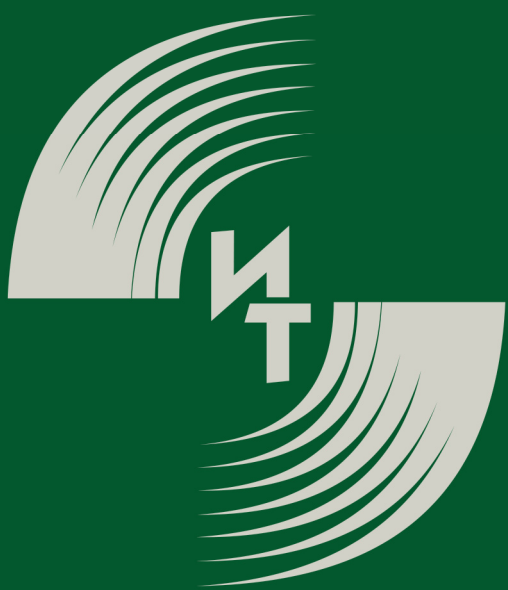




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА  
2020  
№6**





организаторы

**МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ**

**РСТ** **РОССТАНДАРТ**  
Федеральное агентство  
по техническому регулированию  
и метрологии

**КРОКУС ЭКСПО**  
Международный выставочный центр



## УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ МЕЖДУНАРОДНОГО ИННОВАЦИОННОГО ФОРУМА И ВЫСТАВКИ «МЕТРОЛЭКСПО»!

*Руководитель Федерального  
агентства по техническому  
регулированию и метрологии  
**Алексей Абрамов***

В условиях сложной эпидемиологической ситуации в мире и в России Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии совместно с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации принято решение о переносе сроков проведения Международного инновационного форума и выставки «МетролЭкспо».

В 2020 г. организаторы выставки провели большую работу по созданию нового формата форума и выставки «МетролЭкспо». Удалось привлечь представителей ведущих предприятий и компаний в области приборостроения и измерительной техники, госкорпораций, российских и международных экспертов в области метрологии, аккредитации, подготовки кадров.

В свою очередь, система Росстандарта – метрологические институты и региональные центры – подготовила уникальный концепт общей выставочной экспозиции, собрав на ней лучшие образцы и проекты для метрологического обеспечения ведущих отраслей экономики.

Вместе с тем, ваше здоровье и спокойствие ваших близких – наша главная ценность. Поэтому предлагаю сохранить этот задел, чтобы провести запланированную встречу на площадке «МетролЭкспо» в мае 2021 г.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020 № 6<sup>июнь</sup>

Ежемесячный  
научно-технический  
журнал

Основан в 1939 г.

Издаётся  
с приложением  
«Метрология»

## УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство  
по техническому регулированию  
и метрологии

ФГУП «Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт метрологии  
им. Д. И. Менделеева»

ФГУП «Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт оптико-физических  
измерений»

ФГУП «Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт физико-технических и  
радиотехнических измерений»

ФГУП «Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт метрологической  
службы»

ФГУП «Российский  
научно-технический центр  
информации по стандартизации,  
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

Т. А. Компан, В. И. Кулагин, В. В. Власова, С. В. Кондратьев, А. Я. Лукин,  
Н. Ф. Пухов. Государственный первичный эталон единицы удельной тепло-  
ёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019 ..... 3

### ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Т. А. Алиев, Н. Ф. Мусаева, Н. Э. Рзаева, А. И. Мамедова. Технологии умень-  
шения погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа за-  
шумлённых сигналов ..... 9

### ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. И. Колпаков, А. М. Райцин, М. В. Улановский. Метод передачи единицы мощ-  
ности высокоинтенсивного лазерного излучения ..... 17

В. В. Григорьев, А. К. Митюреев, А. О. Погонишев, К. Б. Савкин. Высокоточная  
установка для измерений длины волны отсечки одномодового оптического  
волокна ..... 22

### ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров, С. С. Донченко, Е. В. Чемесова. Система  
одно- и двухсторонних сравнений шкал времени с использованием эффекта  
вынужденного комбинационного рассеяния в оптическом волокне ..... 27

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. В. Герасютенко, А. В. Шарков, В. А. Кораблев, Д. А. Минкин. Совершенство-  
вание методов и средств поверки и градуировки тепловизоров ..... 33

Н. О. Вздудева, В. Б. Гитлин. Оптимизация времени выхода термостатов хро-  
матографа на заданную температуру ..... 40

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. В. Сандуляк, Р. Ю. Ткаченко, Д. А. Сандуляк, М. Н. Полисмакова, А. А. Сан-  
дуляк, В. А. Ершова. Анализ зависимости магнитных свойств гранулирован-  
ных ферромагнитных образцов от соотношения их длины к диаметру ..... 46

### РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

С. Н. Карутин, В. Н. Харисов, В. С. Павлов. Синтез помехоустойчивого прос-  
транственно-временного фильтра для высокоточных измерений навига-  
ционных параметров по сигналам глобальных навигационных спутниковых  
систем ..... 52

### АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. Е. Исеев, А. М. Поликарпов, С. В. Сильвестров, Н. Г. Щерблюк. Эталонная  
установка для передачи единицы звукового давления в ультразвуковом диа-  
пазоне частот ..... 61

