laminarer Stromung in Ringspalten, *Chem. Ing. Tech.*, vol. 34, pp. 207–212, 1962.
8. Исследование кризиса теплообмена второго рода в кольцевых каналах с внутренним обогревом / В.Е. Дорошук и др. // Теплоэнергетика. – 1977. – № 6. – С. 66–71.
9. J.C. Asali, T.J. Hanratty and P. Andreussi, Interfacial Drag and Film Height for Annular Flow, *AIChE J.*, vol. 31, pp. 886-902, 1985.

© В.В. Кузнецов, А.С. Шамирзаев, 2007

УДК 536.24

В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, О.А. Гасенко

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, СО РАН, Новосибирск

НЕПОЛНОЕ ОКИСЛЕНИЕ МЕТАНА В КОЛЬЦЕВОМ МИКРОРЕАКТОРЕ

Введение

Микрохимические реакторы, основанные на использовании каналов малого и сверхмалого размера, получают все более широкое распространение в современной технике. Высокая производительность микроканальных реакторов достигается за счёт интенсификации тепло и массопереноса в каналах малого размера при параллельной реакции в большом числе каналов. Преимущества микроканальных реакторов проявляются в случае сильно экзотермических или эндотермических реакций, например, при неполном окислении метана в синтез-газ или паровой конверсии метана. В микроканалах, покрытых катализатором, конверсия метана происходит при пониженных температурах (до 800 °С), малых временах пребывания исходной смеси в реакторе (до десятков миллисекунд) и полученный синтез-газ имеет высокий выход оксида углерода и водорода [1, 2]. Важной чертой этих процессов является возможность получения синтез-газа путем прямого неполного окисления метана кислородом или воздухом, что

было показано экспериментами [3]. В работах [4–7] рассматривается кинетика химической реакции и массообменные ограничения на скорость химических превращений. В то же время, существует крайне мало экспериментальных работ, направленных на исследование механизма тепломассообмена при химических превращениях в микроканалах при проведении реакций с выделением или поглощением тепла. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование химических превращений при неполном окислении метана в среде воздуха при интенсивном тепло и массопереносе в стесненных условиях и при значительном снижении внешнего диффузионного сопротивления в зоне реакции в условиях узкого кольцевого канала.

1. Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование неполного окисления метана проведено в микрореакторе с узким кольцевым каналом, схема которого показана на рис. 1. Каталитический слой нанесен на поверхность центральной трубки, толщиной 1 мм. Трубка, изготовленная из нержавеющей стали, имела внешний диаметр 6 мм и длину 40 мм. Внешний диаметр кольцевого канала равен 8 мм. Для разогрева кольцевого микроканала до температуры проведения реакции и стабилизации температуры во время проведения реакции реактор размещался в обогреваемой электрическим током кварцевой трубе покрытой слоем теплоизолирующего материала для предотвращения теплотерь. Температура стенки реактора контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары, приваренной к его поверхности. В качестве реакционной смеси использовалась смесь метана с воздухом с мольным соотношением $\text{CH}_4/\text{O}_2 = 2$. Подача газов производилась с помощью регуляторов массового расхода (Bronkhorst). Опыты проведены в диапазоне времен пребывания от 0.03 до 0.15 сек. Время пребывания определено по объемному расходу входной смеси, приведенному к нормальным условиям. Течение в кольцевом микроканале было ламинарным и число Рейнольдса, определенное по скорости смеси на входе в канал (температура смеси равна температуре реактора) и величине зазора, изменялось в опытах от 5 до 25.

Выходная смесь газов проходила через охладитель/конденсатор, где происходила конденсация паров воды, влагоотделитель и сухая смесь газов поступала для анализа в газовый хроматограф (Perkin Elmer модель 1016). Объемная доля паров воды определялась по балансу атомарного водорода во входном и выходном сечениях реактора. В ряде опытов объемная доля паров воды измерялась по расходу сконденсированной воды. Для тарировки хроматографа использовались смеси метана, водорода, окиси и двуокиси углерода с известным содержанием компонент. Погрешность измерения концентраций компонент равна 2%. Температура реактора в опытах изменялась в диапазоне 470 – 930°C. Каталитическое покрытие изготовлено на основе γ – Al_2O_3 с удельной поверхностью 140 м²/г. После прокалки при температуре 800°C γ – Al_2O_3 , промотированный Ce, Zr, La, пропитывался раствором нитрата родия по влагоемкости, прокаливался при 500 °C на воздухе. Катализатор нанесен на металлическую поверхность реактора аэрозольным методом.

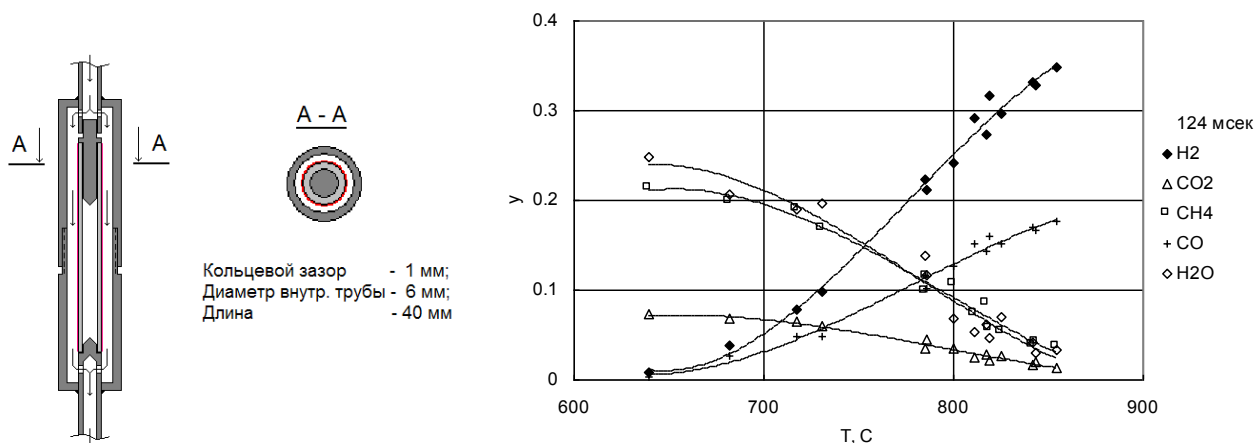


Рис. 1. Схема кольцевого микрореактора и объёмная доля газов в продуктах реакции неполного окисления метана в зависимости от температуры реактора. Время пребывания смеси 124 мсек

2. Результаты

На рис. 1 приведена зависимость состава продуктов неполного окисления метана в среде воздуха на выходе из кольцевого канала от температуры стенки для времени пребывания реагирующей смеси в канале 124 мсек. При температуре меньше 650 °С доля водорода и окиси углерода в выходной смеси мала.

Основным продуктом химических превращений для таких температур является углекислый газ и вода. Это показывает на то, что в указанном диапазоне температур стенок реактора на катализаторе происходит преимущественное горение части метана с образованием двуокиси углерода и воды. При температурах более 750 °С характер химических превращений на активных центрах катализатора изменяется. Родий является одним из наиболее активных катализаторов для адсорбции, поверхностной реакции и десорбции метана, кислорода и продуктов их реакции. Продукты каталитического горения метана вступают в реакцию на поверхности наночастиц родия и на катализаторе происходят каскадные химические превращения. Последовательно протекают реакции глубокого окисления метана, паровой конверсии метана и углекислотной конверсии метана. Это приводит к тому, что

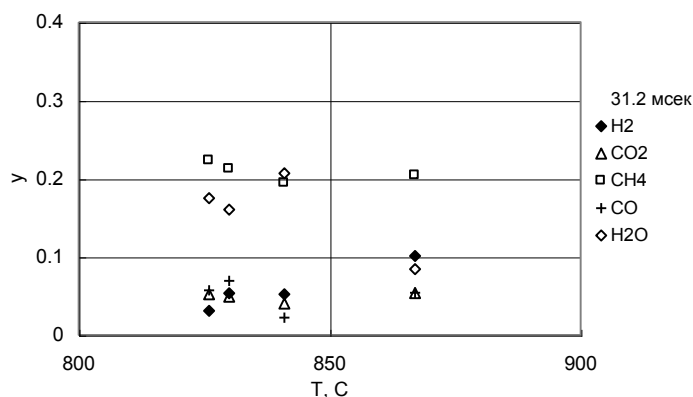


Рис. 2. Объёмная доля газов в продуктах реакции неполного окисления метана в среде воздуха в зависимости от температуры реактора. Время пребывания смеси 31 мсек

содержание водорода и окиси углерода в продуктах реакции увеличивается, а содержание двуокиси углерода и паров воды падает (рис. 1). Вода и двуокись углерода практически исчезают в продуктах реакции при температуре больше 840 °С. При уменьшении времени пребывания газовой смеси в кольцевом канале низкие скорости реакции паровой и углекислотной конверсии метана не позволяют значительно изменить состав выходной смеси и определяющей является реакция глубокого окисления метана, – рис. 2. Изменения мольного состава смеси в результате химических превращений приводят к изменению скорости течения газовой смеси в канале реактора. Интенсивный поперечный поток массы, возрастающий при начале реакций паровой и углекислотной конверсии метана с образованием водорода, увеличивает скорость газа на выходе до 40 %.

При глубоком окислении метана реакция имеет первый порядок по концентрации метана и слабо зависит от концентрации кислорода [8, 9]. Предположим, что мольный поток реагирующей смеси на единицу поверхности канала r_s определяется зависимостью Аррениуса

$$r_s = k_e e^{-\frac{E_a}{RT}} C_i^S = k_e C_i^S. \quad (1)$$

Здесь k_e – константа скорости реакции; E_a – энергия активации реакции; C_i^S – мольная концентрация метана на поверхности катализатора. В рамках одномерной модели движения реагирующей смеси уравнение сохранения для потока массы метана имеет вид:

$$\frac{duC_i}{dz} = -s_v k_e C_i^S. \quad (2)$$

Здесь s_v – удельная поверхность, равная отношению площади канала к его объему; u – приведенная скорость смеси; C_i – мольная концентрация метана в смеси.

С учетом внешних диффузионных ограничений на скорость реакции равенство мольных потоков на поверхности катализатора имеет вид:

$$k_D (C_i - C_i^S) = k_e C_i^S, \quad (3)$$

где k_D – коэффициент массоотдачи в канале. Используя аналогию тепло и массообмена, число Шервуда для ламинарного течения газовой смеси в кольцевом канале с химическими превращениями на поверхности центральной трубки согласно [10] равно $Sh = 5.12$. Массообмен при каталитической реакции к стенке соответствует случаю $T = const$ в задаче теплообмена. Величина коэффициента диффузии для метана определяется по [11] как

$$D = D_0 (T/T_0)^{1.69} p_0/p, \quad (4)$$

где $D_0 = 0.2 \cdot 10^{-4}$ м/сек² – коэффициент диффузии CH₄ при $T_0 = 293$ К и $p_0 = 1$ бар.

Решая (3) относительно мольной концентрации метана на стенке, получим

$$C_i^S = \frac{C_i}{1 + k_e/k_D}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (2) и, интегрируя (2) по длине канала l , получим

$$\ln(C_i^l u_i^l / C_i^0 u_i^0) = - \frac{S_v k_e}{(1 + k_e / k_D)} \int_0^l \frac{dz}{u(z)}. \quad (6)$$

Учитывая, что скорость смеси мало меняется по длине канала, используем линейную аппроксимацию для изменения приведенной смеси по длине канала

$$u = u_0 + u'_z z. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6) и, используя граничные условия на входе и выходе канала, получим:

$$\frac{C_i^l u_i^l}{C_i^0 u_i^0} = \left(\frac{u^l}{u^0} \right)^{- \frac{S_v k_e}{u'_z (1 + k_e / k_D)}}. \quad (8)$$

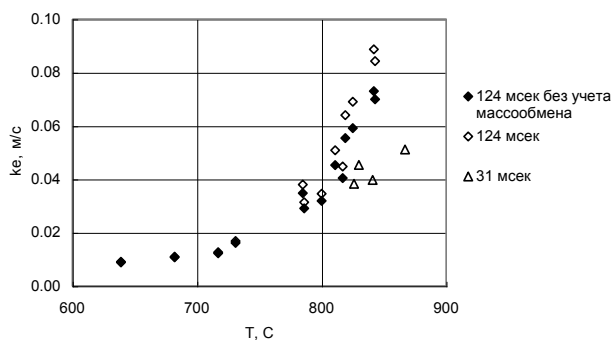


Рис. 3. Эффективная константа скорости реакции в зависимости от температуры неполного окисления метана

На рис. 3 приведены экспериментальные данные по зависимости эффективной константы скорости реакции от температуры неполного окисления метана при времени пребывания 124 и 31 мсек. Темными точками на рис. 3 показана эффективная константа скорости реакции, полученная без учета массообмена в канале. В области преимущественного протекания реакции глубокого окисления метана

экспериментальные данные соответствуют зависимости Аррениуса с энергией активации 55.2 кДж/моль. Для температур меньше 750 °С скорости химических превращений малы и вклад внешнего диффузионного торможения пренебрежимо мал. При увеличении температуры он возрастает и становится существенным для температур больше 800 °С. Для времени пребывания 124 мсек и температуре больше 750 °С на поверхности катализатора возникают реакции паровой и уголекислотной конверсии метана, что приводит к увеличению скорости химического превращения метана. В этом случае режим химических превращений принимает каскадный характер со сложной кинетикой при участии всех компонент смеси в реакциях.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование химических превращений при неполном окислении метана в среде воздуха при активировании реакции на стенках кольцевого микроканала. Использован родиевый катализатор, нанесенный на внутреннюю стенку канала. Для различных температур реактора и времен пребывания измерены концентрации продуктов в выходной смеси газов. Определен диапазон температур стенок канала и времен пребывания смеси, при которых доля водорода и окиси углерода на выходе существенно возрастает, что указывает на переход от преимущественного горения метана к каскадным химическим превращениям с активированием реакций паровой и

углекислотной конверсии метана. В рамках предположения о первом порядке реакции по концентрации метана и линейного изменения скорости газа по длине канала на основе обобщения опытных данных в области преимущественного глубокого окисления метана получена константа скорости реакции на поверхности канала и энергия активации в зависимости от температуры стенок канала и времени пребывания смеси. Определена роль внешнего диффузионного торможения на скорость химических превращений при неполном окислении метана в стесненных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-65526).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Obot N.T. // *Microscale Thermophys. Eng.* – 2002. – Vol. 6. – N 3. – P. 155–173.
2. Kolb G., Hessel V. // *Chem. Eng. Journal.* – 2004. Vol. 98. – P. 1–38.
3. Hickman D.A., Hauptfear E.A., Schmidt L.D. // *Catalysis Letters.* – 1993. — Vol. 17. – P. 223–237.
4. Hickman D.A., Schmidt L.D. // *AIChE J.* – 1993. – Vol. 39. – P. 1164–1177.
5. van Male P., de Croon M.H.J.M., Tiggelaar R.M., van den Berg A., Schouten J.C. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2004. – Vol. 47. – N 1. – P. 87–99.
6. Садыков В.А. и др. // *Кинетика и катализ.* – 2005. – Т. 46. – № 2. – С. 243–268.
7. Hayes R.E., Kolaczowski S.T. // *Chem. Eng. Sci.* – 1994. – Vol. 49. – P. 3587–3599.
8. Lee J.H., Trimm D.L. // *Fuel Process Technology.* – 1995. – Vol. 42. – P. 339.
9. Ribeiro F.H., Chow M.J., Dalla Batta R.A. // *Journal of Catalysis* – 1994. – Vol. 146. – P. 537.
10. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина, кн. 2. – М.: Энергоиздат, 1988.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972.

© В.В. Кузнецов, О.В. Витовский, О.А. Гасенко, 2007

УДК 66.071.5:532.529.5:532.68

В.В. Кузнецов, С.А. Сафонов, С.П. Козлов

ИТ СО РАН, Новосибирск

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ ГАЗ В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ

Введение

Микроканальные реакторы используются для конверсии углеводородов и спиртов в синтез газ и водород, а также целого ряда других высоконапряженных энергетических и химических процессов. Наиболее полно преимущества микроканальных реакторов проявляются в случае сильно экзотермических или эндотермических реакций, например, при неполном окислении метана в синтез-газ или паровой конверсии метана. Каталитическая конверсия метана в микроканалах происходит при пониженных температурах (до 800 °С), малых временах пребывания исходной смеси в реакторе (до десятков миллисекунд) и позволяют получать синтез-газ с высоким выходом оксида углерода и водорода

[1, 2]. Наиболее важной чертой этих процессов является возможность получения синтез-газа путем прямого неполного окисления метана кислородом или воздухом, что было показано лабораторными экспериментами [1]. В работах [2–4] рассматривается кинетика химической реакции и массообменные ограничения на скорость химических превращений. Целью данной работы является численное исследование взаимосвязи тепловых, диффузионных и физико-химических процессов при парциальном окислении метана и паровом риформинге метана в двумерном микроканале каталитического реактора.

Методика численного моделирования

Численное моделирование двумерного течения газа и процессов переноса в каналах щелевых реакторов-теплообменников при наличии химических превращений, активированных на стенках каналов, проводилось в рамках уравнений Навье Стокса для ламинарного течения многокомпонентного сжимаемого газа. Использованы следующие граничные условия на стенке в области реакции:

$$-\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} = s_{s,i} M_i, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \sum r_{s,k} \Delta H_k + q_w \quad (1)$$

Здесь Y_i – массовые концентрации компонент, $s_{s,i}$ – скорость появления (исчезновения) i -го компонента на поверхности канала во всех протекающих реакциях, q_w – плотность внешнего теплового потока. Расчеты неполного окисления метана проводились для теплоизолированного реактора. Паровая конверсия метана является эндотермической реакцией, и расчеты проводились при внешнем подводе тепла. На оси канала задавались условия симметрии, и на стенке канала задавалось условие прилипания. Система уравнений Навье Стокса записывалась в переменных функция тока и завихренности, и решалась конечно-разностным методом. При числах Маха меньше 0.005 гидродинамический перепад давления в канале не учитывался для экономии времени счета.