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

И. А. Питерских, С. В. Вихрова, Н. Г. Ковалева, Т. О. Баринская. Разработка  
стандартных образцов состава растворов пропиловых спиртов ..... 66

**Главный редактор**  
**С. С. Голубев**

**Редакционная коллегия:**

**В. И. Белоцерковский**

**С. И. Донченко**

**И. В. Емельянова**

(зам. гл. редактора)

**Л. К. Исаев**

**А. Д. Козлов**

**Е. П. Кривцов**

**В. Н. Крутиков**

**А. Ю. Кузин**

**С. В. Медведевских**

**А. И. Механиков**

**В. В. Окрепилов**

**В. Н. Храменков**

**И. А. Шайко**

**В. В. Швыдун**

**Журнал переводится  
на английский язык  
под названием  
«Measurement  
Techniques»  
издательством Springer  
[www.springer.com/11018](http://www.springer.com/11018)**

Корректор *М. В. Бучная*  
Компьютерная вёрстка *С. А. Мамедова*

Сдано в набор: 25.05.2020.  
Подписано в печать: 23.06.2020.  
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 250 экз. Зак. 20-41л.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572  
от 15.07.2005.

Адрес редакции: 119361 Москва, ул. Озёрная, 46,  
ФГУП «ВНИИМС»  
Тел.: +7 (495) 781-48-70  
e-mail: [izmt@vniims.ru](mailto:izmt@vniims.ru)  
[www.izmt.ru](http://www.izmt.ru)

Редакция не несёт ответственности за  
содержание рекламных материалов. Точка зрения  
редакции может не совпадать с мнением авторов.

ООО «Типография Миттель Пресс»  
127254 Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 14

© Измерительная техника, 2020

**STATE STANDARDS**

*T. A. Kompan, V. I. Kulagin, V. V. Vlasova, S. V. Kondratiev, A. Ya. Lukin, N. F. Pukhov.*  
*The State primary standard of the unit of specific heat capacity of solids GET 60-2019.....3*

**MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES**

*T. A. Aliev, N. F. Musaeva, N. E. Rzayeva, A. I. Mammadova.* Development of technologies for reducing the error of traditional algorithms of correlation analysis of noisy signals.....9

**OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS**

*A. I. Kolpakov, A. M. Raitsin, M. V. Ulanovskii.* Method for transmitting a power unit high-intensity laser radiation .....17  
*V. V. Grigoriev, A. K. Mityurev, A. O. Pogonyshv, K. B. Savkin.* High-precision apparatus for measuring cutoff wavelength of the single-mode optical fiber .....22

**TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS**

*O. V. Kolmogorov, D. V. Prokhorov, S. S. Donchenko, E. V. Chemesova.* A system of one- and two-way comparisons of time scales using stimulated Raman scattering..... 27

**TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS**

*V. V. Gerasyutenko, A. V. Sharkov, V. A. Korablev, D. A. Minkin.* Improvement of methods and means of thermal imagers verification and calibration .....33  
*N. O. Vzduleva, V. B. Gitlin.* Optimization of the time the chromatograph thermostats exit to a given temperature.....40

**ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS**

*A. V. Sandulyak, R. Y. Tkachenko, D. A. Sandulyak, M. N. Polismakova, A. A. Sandulyak, V. A. Ershova.* Analysis of dependence between magnetic properties of granulated ferromagnetic specimens and relation of its length to diameter..... 46

**RADIO MEASUREMENTS**

*S. N. Karutin, V. N. Kharisov, V. S. Pavlov.* Synthesis of interference resistant spatio-temporal filter for navigation parameters high precision measurements using global navigation satellite systems.....52

**ACOUSTIC MEASUREMENTS**

*A. E. Isaev, A. M. Polikarpov, S. V. Sil'vestrov, N. G. Shcherblyuk.* The standard facility for the transmission the unit of sound pressure at ultrasonic frequencies.....61

**PHYSICOCHEMICAL MEASUREMENTS**

*I. A. Piterikh, S. V. Vikhrova, N. G. Kovaleva, T. O. Barynskaya.* Development of reference materials with the composition of propyl and isopropyl alcohol solutions..... 68

## Государственный первичный эталон единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019

Т. А. Компан<sup>1</sup>, В. И. Кулагин<sup>1</sup>, В. В. Власова<sup>1</sup>, С. В. Кондратьев<sup>1</sup>, А. Я Лукин<sup>2</sup>, Н. Ф. Пухов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: T.A.Kompan@vniim.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: alexander\_lukin@inbox.ru

Описаны результаты проведённых в период 2017–2019 гг. работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы удельной теплоёмкости ГЭТ 60-74. В ходе совершенствования ГЭТ 60-74 создан комплекс высокоточных средств измерений, составивших новый Государственный первичный эталон теплоёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019 во главе с высокоточным адиабатическим калориметром КА-С4. Для воспроизведения и передачи единицы от ГЭТ 60-2019 средствами измерений низших разрядов создан комплект эталонных мер удельной теплоёмкости. Разработана поверочная схема передачи единицы удельной теплоёмкости от ГЭТ 60-2019 средствами измерений более низких разрядов. Расширенная неопределённость измерений на основном адиабатическом калориметре КА-С4 эталонного комплекса в рабочем диапазоне температуры ГЭТ 60-2019 не превышает 0,27–0,36 % при коэффициенте охвата  $k=2$ .

**Ключевые слова:** эталон, теплоёмкость, адиабатический калориметр, меры удельной теплоёмкости, метрологические характеристики.

**Введение.** Актуальность совершенствования Государственного первичного эталона единицы удельной теплоёмкости ГЭТ 60-74 обусловлена возросшими требованиями к точности передачи единицы создаваемых средств измерений, необходимостью метрологического обеспечения средств измерений со специфической конструкцией и функциональностью, новыми технологиями и задачами науки [1–6].

Откликом на резко возросший в мире интерес к исследованию теплофизических свойств материалов явилось создание в последние 30 лет по сути новой отрасли промышленности – теплофизического приборостроения. В арсенале учёных появились серийные приборы термического анализа, позволяющие измерять комплекс свойств, в том числе энтальпию и теплоёмкость материалов. Для обеспечения единства этого вида измерений во многих промышленно развитых странах были созданы прецизионные установки для измерений удельной теплоёмкости твёрдых тел, выполняющие функции национальных эталонов в США [7–10], Германии [11–13], Японии [14–17] и Китае [18].

Практически во всех установках высокой точности в качестве основного метода измерений используется адиабатический метод измерения с периодическим вводом тепловой энергии. Этот метод многократно проверен на практике и по существу является негласным стандартом для данного типа измерений.

В 1974 г. в России был создан ГЭТ 60-74 [19]. Со времени создания он выработал ресурс и устарел морально и физически. Для актуализации метрологического обеспечения средств измерений удельной теплоёмкости во ВНИИМ

им. Д. И. Менделеева в период 2017–2019 гг. проведена работа по совершенствованию ГЭТ 60-74, основанная на новых конструктивных решениях с учётом изменившихся технических возможностей. В результате проведённых работ утверждён Государственный первичный эталон единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019.

**Принцип функционирования и составные части эталонного комплекса.** ГЭТ 60-2019 представляет собой комплекс средств измерений, служащий для воспроизведения, хранения единицы удельной теплоёмкости и её передачи вторичным эталонам. Комплекс средств измерений ГЭТ 60-2019 включает в себя:

- калориметр адиабатический КА-С4;
- калориметр-компаратор для передачи единицы вторичным эталонам – мерам удельной теплоёмкости;
- меры удельной теплоёмкости из лейкосапфира, меди, молибдена и бериллия.

**Калориметр адиабатический КА-С4.** В калориметре КА-С4 реализован адиабатический метод с периодическим вводом теплоты [20]. Как отмечалось выше, метод дискретных нагревов является основным в адиабатической калориметрии для получения наиболее точной температурной зависимости теплоёмкости в широком интервале температур.

Калориметр КА-С4 состоит из выполненной из серебра калориметрической ячейки цилиндрической формы и окружающих её двух охранных (адиабатических) оболочек, а также наружного кожуха, на внутренней поверхности которого расположен фоновый нагреватель (рис. 1).

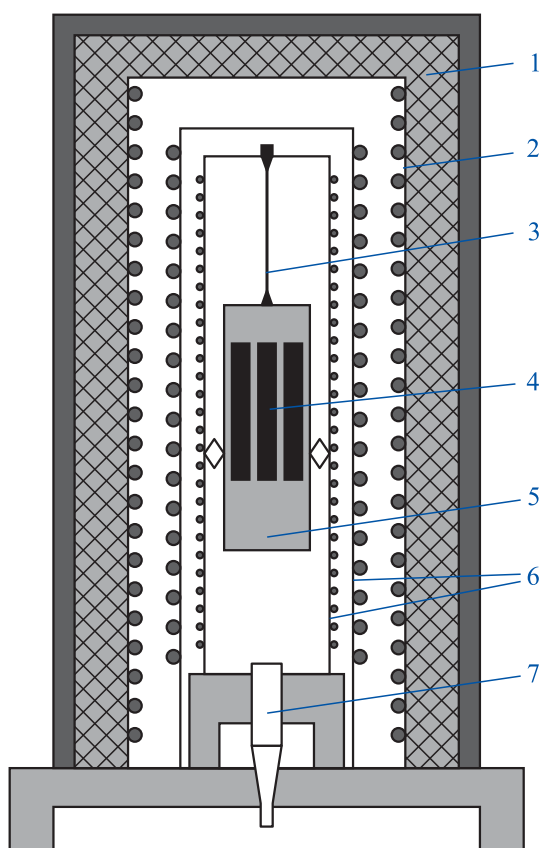


Рис. 1. Разрез калориметра адиабатического КА-С4:

1 – изоляция; 2 – фоновый нагреватель; 3 – нить подвеса ячейки; 4 – средства измерений температуры (платиновые термометры сопротивления); 5 – ячейка калориметра из серебра; 6 – адиабатические оболочки с нагревателями; 7 – коммуникационный узел

Fig. 1. Sectional drawing of adiabatic calorimeter KA-C4

1 – insulation; 2 – background heater; 3 – wire of cell suspension; 4 – temperature measuring instruments (platinum resistance thermometers); 5 – silver calorimeter cell; 6 – adiabatic shells with heaters; 7 – communication unit

Ячейка (рис. 2) содержит цилиндрические каналы для размещения исследуемых образцов, каналы для центрального измерительного термометра сопротивления, а также для двух термометров сопротивления, включённых в главный контур системы автоматического регулирования по обеспечению адиабатических условий калориметрического опыта. В специальных каналах малого диаметра, расположенных в пространстве между основными каналами для образцов и симметрично относительно центральной оси, размещён нихромовый нагреватель в керамической изоляции для нагрева ячейки.