При расчете неполного окисления метана в среде воздуха использовалась многостадийная кинетика последовательных реакций на поверхности каналов, предложенная в работе [4]. Предполагалось, что химические превращения инициирует реакция горения метана с образованием паров воды и двуокиси углерода $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Вниз по потоку происходят химические превращения с участием остатка метана, паров воды и двуокиси углерода: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ и $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Константы скоростей реакций на поверхности каналов были пересчитаны из объёмной скорости реакции [4] с учетом активности катализатора. При расчете парового риформинга метана использована многостадийная кинетика последовательных реакций на поверхности каналов, предложенная в работе [5].

Расчеты проводились конечно-разностным методом. На входе в канал задавался ударный профиль продольной скорости, нулевая поперечная скорость, постоянные по сечению канала температура смеси и массовые концентрации компонент – метана и кислорода. На стенках канала для компонент скорости задавались условия прилипания. Начальная смесь метана и воздуха при парциальном окислении соответствовала соотношению $\text{CH}_4/\text{O}_2 = 2$. Расчеты

были проведены в диапазоне температур от 600 до 800 °С. Между областью реакции и входом в канал располагался участок стабилизации профиля скорости смеси.

Вязкость и теплопроводность смеси зависят от температуры и концентрации компонент и вычисляются по полуэмпирическим формулам из [6, 7]. Значения вязкости и теплопроводности для каждого компонента смеси определяются как полиномиальные функции температуры. Коэффициент диффузии и энтальпия смеси определялись следующим образом:

$$D = \frac{9.99 \cdot 10^{-5} T^{1.75}}{p}, \quad h = \sum_i Y_i h_i, \quad h_i = h_{i,0} + \int_{298}^T C_{p,i} dT$$

где c_p есть теплоемкость при постоянном давлении, определяемая как полиномиальная функция температуры, $h_{i,0}$ есть энтальпия образования компонент смеси и p есть давление в реакторе.

Численное моделирование неполного окисления метана в двумерном микроканале

В рамках приближения ламинарного течения газовой смеси были исследованы химические превращения в прямом двумерном микроканале с нетеплопроводными стенками при активировании реакций на внутренних стенках канала. Расчеты неполного окисления метана в среде воздуха проведены для многостадийной кинетики последовательных реакций в канале с зазором $h = 0.5$ мм при шаге сетки 0.05 мм. Длина зоны реакции 40 мм. Мольная доля метана в начальной смеси равна 0.29, мольная доля кислорода равна 0.145 и мольная доля азота равна 0.565. Давление в реакторе 1 бар и время пребывания газовой смеси (определенной для нормальных условий) равно 30 мсек, что соответствует следующим безразмерным параметрам: $Re = 2h \cdot U_p / \mu = 13.0$, $Sc = 2h \cdot U / D = 14.16$, $Pr = 0.97$, $Ma = 0.00205$.

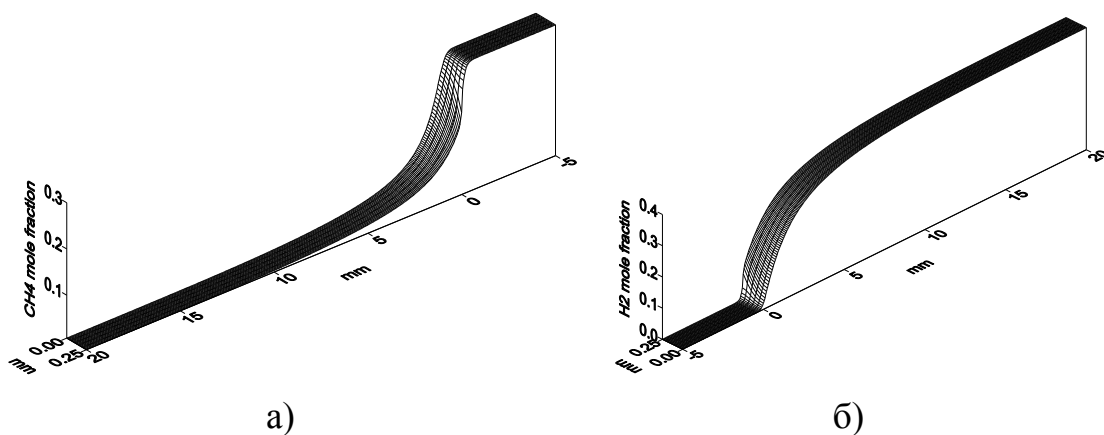


Рис.1 . Распределение мольных концентраций метана (а) и водорода (б) в двумерном микроканале с адиабатической стенкой. Время пребывания смеси 30 мс. Температура входной смеси 600° С

На рис. 1 приведены распределения мольных долей метана и водорода по длине и ширине канала. Изменение мольной доли всех компонент реакции по длине канала, за исключением азота, показано на рис. 2а. Расчеты проведены при начальной температуре исходных продуктов 600 °С. Для каналов с размером меньше 1 мм внешнее диффузионное сопротивление в области

реакции мало и концентрации компонент в центре канала и на его стенках отличаются слабо. Скорость убывания метана максимальна в окрестности входа в канал, где максимальна концентрация кислорода. В этой области течения происходит каталитическое горение метана и в потоке образуется пары воды и двуокись углерода. Горения метана практически завершается на расстоянии 5 мм от начала зоны реакции, где исчезает кислород. Далее вниз по потоку метан реагирует с продуктами горения, и происходят реакции паровой и углекислотной конверсии метана с образованием окиси углерода и водорода.

Продольная диффузия компонент смеси вверх по потоку приводит к тому, что водород и окись углерода наблюдаются до контакта реагирующей смеси с покрытием, активирующим реакции, смотри рис. 1б. Все реакции завершаются на расстоянии порядка 40 мм вниз по потоку от начала области, покрытой катализатором.

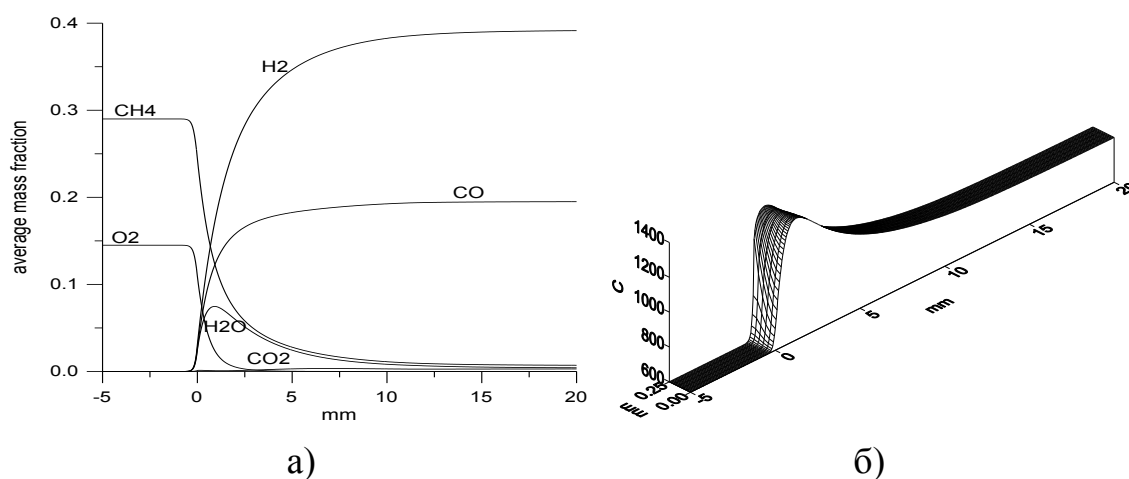


Рис. 2. Изменение среднемассовой концентрации компонент смеси а) и температуры газа б) по длине канала при неполном окислении метана

На рис. 2б показано изменение температуры газа по длине и ширине канала. Наибольший рост температуры наблюдается в области каталитического горения метана. В этой области происходит подвод тепла реакции к газу. Далее вниз по потоку реакция горения затухает, и преимущественными являются эндотермические реакции углекислотной и паровой конверсии метана. Эти реакции происходят с поглощением тепла, и температура газа вниз по потоку падает. Суммарный тепловой эффект химических превращений в канале положительный и температура смеси на выходе канала значительно выше, чем на входе.

На рис. 3а показано изменение массовой концентрации компонент на оси канала при паровой конверсии метана в условиях внешнего подвода тепла к зоне реакции длиной 12 мм. Мольная доля метана в начальной смеси равна 0.325. Давление в реакторе 1 бар. Температура на входе 860 °C, $Re = 4$, $Sc = 3.692$, $Pr = 0.915$, $Ma = 0.00091$. Паровой риформинг метана является эндотермическим процессом и без внешнего подвода тепла на стенки канала температура смеси монотонно падает вниз по потоку. При внешнем подводе тепла к стенке реактора температура смеси вначале возрастает, а затем начинает

монотонно падать (рис. 3б). Начальный рост температуры на рис. 3б связан с зависимостью скорости одновременно протекающих реакций, как от температуры, так и от концентраций компонент. До тех пор, пока подводимое к зоне реакции количество тепла выше теплоты отбираемой у смеси в результате реакции, происходит нагрев газовой смеси. При плотности теплового потока 3 кВт/м^2 перепад температуры в канале наименьший.