Реализованная таким образом конструкция ячейки с максимально близко расположенными каналами для размещения образцов, термометров и нагревателя обеспечивает быстрое выравнивание температуры по всему объёму ячейки после подачи на нагреватель теплового импульса.

Геометрические размеры охранных оболочек и их местоположение в калориметре подобраны таким образом, чтобы минимизировать тепловые потери, вызванные разными механизмами передачи теплоты. Каждая оболочка представляет собой закрытый крышкой стакан из серебра, на внешней стороне цилиндрической поверхности спирально намотан нагреватель. Каждая оболочка устанавливается на диск из теплоизоляционного материала (микропористой изоляционной плиты 30,0 PROMALIGHT-1000R). Ячейка с помощью тонкого нихромового держателя подвешивается к крышке оболочки коаксиально охранным оболочкам.

Весь калориметрический блок (ячейка и охранные оболочки) заключён в герметизируемый наружный кожух, на внутренней поверхности которого укреплена теплоизоляция из материала с низкой теплопроводностью. Там же расположен фоновый нагреватель, обеспечивающий достижение и поддержание требуемой температуры в калориметре в диапазоне 30–600 °С. Нагреватели в ячейке и на охранных оболочках предназначены для выравнивания температуры в зоне расположения образцов. Для проведения измерений при отрицательных температурах служит специально разработанный криотермостат, который с помощью вспомогательной системы направляющих устанавливается на станину вместо наружного кожуха.

Измерительно-управляющая система размещена в отдельной компактной стойке и содержит средства измерений и устройства для управления нагревателями калориметра.

Разработанное программное обеспечение реализует заданный оператором температурный режим оболочек калориметра и процедуру нагрева ячейки.

Кроме того, система позволяет регистрировать и отображать на дисплее количество поданной в ячейку тепловой энергии, температуру ячейки, оболочек и печи, разность последующего и предыдущего показаний температуры, температурный тренд и отклонение от тренда, а затем и сохранять эти данные в файл вместе с рядом вспомогательных параметров для последующей обработки. По результатам измерений система в реальном времени обрабатывает данные и вычисляет удельную теплоёмкость исследуемого материала.

**Калориметр-компаратор.** Для передачи единицы удельной теплоёмкости вторичным эталонам – мерам удельной теплоёмкости – в состав ГЭТ 60-2019 введён калориметр-компаратор. Компаратор представляет собой дифференциальный сканирующий калориметр компенсационного типа. В калориметре имеются две ячейки, в одной из которых размещён эталонный материал, в другой – исследуемый. Ячейки обладают малым объёмом (~0,8 см<sup>3</sup>), что обеспечивает малую тепловую инерцию, и выполнены из платины для минимизации температурных градиентов. Каждая ячейка снабжена встроенными нагревателями и платиновыми термометрами.

Калориметр-компаратор имеет два контура регулирования:

первый контур обеспечивает нагрев ячеек по заданному закону; в большинстве случаев – линейный нагрев ( $T = T_0 + dT/d\tau$ ,  $dT/d\tau$  – скорость нагрева);

второй контур поддерживает в процессе нагрева равенство температуры между ячейками, подавая компенсационную мощность в одну из ячеек в зависимости от знака разбаланса.

Компенсационная мощность  $\Delta P$  равна разности мощностей, необходимых для нагрева каждой ячейки со скоростью  $dT/dt$ :

$$P_э = C_э dT/dt + P_n;$$

$$P_и = C_и dT/dt + P_n,$$

где индекс «э» относится к величинам, характеризующим эталонный материал, а индекс «и» – исследуемый;  $C_э$ ,  $C_и$  – теплоёмкость соответственно эталонного и исследуемого материалов; (сканирования);  $P_n$  – мощность, расходуемая на компенсацию теплотерьер ячеек.

При равенстве мощности  $P_n$  ячеек регистрируемая мощность выражается формулой:

$$\Delta P = (C_э - C_и) dT/dt.$$

Данный компаратор обеспечивает выполнение измерений в интервале температур  $-60...+750$  °С. Диапазон скоростей нагрева 0,2–100,0 К/мин.

**Меры удельной теплоёмкости и система передачи.** Одной из задач совершенствования ГЭТ 60-74 было создание комплекта эталонных мер для воспроизведения и передачи единицы от ГЭТ 60-2019 средствам измерений, функционирующим в заданном диапазоне температур. При создании средств передачи – мер удельной теплоёмкости – наиболее важным фактором является их стабильность во времени, в том числе при многократных изменениях температуры во всём рабочем диапазоне температур.

Подтверждение стабильности материалов для применения их в качестве эталонных мер удельной теплоёмкости потребовало проведения многократных длительных исследований ряда материалов. На основании предварительного анализа определены количество допустимых нагревов и максимально допустимая температура нагрева.

В качестве основного материала для передачи выбран монокристаллический оксид алюминия (лейкосапфир). Образцы из данного материала в течение многих лет применяют в международной практике в качестве стандартного референтного материала (Standard Reference Material 720) [21–24]. Использование данного материала позволит сличать результаты, получаемые на ГЭТ 60-2019 и эталонных калориметрах ведущих метрологических институтов других стран.

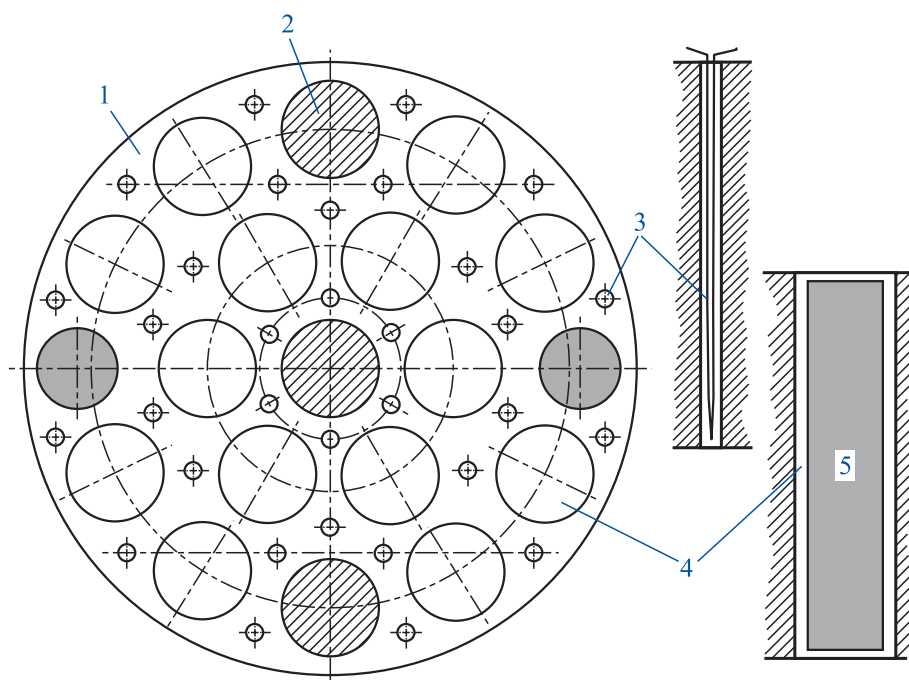


Рис. 2. Ячейка калориметра:

1 – корпус ячейки калориметра из серебра; 2 – средства измерений температуры (платиновые термометры сопротивления); 3 – распределённый нагреватель; 4 – отверстия в теле ячейки для образцов; 5 – исследуемые образцы

Fig. 2. Calorimeter cell:

1 – silver calorimeter cell housing; 2 – temperature measuring instruments (platinum resistance thermometers); 3 – distributed heater; 4 – hollows for samples in the cell; 5 – samples under investigation

#### Метрологические характеристики исследованных материалов

| Материал    | $u_A$ , % | $u_B$ , % | $u_C$ , % | $U_{0,95}(k=2)$ , % |
|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Лейкосапфир | 0,140     | 0,004     | 0,140     | 0,280               |
| Молибден    | 0,179     | 0,004     | 0,179     | 0,358               |
| Медь        | 0,174     | 0,004     | 0,174     | 0,348               |
| Бериллий    | 0,136     | 0,004     | 0,136     | 0,272               |

С учётом всех вышеперечисленных требований к материалам для дальнейшего исследования и аттестации их в качестве эталонных мер удельной теплоёмкости дополнительно были выбраны следующие материалы: молибден, медь, бериллий.

В таблице приведены основные метрологические характеристики исследованных материалов.

За период исследования все выбранные материалы демонстрировали воспроизводимость результатов измерений удельной теплоёмкости с расширенной неопределённостью, не превышающей 0,272–0,358 % в заданном диапазоне температур.

По результатам исследования меры удельной теплоёмкости из четырёх материалов (лейкосапфира, молибдена, меди и бериллия) были внесены в состав ГЭТ 60-2019.

**Анализ точности воспроизведения единицы удельной теплоёмкости на калориметре КА-С4.** Важнейшими метрологическими характеристиками ГЭТ 60-2019 являются: диапазон измеряемых теплоемкостей; диапазон рабочих температур; погрешность воспроизведения единицы удельной теплоёмкости; погрешность передачи единицы вторичным эталонам-мерам, изготовленным из различных материалов.

Для определения характера и значений погрешностей было проведено исследование разработанного калориметра КА-С4.

Большое внимание уделено выявлению и устранению систематических погрешностей, а также разработке методики измерений удельной теплоёмкости различных материалов. Систематические погрешности искажают результаты измерений поданной в калориметр теплоты и температуры аттестуемой меры удельной теплоёмкости. Разработанная методика обеспечивает получение результатов с максимальной точностью.

В настоящее время ещё не состоялись международные сличения для подтверждения эквивалентности ГЭТ 60-2019, поэтому проведено сравнение результатов измерений, полученных во ВНИИМ, с результатами, опубликованными исследователями ряда ведущих метрологических институтов.