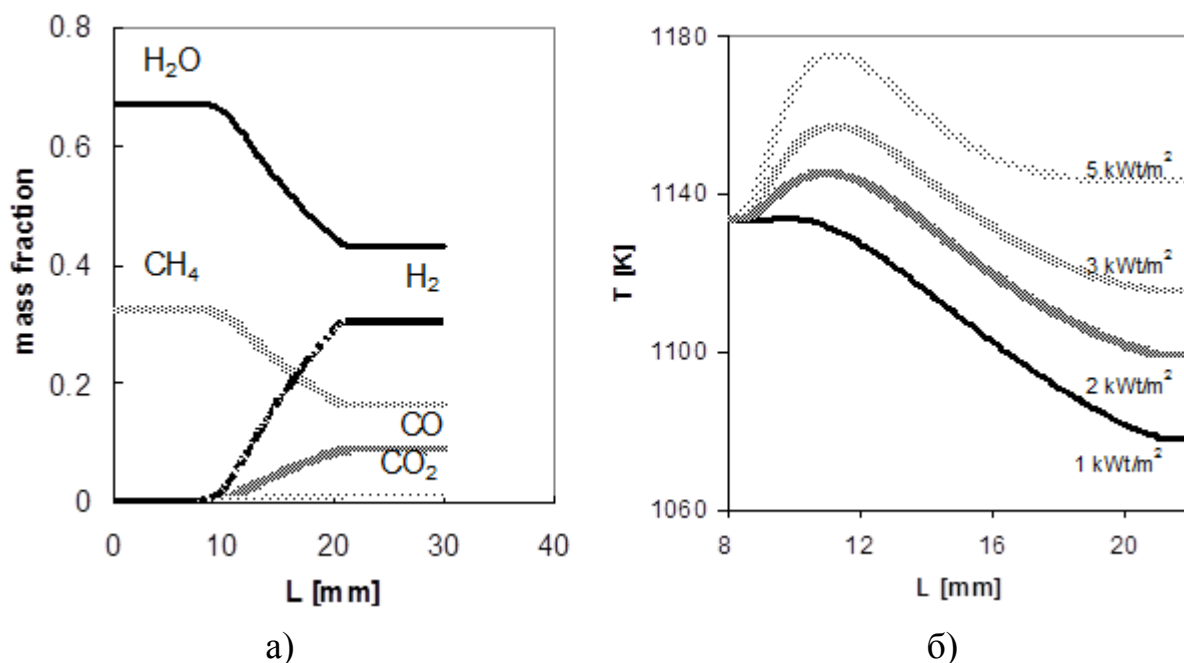


Рис. 3. Изменение массовой концентрации компонент на оси канала при $q_w = 5 \text{ кВт/м}^2$ – а), и температуры газа при различной плотности внешнего теплового потока – б) по длине микроканала при паровой конверсии метана

Заклучение

Численные расчеты неполного окисления метана в среде воздуха и паровой конверсии метана, выполненные в двумерном микроканале с нетеплопроводными стенками, показали, что химические превращения в стесненных условиях имеют каскадный характер, и все реакции при временах пребывания порядка десятков миллисекунд заканчиваются на нескольких сантиметрах вниз по потоку. На входе в каталитически активную область канала мольная доля метана и кислорода при неполном окислении метана резко уменьшаются, что говорит о преимущественном горении метана. Далее вниз по потоку мольные доли водорода, и окиси углерода в продуктах реакции значительно возрастают в результате реакций уголекислотной и паровой конверсии остатка метана. При паровой конверсии метана все реакции также заканчиваются на расстоянии несколько сантиметров вниз по потоку. Особенностью этой реакции является необходимость подвода тепла к зоне реакции и при малой плотности теплового потока степень конверсии мала. Продольная диффузия окиси углерода и водорода приводит к их появлению в потоке даже до области реакции, что маскирует каскадный характер химических превращений в стесненных условиях. В каналах с размером меньше 0.5 мм , для рассмотренных реакций, внешние массообменные ограничения практически не проявляются, и диффузионные процессы выравнивают поле концентраций компонент поперек канала.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-65526).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hickman D.A., Hauptfear E.A., Schmidt L.D. Synthesis gas formation by the direct oxidation of methane over Rh monoliths, // *Catalysis Letters*. – 1993. – Vol. 17. – P. 223–237.
2. Hickman D.A., Schmidt L.D. Steps in CH₄ oxidation on Pt and Rh surfaces: high-temperature reactor simulation, // *AIChE J.* – 1993. – Vol. 39. – P. 1164–1177.
3. Hayes R.E., Kolaczkowski S.T. Mass and heat transfer effects in catalytic monolith reactors // *Chem. Eng. Sci.* – 1994. – Vol. 49. – P. 3587–3599.
4. Wolf D., Hohenberger M., Baerns M., External Mass and Heat Transfer Limitations of the Partial Oxidation of Methane over a Pt/MgO Catalyst – Consequences for Adiabatic Reactor Operation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36(8), P. 3345–3352, 1997.
5. Hou K., Hughes R., “The kinetics of methane steam reforming over a Ni/ α -Al₂O catalyst”, *Chemical Engineering Journal* 82 (2001).
6. Mason E.A., Saxena S.C., *The Physics of Fluids*, 1, 361–369(1958)
7. Wilke C.R., *J. Chem. Phys.*, 18, 517–521(1950).

© В.В. Кузнецов, С.А. Сафонов, С.П. Козлов, 2007

УДК 536.2

С.В. Димов, В.В. Кузнецов, А.А. Хасин*

Институт теплофизики им. С.С. Кутатиладзе, СО РАН, Новосибирск

Институт катализа им. Г.К. Борескова, СО РАН, Новосибирск

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МИКРОСТРУКТУРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫЙ АРМИРУЮЩИЙ КОМПОНЕНТ

Введение

Преобразование природного или попутного нефтяного газа в синтетические моторные топлива предполагает последовательное получение синтез газа и его превращение в углеводороды посредством сильно экзотермического синтеза Фишера-Тропша (Fischer-Tropsch). Тепловая устойчивость работы реактора зависит от эффективности отвода тепла из зоны реакции. Эффективный процесс должен осуществляться при перепаде температуры на слое катализатора не более 10–15 °С при средней температуре, обеспечивающей заданные производительность и селективность. В работе [1] предложено использование проницаемых каталитически активных мембран (ПКМ) контакторного типа в многофазном процессе синтеза Фишера – Тропша. Мембрана представляет собой микроструктурный теплопроводящий композитный материал с высоким содержанием каталитически высокоактивного вещества (до 1 г/см³); развитой системой пор, обеспечивающих проницаемость тела композита.

Теплопроводность гетерогенных микроструктурных материалов существенным образом зависит как от теплопроводности компонентов, их объемного содержания, так и от условий их изготовления. В [2, 3] были рассмотрены модели расчета процессов теплопроводности и

электропроводности смесей и композиционных материалов. Сравнение с экспериментальными данными показало перспективность расчета обобщенной проводимости в сочетании с геометрическим моделированием структуры материалов. В [2] было предложено рассматривать зернистые структуры в виде двух взаимно проникающих решеток: скелета, образованного системой плотно хаотично расположенных зерен, и системой пустот, пронизывающий материал. Теплопроводность всей структуры рассчитывалась по известным теплопроводностям скелета и пустот. В неметаллах теплота передается тепловыми колебаниями атомов. Расчет теплопроводности скелета пористых каталитических материалов осложняется наличием электропроводящих (медь) и непроводящих (катализатор) частиц, значения теплопроводности, которых значительно различаются. При одинаковом вкладе в теплопроводность разных механизмов передачи тепла необходимо выполнять прямые измерения теплопроводности.

В данной работе исследованы эмпирические зависимости теплопроводности пористых каталитических мембран от количества высокотеплопроводного компонента (меди).

Методика проведения эксперимента

Образец мембраны представляет собой пористый проницаемый композит, составленный из трех компонентов – порошка электролитической меди (А) с размером зерен порядка ..., наноструктурного порошка катализатора либо его носителя Al_2O_3 (Б) и порообразователя (С). При приготовлении мембран использовали методику, описанную в патенте [4].

Для определения коэффициента теплопроводности композитов использовали лабораторную установку, схема которой приведена на рис. 1. Образец композита, выполненный в виде полого цилиндра, (1) помещался между двумя одинаковыми металлическими (12Х19Н10Т) цилиндрами (2), с диаметрами, совпадающими с измеряемыми образцами, и шлифованными торцевыми поверхностями, в которые были зачеканены термопары. Температуру каждой поверхности измеряли двумя перпендикулярно расположенными медь-константановыми термопарами на расстоянии половины радиуса цилиндра.