Метрологические характеристики адиабатического калориметра КА-С4

|                                                                                                 |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Диапазон измерений удельной теплоёмкости.....                                                   | 50–2900 Дж/(кг·К) |
| Диапазон температур.....                                                                        | 260–860 К         |
| Среднее квадратическое отклонение результата измерений (при $n=50$ независимых измерениях)..... | 0,136–0,179 %     |
| Неисключённая систематическая погрешность.....                                                  | <0,008 %          |
| Стандартная неопределённость                                                                    |                   |
| по типу А.....                                                                                  | 0,136–0,179 %     |
| по типу В.....                                                                                  | <0,004 %          |
| Суммарная стандартная неопределённость.....                                                     | 0,136–0,179 %     |
| Расширенная неопределённость (при $k = 2$ ).....                                                | 0,272–0,358 %     |

На рис. 3 приведены отклонения полученных результатов удельной теплоёмкости лейкосапфира от значений обобщающего полинома (Archer NIST – обобщение экспериментальных данных многих авторов) [21]. Сравнение результатов измерений теплоёмкости лейкосапфира, полученных во ВНИИМ на ГЭТ 60-2019, с результатами исследований ведущих метрологических центров показало, что расхождения не превышают расширенной неопределённости ГЭТ 60-2019, полученной при его исследованиях.

Достигнутый уровень точности созданного адиабатического калориметра КА-С4 достаточно высок и не уступает уровню точности, достигнутому в национальных метрологических институтах других стран. Полученный уровень точности представляется достаточным для удовлетворения запросов науки и промышленности на доступную прогнозированию перспективу порядка десяти лет.

**Поверочная схема передачи единицы удельной теплоёмкости.** Государственная поверочная схема (ГПС) устанавливает порядок передачи единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел от государственного первичного эталона с помощью вторичных эталонов с указанием погрешностей и основных методов поверки.

Согласно проекту в ГПС на средства измерений удельной теплоёмкости внесены следующие изменения:

расширен диапазон удельной теплоёмкости имеющихся вторичных эталонов – мер удельной теплоёмкости – в сторону

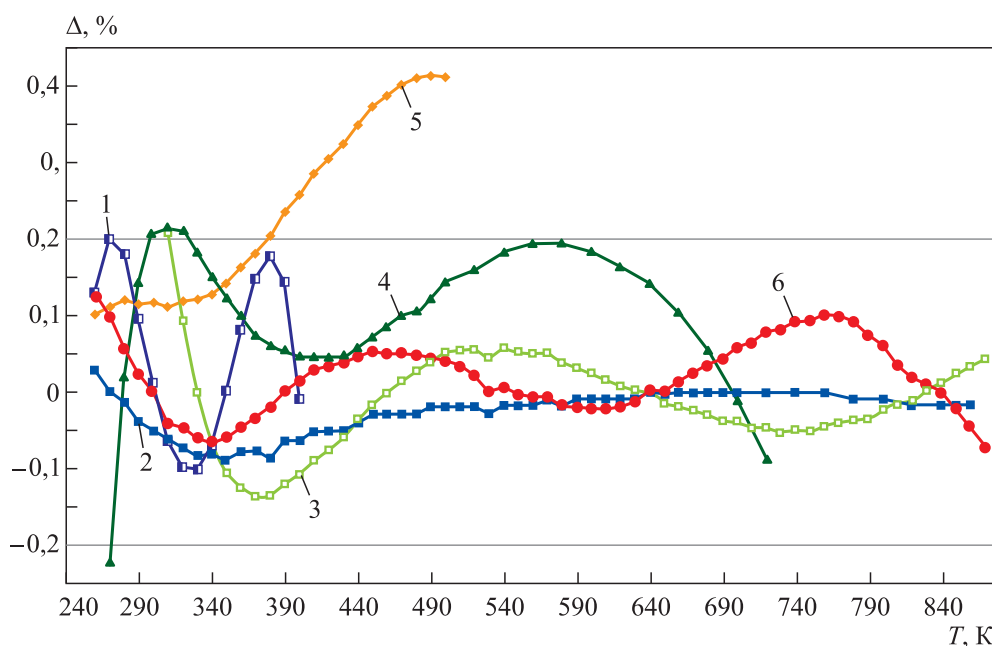


Рис. 3. Отклонение результатов измерений удельной теплоёмкости лейкосапфира по данным различных источников от значений NIST [21]:

1 – Zhi Chehg Tan, 2018 [18]; 2 – SRM720 [22]; 3 – Stolen, 1996 [23]; 4 – Френкель, 1974 [19]; 5 – Sorai, 1992 [24]; 6 – ГЭТ 60-2019

Fig. 3. Deviation of different specific heat measurement data of leucosapphire from NIST data [21]: 1 – Zhi Chehg Tan, 2018 [18]; 2 – SRM720 [22]; 3 – Stolen, 1996 [23]; 4 – Frenkel', 1974 [19]; 5 – Sorai, 1992 [24]; 6 – GET 60-2019

больших значений до 2900 Дж/(кг·К); расширен диапазон температур с 700 К до 870 К;

проведена новая классификация средств измерений, калориметров и термоанализаторов с учётом обновления парка имеющихся рабочих средств измерений на сегодняшний день и перспективу;

сокращено количество ступеней передачи единицы удельной теплоёмкости от ГЭТ 60-2019 к средствам измерений, что позволило существенно уменьшить потерю точности при передаче единицы;

ГПС оптимизирована с точки зрения загрузки ГЭТ 60-2019 на верхних ступенях, что обеспечивает достаточную гибкость в поверочной деятельности с учётом сложившейся практики и перспектив развития.

**Выводы.** Поставленная цель по обеспечению единства измерений в области измерений удельной теплоёмкости на современном уровне достигнута. Утверждён ГЭТ 60-2019 с улучшенными метрологическими характеристиками: границы температурного диапазона расширены с 273–600 К до 260–870 К, что позволит выполнять сличения разработанного калориметра с калориметрами, входящими в состав специальных эталонов ВНИИФТРИ и УНИИМ в некотором интервале температур, а не при единственной сопредельной температуре. В ГЭТ 60-2019 расширен диапазон воспроизведения удельной теплоёмкости с 50–2000 до 50–2900 Дж/(кг·К), что необходимо, например, для технологии получения и сертификации полимеров и при расчётах тепловых режимов различных проектируемых агрегатов.

Внедрение ГЭТ 60-2019 в метрологическую практику позволит: повысить точность измерений удельной теплоёмкости; обеспечить поверку, калибровку, испытания средств измерений удельной теплоёмкости материалов (калориметров и термоанализаторов STA, DTG и DTA фирм PerkinElmer, Netzsch, TA Instrument и других, широко используемых в различных отраслях техники и технологий, в отраслевых научно-исследовательских институтах и лабораториях) на доступный прогнозированию период, обеспечить технологический контроль удельной теплоёмкости при производстве новых материалов и сертификацию материалов, функционирующих при переменных температурах.

#### Список литературы

1. Погорельцев Е. И., Мельникова С. В., Карташев А. В., Горев М. В., Флёров И. Н., Лапташ Н. М. Температурные, оптические и диэлектрические свойства флюорита  $\text{Rb}_2\text{TaF}_7$  // Физика твёрдого тела. 2017. Т. 59. № 5. С. 959–964. DOI: 10.1134/S1063783417050250
2. Schawe J. E. K., Pogatscher S., Löffler J. F., *Thermochemica Acta*, 2020, vol. 685, 178518, pp. 1–8. DOI:10.1016/j.tca.2020.178518
3. Uddin K., Amirul Islam M., Mitra S., Lee J., Thu K., Saha B. B., Koyama S., *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129, pp. 117–126. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.09.057
4. Gao Y., Zhao B., Yang B., Schick C., *Fast Scanning Calorimetry*, 2016, pp. 691–721. DOI:10.1007/978-3-319-31329-0\_21
5. Lyubina J., *Magnetocaloric Materials*, Springer Series in Materials Science, 2016, 115–186. DOI:10.1007/978-3-319-26106-5\_4
6. Musikhin A. E., Bespyatov M. A., Shlegel V. N., Grigorieva V. D., *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 830, 154592. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.154592
7. George T. Furukawa, Thomas B. Douglas, Robert E. McCoskey, and Defoe C. Ginnings, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1956, vol. 57, no. 2, Research Paper 2694, pp. 67–82. DOI: 10.6028/jres.057.008
8. Defoe C. Ginnings, Thomas B. Douglas, and Anne F. Ball, *U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards, Part of the Journal of Research of the National Bureau of Standards*, July 1950, vol. 45, Research Paper RP2110, pp. 23–33. DOI: 10.6028/jres.045.003
9. West E. D., and Ginnings D. C., *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, April 1958, vol. 60, no. 4, pp. 309–316. DOI: 10.6028/jres.060.034
10. Donald G. Archer, *J. Chem. Eng. Data*, 2003, vol. 48, pp. 1157–1163. DOI: 10.1021/je030112g
11. Pramann A., Krupke H.-W., Moriya Y., Rudtsch S., and Sarge S. M., *Phase transitions of gallium and indium, determined by adiabatic calorimetry*, article Physikalisch-Technische Bunsenversammlung, Anmerkungen zur Konferenz PTB, Saarbrücken, Germany, 1–3 May 2008, p. 279.
12. Sarge S. M., Gmelin E., Hohne G. W. H., Cammenda H. K., Hemminger W., Eysel W., *Kalibrierung des dynamischer Kalorimeter*, PTB-Mitteilungen Heft 6, 1993, pp. 491–512. ISSN 0030-834X
13. Haruka A. B. E., *AIST Bulletin of Metrology*, 2008, vol. 7, no. 2, pp.101–116.
14. Hideyuki Kato, and Tetsuya Baba, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 50, pp. 11RG01–111RG03. DOI: 10.1143/JJAP.50.11RG01
15. Yoichi Takahashi, *Pure & Appl. Chem.*, 1997, vol. 69, no. 11, pp. 2263–2269. DOI: 10.1351/pac199769112263
16. Tetsuya Baba, *Metrologia*, 2010, vol. 47, pp. S143–S155. DOI: 10.1088/0026-1394/47/2/S12
17. Matsumoto T., Barreiro G., Ono A., *Measurements of Specific Heat Capacity and Hemispherical Total Emissivity at High Temperatures Using a Feedback-Controlled Pulse-Heating Technique*, Proc. 20th Japan Symposium on Thermophysical Properties, 1999, pp. 479–482.
18. Zhi Cheng Tan, Quan Shi, and Xin Liu, *Construction of High-Precision Adiabatic Calorimeter and Thermodynamic Study on Functional Materials*, In book: *Calorimetry – Design, Theory and Applications in Porous Solids*. DOI: 10.5772/intechopen.76151
19. Френкель И. М., Сергеев О. А. Государственный первичный эталон единицы удельной теплоемкости твердых тел // Измерительная техника. 1975. № 4. С. 45–49.
20. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия: Теория и практика / Пер. с англ. О. Б. Саламатинной. М.: Химия, 1989. 175 с.
21. Donald G. Archer, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1993, vol. 22, no. 6. DOI: 10.1063/1.555931
22. *National Bureau of Standards Certificate Standard Reference Material 720 Synthetic Sapphire ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )*, Publications NBS, U.C. Department of commerce, Washington D.C. 20234, April 1982, 3 p.