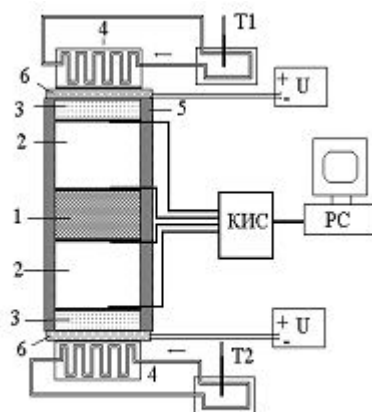


Рис. 1. Схема установки

С внешних сторон измерительные цилиндры контактировали с теплообменниками (4) через шлифованные медные пластины (3). Для уменьшения контактного теплового сопротивления при сборке элементов зону контакта заполняли теплопроводящей силиконовой пастой. Через каждый теплообменник протекала вода с постоянной температурой. Тепловой поток через образец создавали с помощью протекания через теплообменники воды с разной температурой. С боковых сторон измерительные цилиндры и образец теплоизолировали. Показания термопар определяли контрольно-измерительной системой. После достижения теплового равновесия определяли среднюю теплопроводность образца. Разница тепловых потоков, определенная по верхнему и нижнему измерительному цилиндру указывала на точность определения теплового потока. При тестировании установки были измерены тепловые контактные сопротивления, а также теплопроводность образцов с известной теплопроводностью. Из проведенных измерений было показано, что теплопроводность тестовых образцов отличается от справочных данных не более, чем на 7 %.

Обсуждение результатов

На рис. 2 приведены зависимости теплопроводности пористых каталитических монолитов с различными катализаторами и носителями катализатора от объёмного содержания теплопроводящего компонента (меди).

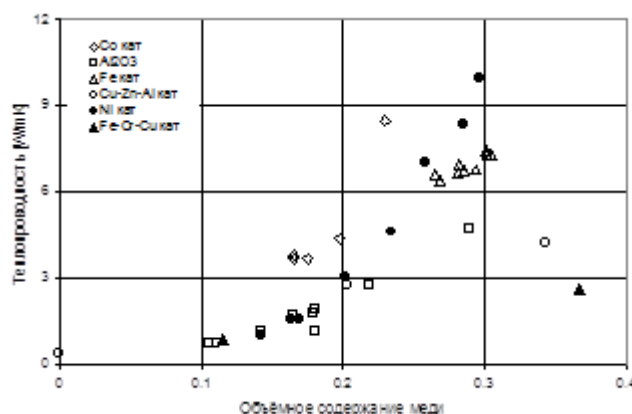


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от объёмного содержания меди

Для всех типов ПКМ наблюдается увеличение теплопроводности с увеличением содержания меди, при этом значения теплопроводности значительно различаются в зависимости от типа катализатора и методики изготовления каталитического монолита. Для образцов, изготовленных по одинаковой методике с одинаковым количеством компонент, можно рассчитать теплопроводность, если имеются измерения теплопроводности хотя бы при одном составе компонент. Исследуемые композиты могут быть представлены в виде двух взаимопроникающих континуумов – армирующего скелета (компоненты А и Б) и порообразователя (компонента С). Теплопроводность скелета λ_{skl} можно рассчитать для двух взаимопроникающих континуумов, отличающихся агрегатными состояниями: газ и твердое тело. Континуум "твердое тело" образуют частицы компонентов А (медь) и В (катализатор/носитель), континуум "газ" образует пористое пространство

скелета заполненное воздухом. Для данной системы можно применить модель расчета обобщенной теплопроводности, разработанную в [2]. В данной модели компоненты скелета образуют кубическую решетку с брусками постоянного квадратного сечения Δ , значение этого параметра определяют, решая уравнение $2\Delta^3 - 3\Delta^2 + 1 - m = 0$, где m – объемная доля скелета. Тогда эффективная теплопроводность двух скелета λ_{skl} определяются следующей формулой:

$$\lambda_{skl} = \lambda_{air} \left[\Delta^2 + \nu \left((1 - \Delta)^2 + \frac{2\Delta(1 - \Delta)}{\nu \cdot \Delta + 1 - \Delta} \right) \right] \quad (1)$$

где, $\nu = \lambda_{sol}/\lambda_{air}$, λ_{sol} – теплопроводность твердой фазы, образованной частицами меди и катализатора; λ_{air} – теплопроводность воздуха ($0.026 \text{ Вт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К})^{-1}$). Теплопроводность континуума "твердое тело", состоящего из последовательно расположенных гранул компонентов A и B , в условиях поперечного теплового потока рассчитывается по их теплопроводности и объемному содержанию

$$\lambda_{sol} = \frac{\lambda_{Cu} \lambda_{ef} m}{X_{Cu} \lambda_{ef} + X_{Cat} \lambda_{Cu}}, \quad (2)$$

где λ_{ef} – эффективная теплопроводность компонента B , λ_{Cu} – теплопроводности меди ($400 \text{ Вт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К})^{-1}$). Корректность раздельного рассмотрения теплопроводностей твердых частиц армирующего скелета и его пористости заполненной воздухом следует из предположения о малом контактном сопротивлении между частицами армирующего скелета.

Для оценки теплопроводности композитов, содержащих компонент C (порообразователь) сначала вычисляли по (1) эффективную теплопроводность двух взаимопроникающих континуумов армирующего компонента, а затем, используя полученное значение λ_{skl} , проводили вычисление эффективной теплопроводности всего композита по аналогичному уравнению для континуумов "армирующий компонент" и "компонент C ". Для определения неизвестной величины λ_{ef} в уравнении (2) можно использовать экспериментальные данные о теплопроводности композита в предельном случае при отсутствии меди. Таким образом, мы поступили для серии непроницаемых композитных катализаторов паровой конверсии CO (Cu-Zn-Al катализатор). Равносильно, для определения этой величины можно использовать экспериментальные данные о теплопроводности композита с заданным, отличным от нуля, содержанием меди.

На рис. 3 приведено сопоставление экспериментальных величин теплопроводности композитов с соответствующими расчетными значениями. Видно, что хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений теплопроводности достигается, если эффективную теплопроводность катализатора λ_{ef} определять при ненулевом содержании меди. Для композитов с Cu-Zn-Al катализатором в расчетах использовалась λ_{ef} , определенная при отсутствии меди. При содержании меди 20 об. % и более такой способ расчета приводит к значениям значительно ниже экспериментальных данных.

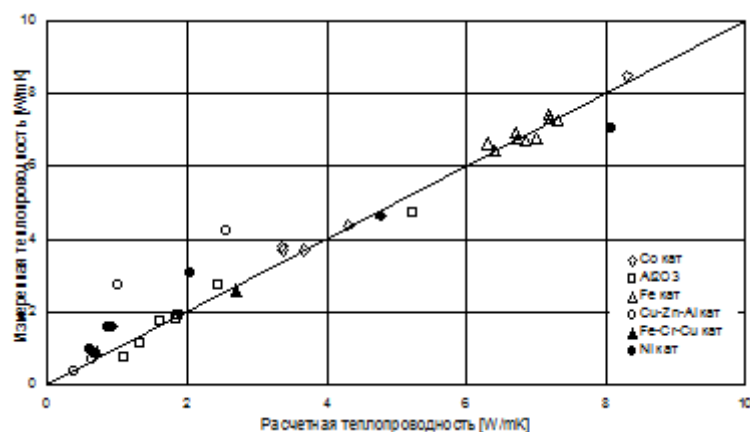


Рис. 3 Соотношение экспериментальных и расчетных значений теплопроводности для исследуемых образцов

Для Ni содержащих катализаторов данная полуэмпирическая методика определения коэффициента теплопроводности оказалась неэффективной, поэтому была использована модель “эффективно-проводящей среды” [5]. Расчет по данной методике приводит к удовлетворительному согласованию расчетных и измеренных значений коэффициента теплопроводности данных ПКМ.

Заключение

Зависимость теплопроводности микроструктурных композитов от количества введенной металлической меди для серии образцов, изготовленных по одинаковой методике с одинаковым количеством компонент, можно оценить на основании экспериментальной величины теплопроводности для одного композита известного состава. Необходимо отметить, что расчет по предлагаемой методике дает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными при условии, что армирующий компонент образует непрерывный континуум, а сопротивление тепловому потоку на контактах между частицами составляющих его компонентов и минимально. Это достигается благодаря прессованию и термообработке (спеканию) заготовки композита в атмосфере аргона и водорода, обеспечивающей высокую степень восстановления поверхности частиц металлической меди. Для расчета коэффициента теплопроводности Ni содержащих катализаторов необходимо использовать модель “эффективно-проводящей среды” [5].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН «Новые подходы к химии топлив и химической электроэнергетике» (проект №7.3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хасин А.А. Новые подходы к организации процесса синтеза Фишера-Тропша. Использование реакторов с каталитически активными мембранами / А.А. Хасин // Рос. хим. журн. – 2003. – Т.47, № 6. – С. 36–47.
2. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.Р. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
3. Дульнев Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / В.В. Дульнев, В.В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.

4. Пат. RU 2227067 Способ приготовления катализатора получения углеводов и их кислородсодержащих производных из синтез-газа и способ использования катализатора / И.Ш. Итенберг, В.Н. Пармон, А.Г. Сипатров и др. // БИ 11. – 2004. – С. 482

5. W.Y. Hsu and T. Berzins, Percolation and effective-medium theories for perfluorinated ionomers and polymer composites//J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed. 23(5). P.933-53.1985.

© С.В. Димов, В.В. Кузнецов, А.А. Хасин, 2007

УДК 66.071.5:532.529.5:532.68

И.Н. Ершов, И.Н. Кузнецов

ИТ СО РАН, Новосибирск

МАССООБМЕН ПРИ СНАРЯДНОМ ТЕЧЕНИИ В МИНИКАНАЛАХ МОНОЛИТНЫХ РЕАКТОРОВ

Введение

Процессы межфазного тепло- и массообмена в каналах малого размера используются в различных аппаратах химической и биотехнологии. Широкое применение в химической и биотехнологии находят монолитные реакторы с квадратными каналами, размер которых сравним и меньше капиллярной постоянной. Одним из основных режимов газожидкостного течения в таких каналах является снарядный режим. При построении моделей снарядного течения многие авторы используют модель Уоллиса [1], включающую в себя скорость всплытия снаряда в канале с неподвижной жидкостью. Эта модель построена для цилиндрических каналов при числе Этвеша Eo больше 4. Как показал анализ [2] при $Eo < 3.37$ в цилиндрическом канале снаряды вообще не всплывают из-за формирования сверхтонкой пленки на стенках. Это может служить ограничением на размер канала при проектировании тепло и массообменных устройств с восходящим газожидкостным течением. Целью данной работы являлось исследование гидродинамики движения газовых снарядов, структуры газожидкостного течения и межфазного массообмена в прямоугольных каналах различного размера.

Описание эксперимента

В качестве рабочего участка использовались прямоугольные и цилиндрические каналы из стекла, с переходными фланцами на входе и выходе; фланцы и концы трубки были связаны с баками верхнего и нижнего уровня гибкими шлангами. В нижней части канала расположен узел ввода газа и жидкости с системой регулирования расходов фаз. Структура газожидкостного потока и скорость движения газовой фазы регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры и системы фотоприемников. Измерение скорости всплытия и длины одиночного газового снаряда в покоящейся жидкости при открытом верхе и заглушенном дне канала проводилось времяпролётным методом. Луч He-Ne лазера разделяется на два параллельных луча и направляется на фотодиоды сквозь экспериментальный участок. Расстояние между лучами составляло 9 см. Были проведены эксперименты с ацетоном, этанолом, изопропанолом и водноэтаноловыми растворами для каналов 2×7 , 1×7 , 0.5×7 , 1.23×4.9 и 1×3 мм с различными углами наклона

каналов к горизонту (90, 60, 45, 30 градусов). Зависимости скорости всплытия снарядов от длины не наблюдалось. Плотность, вязкость и поверхностное натяжение использованных жидкостей измерялись в ходе опытов.

При измерении коэффициентов массоотдачи дистиллированная вода протекала по рабочему участку из верхнего бака в нижний. Углекислый газ подавался через инжектор, формируя снаряд или систему снарядов. Снаряд взвешивался опускаемым потоком жидкости в месте расположения измерительной линейки, процесс растворения CO_2 фиксировался на цифровую камеру, данные с которой обрабатывались на ПК. Скорость растворения газа определялась на интервале времени порядка пяти секунд от начала процесса. Погрешность измерения коэффициента массоотдачи не превышала 10 %. При измерении коэффициента массоотдачи в прямоугольном канале для лучшего смачивания жидкостью стеклянной поверхности использовался слабый раствор щелочи КОН с концентрацией $C = 0.33$ г/л. Использование раствора КОН приводит к химической реакции в жидкой фазе, что увеличивает скорость растворения двуокси углерода. Для учета влияния щелочи на скорость растворения коэффициенты массоотдачи были измерены для трубки диаметром 8.5 мм и определена поправка на скорость реакции в жидкой фазе.

Полученные результаты

Экспериментально исследована гидродинамика течения и межфазный массообмен при снарядном течении в прямоугольных каналах малого размера и при всплытии пузырей-снарядов в неподвижной жидкости. Безразмерная скорость всплытия воздушного снаряда в ацетоне в прямоугольных каналах с заглушенным дном показана на рис. 1.

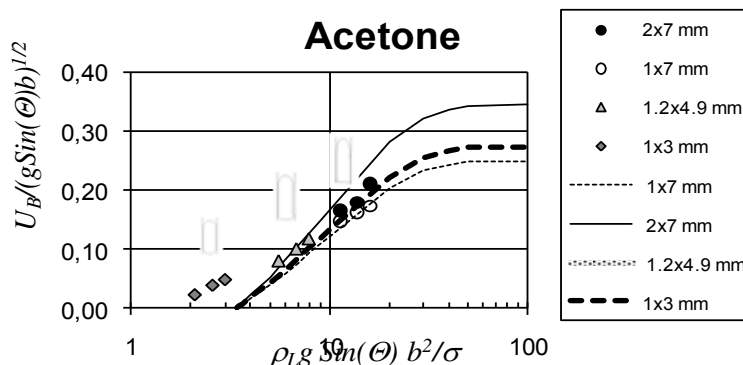


Рис. 1. Скорость всплытия снарядов воздуха в ацетоне Линии – расчет для прямоугольных каналов по Гриффитсу [1]

Здесь же показаны характерная форма всплывающих пузырей в зависимости от числа Этвеша для каналов с различным отношением сторон. Вместо обычного числа Этвеша использовано модифицированное число Этвеша, где в качестве характерного размера взят максимальный поперечный размер канала b . Всплытие снарядов в прямоугольных каналах малого размера происходит в области определяющего влияния капиллярных сил на гидродинамику течения и форму снарядов. В таких каналах капиллярные силы перераспределяют потоки жидкости, что изменяет гидродинамику течения, скорость движения снарядов и массообмен по сравнению с каналами большого размера. Важной особенностью движения пузырей в прямоугольном канале под действием гравитации является возможность их всплытия даже при числах Этвеша, меньших критического, что получено ранее в [3, 4]. Линиями на рис. 1 показан расчет по соотношению Гриффитса [1]. Экспериментальные данные существенно отклоняются от расчета, в особенности для малых чисел Этвеша.

Получены опытные данные по структуре снарядного течения системы воздух-вода в прямоугольных каналах малого размера. Вид снарядного режима течения показан на рис. 2.

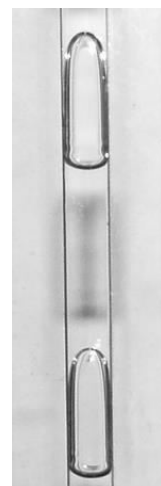
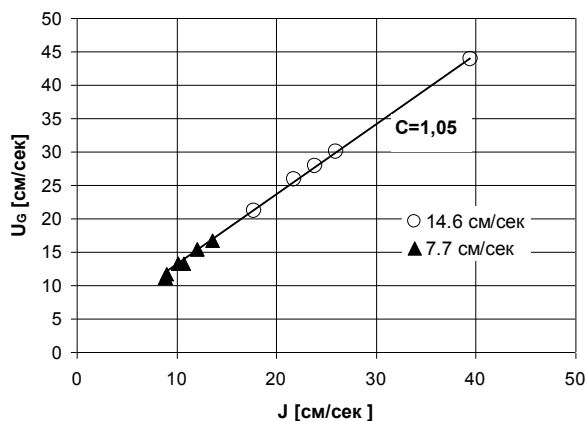


Рис. 2. Скорость движения воздушных снарядов в воде в зависимости от приведенной скорости смеси для канала 6.3x3.85 mm

В каналах малого размера снарядное течение характеризуется периодичностью и отсутствием значительного количества пузырей за снарядом. На рис. 2 приведены данные по скорости движения снарядов в зависимости от приведенной скорости смеси J_m . Обработка данных в виде

$$U_b = C \cdot J_m + U_b^{free} \quad (1)$$

показала, что величина коэффициента $C = 1.05$ существенно отличается от данных для труб большого диаметра. Скорость движения снарядов относительно жидкости может существенно превышать скорость свободного всплытия снаряда в неподвижной жидкости, что интенсифицирует межфазный массообмен.

На рис. 3 приведены опытные данные по объемному коэффициенту массоотдачи (коэффициент массоотдачи, умноженный на межфазную поверхность, отнесенную к объема канала на длине снаряда) в зависимости от относительной длины снаряда (длина снаряда L_{sl} отнесенная к наибольшему

поперечному размеру канала b). Данные получены для абсорбции углекислого газа водой при зависании одиночного снаряда в опускном потоке жидкости. Наибольшее значение объемного коэффициента массоотдачи наблюдается для снарядов малой длины в каналах прямоугольного и круглого сечений. В прямоугольных каналах объемный коэффициент массоотдачи несколько уменьшается из-за быстрого насыщения тонких пленок жидкости абсорбентом, что исключает из массообмена области со сверхтонкой пленкой жидкости на длинной стороне канала.

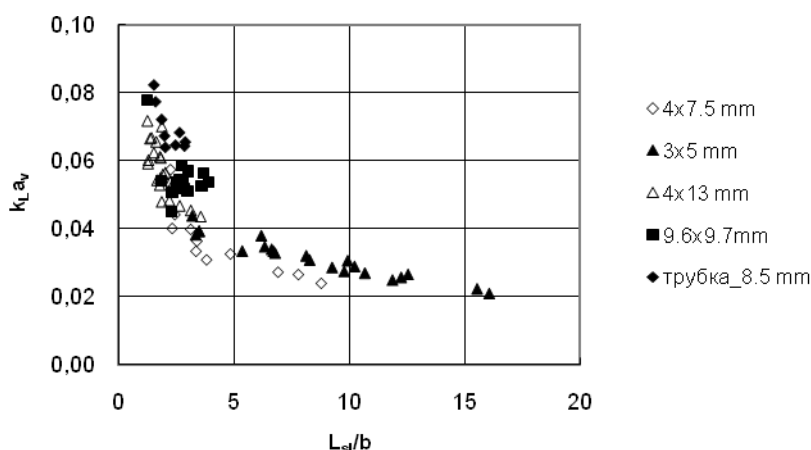


Рис. 3. Объемный коэффициент массоотдачи в зависимости от относительной длины снаряда

Закключение

Проведенное исследование гидродинамики восходящего газожидкостного снарядного течения и свободного всплытия пузырьков в вертикальных прямоугольных миниканалах показало существенное отличие относительной скорости движения фаз и формы межфазной поверхности от круглых каналов. В прямоугольном канале пузырьки всплывают практически всегда из-за течения жидкости в углах канала. На формирование снаряда и скорость его всплытия существенное влияние оказывает отношение капиллярных и гравитационных сил. Скорость движения снарядов относительно жидкости при вынужденном газожидкостном течении существенно превышает скорость всплытия снаряда в неподвижной жидкости, что интенсифицирует межфазный массообмен. Измерения объемного коэффициента массоотдачи на межфазной поверхности показало, что коэффициенты массоотдачи в каналах прямоугольного и квадратного сечений существенно зависят относительной длины снаряда. Наибольшее значение объемного коэффициента массоотдачи наблюдается для снарядов малой длины в каналах прямоугольного и круглого сечений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wallis G.B., 1969, One Dimensional Two-Phase Flow, McGraw-Hill, New York.
2. White E.T. and Beardmore R.H., The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes // Chemical Engineering Science. – Vol.17. – P. 351–361, 1962.

3. Q.C. Bi, T.S. Zhao, Taylor bubbles in miniaturized circular and noncircular channel // *Int. J. of Multiphase Flow*. - 2001. – 27. – P. 561–570.
4. Кузнецов В.В. Теплообмен при кипении в стеснённых условиях / В.В. Кузнецов, А.С. Шамирзаев // Тр. 3 Рос. национал. конф. по теплообмену, 21-25 окт. 2002, Москва. – М.: изд-во МЭИ. – 2002. – С. 119–122.
5. Berčić G.; Pintar, A. The role of gas bubbles and liquid slug lengths on mass transport in capillaries // *Chemical Engineering Science*. - 1997. – 52. – 3709–3719.

© И.Н. Ершов, В.В. Кузнецов, 2007

УДК 621.384.3

А.И. Родионов, В.Ф. Ким

СГГА, НГТУ, Новосибирск

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ КОРРЕКЦИИ ТЕПЛОВИЗОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Известно, что системы визуализации поля теплового излучения более сложны по сравнению с оптическими системами. Прежде всего, это связано с тем, что все объекты являются источниками теплового излучения. Любая тепловая сцена состоит из интересующего нас объекта - цели и паразитных объектов и теплового фона в плоскости цели. Кроме того, паразитное излучение может попадать на фотоприемник и от объектов, расположенных вблизи тепловизионного прибора. Оптика прибора оказывает ослабляющее действие на проходящее излучение и в тоже время сама излучает. Поэтому важное значение имеет периодическая коррекция тепловизионного изображения.

В докладе мы обсудим лишь один аспект проблемы визуализации тепловых полей, связанный с неоднородностью характеристик фоточувствительных элементов матричных фотоприемных устройств в тепловизионных приборах, а именно – возможность снижения так называемых геометрических шумов.

В системах тепловидения одной из основных проблем является коррекция так называемых геометрических шумов [1, 2]. Пусть каждый из $N \times N$ элементов матричного фотоприемного устройства имеют линейные отклики в интересующем нас диапазоне температур

$$U_{ij} = a_{ij}T_{ij} + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Здесь T_{ij} – наблюдаемое температурное поле, U_{ij} – электрический отклик. Матрицы коэффициентов a_{ij} и b_{ij} характеризуют разброс фоточувствительных элементов по чувствительности («усилениям») и «смещениям» и определяют так называемые геометрические шумы тепловизионного изображения. Вследствие наличия геометрических шумов электрический отклик может существенно отличаться от наблюдаемого температурного поля.

В лабораторных условиях, т. е. в условиях стендовых испытаний обычной практикой является так называемая двухточечная коррекция неоднородностей характеристик матричных фотоприемных устройств [3, 4]. Для осуществления

такой коррекции необходимо иметь два опорных, аттестованных температурных поля: однородное «холодное поле» – T_1 и однородное «теплое поле» – T_2 .

Направим на фотоприемное устройство поток от первого температурного поля T_1 и зарегистрируем отклик

$$U_{1ij} = a_{ij}T_1 + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Направим теперь на фотоприемное устройство поток от второго аттестованного температурного поля T_2 . Новая регистрация отклика дает результат

$$U_{2ij} = a_{ij}T_2 + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Имея эти два отклика легко найти поэлементно

$$a_{ij} = \frac{U_{2ij} - U_{1ij}}{T_2 - T_1}, \quad b_{ij} = \frac{T_2 U_{1ij} - T_1 U_{2ij}}{T_2 - T_1}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Коррекция откликов элементов фотоприемного устройства сводится к обработке электрических сигналов по следующему алгоритму. Вычисляем корректирующие коэффициенты

$$g_{ij} = \frac{a}{a_{ij}}, \quad s_{ij} = b_{ij} - \frac{b}{g_{ij}}, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где a и b – средние значения величин a_{ij} и b_{ij} . Затем обрабатываем поэлементно сигнал

$$V_{ij} = g_{ij}U_{ij} + s_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (6)$$

В результате такой обработки все элементы фотоприемного устройства оказываются «настроены» на некоторый средний элемент:

$$V_{ij} = aT_{ij} + b, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (7)$$

Поле V_{ij} может рассматриваться как скорректированное электрическое «изображение» теплового поля T_{ij} , свободное от геометрического шума.

Алгоритм двухточечной коррекции весьма прост и не представляет больших сложностей, как при цифровой, так и при аналоговой реализации. На качестве коррекции сказывается, в основном, качество аттестованных полей T_1 и T_2 . Обычно в качестве «холодного» поля T_1 предлагается брать поле собственного диффузного отражения. Однако второе однородное поле T_2 приходится специальным образом формировать, что представляет собой большую сложность вне лабораторных условий. Поэтому для коррекции геометрического шума матричного фотоприемника в рабочем режиме следует предложить иные алгоритмы, опирающиеся либо на одно опорное температурное поле, либо не использующие вообще никаких аттестованных температурных полей.

Нами предлагаются два способа, позволяющих обойтись одним аттестованным температурным полем в целях коррекции. Первый из них может быть назван методом калиброванного ослабления. Суть метода заключается в следующем.

Направим на фотоприемное устройство поток от однородного температурного поля T_0 . Имеем отклик:

$$U_{1ij} = a_{ij}T_0 + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (8)$$

Введем теперь в поток излучения калиброванное ослабление (τ) и снова найдем отклик фотоприемного устройства

$$U_{2ij} = a_{ij}\tau T_0 + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (9)$$

Далее осуществляем коррекцию без промежуточного вычисления матриц коэффициентов a_{ij} и b_{ij} , а именно

$$V_{ij} = k_1 \frac{U_{ij} - U_{2ij}}{U_{1ij} - U_{2ij}} + k_2, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (10)$$

где k_1 и k_2 – произвольные постоянные, подбираемые из соображений максимальной видности изображения.

Легко найти, что при такой обработке электрического сигнала

$$V_{ij} = k_1 \frac{T_{ij} - T_0}{(1 - \tau)T_0} + k_2. \quad (11)$$

Видно, что произошла коррекция неравномерности характеристик элементов.

Очевидно, что аналогичную коррекцию можно осуществить, используя вместо ослабления диафрагмирование потока излучения от аттестованного температурного поля.

Второй метод, который мы предлагаем, требует формирования также одного аттестованного температурного поля, но неоднородного. Выберем в качестве примера линейное поле – температурный «клин».

Пусть температурное поле T_0 является линейным в направлении оси Y . В оцифрованном виде это поле можно представить в виде

$$T_{0ij} = \alpha j + \beta, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (12)$$

Направим на фотоприемное устройство «сдвинутые» (на m и n элементов) температурные поля

$$T_{mij} = T_{0i, j+m}, \quad T_{nij} = T_{0i, j+n}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Тогда будем иметь отклики

$$U_{mij} = a_{ij}T_{mij} + b_{ij}, \quad U_{nij} = a_{ij}T_{nij} + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (14)$$

Произведем коррекцию

$$V_{ij} = k_1 \frac{U_{ij} - U_{nij}}{U_{mij} - U_{nij}} + k_2, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (15)$$

Легко видеть, что при этом

$$V_{ij} = k_1 \frac{T_{ij} - \alpha(j+m) - \beta}{\alpha(m-n)} + k_2, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (16)$$

При известных значениях α, β, m, n происходит полная коррекция сигнала.

Если в качестве калиброванного температурного поля выбрать другое неоднородное поле, то формулы для коррекции усложняются, но сама

принципиальная возможность коррекции геометрических шумов аналогичным приемом сохраняется.

Третье наше предложение касается возможности проведения коррекции геометрических шумов при использовании двух неаттестованных тепловых полей. Суть предлагаемой коррекции состоит в том, чтобы за счет случайного сканирования тепловых сцен получить эффективные квазиоднородные температурные поля $T_{1эфф}$ и $T_{2эфф}$ и далее проводить двухточечную коррекцию.

Направим на фотоприемное устройство поток от первого неаттестованного температурного поля (условно: «холодная сцена»). Проводим случайное сканирование этой сцены, накапливаем и усредняем отсчеты. Тогда, как результат, мы будем иметь отклик фотоприемного устройства

$$U_{1ij} = a_{ij}T_{1эфф} + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (17)$$

Проведем аналогичное сканирование и усреднение второго неаттестованного температурного поля (условно: «теплая сцена»). Имеем отклик фотоприемного устройства

$$U_{2ij} = a_{ij}T_{2эфф} + b_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (18)$$

Далее проводим обработку сигналов U_{ij} , U_{1ij} , U_{2ij} по алгоритму

$$V_{ij} = k_1 \frac{U_{ij} - U_{2ij}}{U_{1ij} - U_{2ij}} + k_2, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (19)$$

где k_1 и k_2 – произвольные постоянные, подбираемые из соображений максимальной видности теплового изображения. В итоге такой обработки мы снова получаем скорректированное тепловое изображение.

Таким образом, предложенные методы коррекции геометрических шумов с использованием одного аттестованного теплового поля и двух неаттестованных полей просты для аппаратной реализации и могут быть использованы для коррекции тепловизионного изображения в реальном масштабе времени, то есть непосредственно в процессе работы тепловизионного прибора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения: монография / Дж. Ллойд. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
2. Жуков А.Г. Тепловизионные приборы и их применение: монография / А.Г. Жуков, А.Н. Горюнов, А.А. Кальфа. – М.: Мир, 1988. – 399 с.
3. Carrison C.L. Nonuniformity Compensation Technique for Staring Infrared (IR) Focal Planes / C.L. Carrison, N.A Foss // SPIE. – 1979. – V. 178. – P. 99–109.
4. McEwen R.K. A Signal Processor for Plane Detector Arrays / R.K. McEwen // SPIE. – 1986. – V.685. – P.152–157.

© А.И. Родионов, В.Ф. Ким, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Карпик А.П., Ушаков О.К., Кашлатый Р.Е., Петров П.В., Головачёв Ю.Г., Придачин Н.Б., Поллер Б.В., Чугуй Ю.В. Состояние и перспективы развития научно-образовательного центра «СГГА – СО РАН».....	3
Тымкул В.М., Шелковой Д.С., Слюсарев Д.С. Математическая модель чувствительности пирометра при воздействии помех неоднородного фона	6
Тымкул В.М., Фесько Ю.А. Математическая модель работы пирометра двойного отношения	10
Тымкул Л.В. Математическая модель работы приборов ночного видения в поляризованном свете	14
Поликанин А.Н. Математическая модель пространственно-частотной передаточной функции фовеальной области человеческого глаза.....	19
Шойдин С.А. Прицел-целеуказатель на основе зрительной системы Галилея	24
Шойдин С.А. Проблемы информационной избыточности для систем технического зрения.....	26
Шойдин С.А. Вопросы информационной избыточности сформированных голограммой изображений	27
Шаталов И.Г., Пен Е.Ф. Методы цифровой голографии для зондирования рельефных объектов и объемов частиц.....	29
Кимайкин В.С., Сырецкий Г.А. Методы предварительной обработки для информационной идентификации оптического изображения.....	34
Удальцов Е.В. Метод передачи служебной информации с помощью осветительной сети на лампах типа ДРЛ.....	39
Удальцов Е.В. Обзор основных параметров ультрафиолетовых полупроводниковых источников излучения	44
Ефремов В.С., Новиков О.О. Повышение информативности ОЭС.....	50
Луговский А.Ю., Танакова В.С. Применение болометрической матрицы для тепловизионных систем.....	53
Грицкевич Е.В., Звягинцева П.А. Разработка математической модели матричного анализатора	55
Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н., Верещагин П.А. Волоконно-оптическая система для обнаружения, регистрации зарождения и распространения усталостных трещин элементов строительных конструкций	57
Каримов Б.Х., Рахимов Н.Р., Каримов Ш.Б. Малогабаритный фотогенератор на основе АФН-пленок	62
Скляр Д.Ф. Принципы построения защищенных высокоскоростных атмосферных оптических каналов связи	64
Кропин Р.А. Простой анализатор проводных коммуникаций.....	69
Игнатьева Н.Ю., Слободкин В.С. Разработка и исследование систем обнаружения и блокирования средств мобильной связи, организованных по методу кодовой развертки	73

Прихода А.Г., Новоселова Т.И., Захаркин А.К. Метрологическое обеспечение и стандартизация геофизических и сопровождающих их геодезических работ при геологическом изучении недр	78
Сурнин Ю.В. Локальная поверочная схема для эталонного геодезического полигона СГГА и рабочих средств измерений	83
Могильницкий Б.С., Тиссен В.М., Толстиков А.С., Юданин А.Я. Определение параметров вращения Земли по результатам траекторных измерений.....	88
Тиссен В.М., Толстиков А.С., Малкин З.М. Опыт краткосрочного и долгосрочного прогнозирования параметров вращения Земли	92
Лизунов В.Д., Куликова Л.Г., Середович В.А. Задачи метрологического обеспечения современных геодезических высокоточных средств измерений.....	95
Лизунов В.Д., Новоевский В.Т., Куликов А.В. О методах контроля прямолинейности направляющих больших длин	96
Макаров И.Е., Толстиков А.С. Сравнительный анализ методов синхронизации пространственно-разнесенных часов по навигационным сигналам.....	98
Могильницкий Б.С., Бикмухаметов К.А. Интерференционная установка высшей точности для воспроизведения и хранения единицы длины в диапазоне до 10 м с погрешностью на уровне < 0.1 мм (УВТ – 10 м)	103
Черепанов В.Я. Модуляционный метод компарирования энергетических величин.....	108
Шувалов Г. В. Приборы экспресс-анализа нефтепродуктов.....	113
Шувалов Г.В., Жуков А.Ю., Ясырова О.В. Аккредитация испытательной лаборатории нефтепродуктов на базе измерительного комплекса «КЛАН-1»	117
Воробьева Л.Б. Определение термических параметров свинцовосиликатных стекол	121
Непочатова А.В., Черепанов В.Я. Основные требования к теплофизическим и метрологическим характеристикам тепломеров для измерительных теплообменников	124
Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Анализ возможностей создания миниатюрных ампул для реализации реперных точек температурной шкалы	127
Лизунов В.Д., Куликова Л.Г. Внедрение федерального закона «О техническом регулировании» в учебном процессе.....	131
Симонова Г.В., Хлебникова Е.П. Сравнительный анализ методик формирования эталонов при обработке цифровых изображений.....	133
Плетнев П.М., Рогов В.И., Степанова С.А. Контроль качества алюмооксидной керамики по ее светопропусканию	138
Войтенко В.А., Миникес Р.Э. Современные проблемы метрологического обеспечения статистических гравиметров	143

Савелькаев С.В., Устюгов М.Б., Плавский Л.Г. Теоретические основы построения адаптивных двухсигнальных анализаторов СВЧ-цепей.	147
Савелькаев С.В., Филимонов Б.П., Устюгов М.Б. К оценке суммарной погрешности измерения анализаторов СВЧ-цепей	152
Савелькаев С.В., Филимонов Б.П., Устюгов М.Б. Методика оценки суммарной погрешности измерения анализаторов СВЧ-цепей	157
Теплых А.Н. К вопросу о понятиях «ошибка» и «погрешность» измерения	160
Теплых А.Н., Хатюшин С.В. Анализ погрешности индикаторов веса на разрывной машине МР-500	164
Павленко А.Н., Суртаев А.С., Чернявский А.Н., Володин О.А. Исследование быстропротекающих процессов тепломассопереноса при термостабилизации стекающей плёнкой жидкости в условиях нестационарной тепловой нагрузки	168
Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Чехович В.Ю., Жуков В.Е., Серов А.Ф., Назаров А.Д. Использование емкостного метода измерений для регистрации локальных гидродинамических параметров парожидкостных потоков в миниканалах	173
Тесленко В.С., Медведев Р.Н., Дрожжин А.П. Электрогидродинамический автоколебательный эффект на множественных концентраторах тока	178
Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С. Режимы течения и теплообмен при вынужденном течении хладагента R318C в кольцевом обогреваемом миниканале.....	183
Кузнецов В.В., Витовский О.В., Гасенко О.А. Неполное окисление метана в кольцевом микрореакторе	188
Кузнецов В.В., Сафонов С.А., Козлов С.П. Численное моделирование конверсии метана в синтез газа в микроканальном реакторе	193
Димов С.В., Кузнецов В.В., Хасин А.А. Теплопроводность микроструктурных композитных катализаторов, содержащих высокотеплопроводный армирующий компонент	198
Ершов И.Н., Кузнецов И.Н. Массообмен при снарядном течении в миниканалах монолитных реакторов.....	203
Родионов А.И., Ким В.Ф. Об одном методе коррекции тепловизионного изображения в реальном масштабе времени.....	207