23. Svein Stolen, Ronny Glockner, and Fredrik Gronvold, *J. Chem. Thermodynamics*, 1996, vol. 28, pp. 1263–1281.

DOI: 10.1006/jcht.1996.0113

24. Michio Sorai, *J. Chem. Thermodynamics*, 1992, vol. 24, pp. 167–180. DOI: 10.1016/S0021-9614(05)80046-1

## References

1. Pogorel'tsev E. I., Mel'nikova S. V., Kartashev A. V., Gorev M. V., Flerov I. N., Laptash N. M., *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59(5), pp. 986–991. DOI: 10.1134/S1063783417050250

2. Schawe J. E. K., Pogatscher S., Löffler J. F., *Thermochimica Acta*, 2020, vol. 685, 178518, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178518

3. Uddin K., Amirul Islam M., Mitra S., Lee J., Thu K., Saha B. B., Koyama S., *Applied Thermal Engineering*, 2018, 129, pp. 117–126. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.057

4. Gao Y., Zhao B., Yang B., Schick C., *Fast Scanning Calorimetry*, 2016, pp. 691–721. DOI: 10.1007/978-3-319-31329-0\_21

5. Lyubina J., *Magnetocaloric Materials*, Springer Series in Materials Science, 2016, 115–186. DOI: 10.1007/978-3-319-26106-5\_4

6. Musikhin A. E., Bespyatov M. A., Shlegel V. N., Grigorieva V. D., *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 830, 154592. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154592

7. George T. Furukawa, Thomas B. Douglas, Robert E. McCoskey, and Defoe C. Ginnings, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1956, vol. 57, no. 2, Research Paper 2694, pp. 67–82. DOI: 10.6028/jres.057.008

8. Defoe C. Ginnings, Thomas B. Douglas, and Anne F. Ball, *U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards, Part of the Journal of Research of the National Bureau of Standards*, July 1950, vol. 45, Research Paper RP2110, pp. 23–33. DOI: 10.6028/jres.045.003

9. West E. D., and Ginnings D. C., *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, April 1958, vol. 60, no. 4, pp. 309–316. DOI: 10.6028/jres.060.034

10. Donald G. Archer, *J. Chem. Eng. Data*, 2003, vol. 48, pp. 1157–1163. DOI: 10.1021/je030112g

11. Pramann A., Krupke H.-W., Moriya Y., Rudtsch S., and Sarge S. M., *Phase transitions of gallium and indium, determined by adiabatic calorimetry*, article Physikalisch-Technische

Bunsentagung, Anmerkungen zur Konferenz PTB, Saarbrücken, Germany, 1–3 May 2008, p. 279.

12. Sarge S. M., Gmelin E., Hohne G. W. H., Cammenda H. K., Hemminger W., Eysel W., *Kalibrierung des dynamischer Kalorimeter*, PTB-Mitteilungen Heft 6, 1993, pp. 491–512. ISSN 0030-834X

13. Haruka A. B. E., *AIST Bulletin of Metrology*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 101–116.

14. Hideyuki Kato, and Tetsuya Baba, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 50, pp. 11RG01–111RG03.

DOI: 10.1143/JJAP.50.11RG01

15. Yoichi Takahashi, *Pure & Appl. Chem.*, 1997, vol. 69, no. 11, pp. 2263–2269. DOI: 10.1351/pac199769112263

16. Tetsuya Baba, *Metrologia*, 2010, vol. 47, pp. S143–S155. DOI: 10.1088/0026-1394/47/2/S12

17. Matsumoto T., Barreiro G., Ono A., *Measurements of Specific Heat Capacity and Hemispherical Total Emissivity at High Temperatures Using a Feedback-Controlled Pulse-Heating Technique*, Proc. 20th Japan Symposium on Thermophysical Properties, 1999, pp. 479–482.

18. Zhi Cheng Tan, Quan Shi, and Xin Liu, *Construction of High-Precision Adiabatic Calorimeter and Thermodynamic Study on Functional Materials*, In book: *Calorimetry – Design, Theory and Applications in Porous Solids*. DOI: 10.5772/intechopen.76151

19. Frenkel' I. M., Sergeev O. A., *Measurement Techniques*, 1975, vol. 18, no. 4, pp. 545–551. DOI: 10.1007/BF00817507

20. Hemminger W., Hohne G. W. H., *Calorimetry-Fundamentals and Practice*, VCH Verlag, Weinheim, 1984, 176 p.

21. Donald G. Archer, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1993, vol. 22, no. 6. DOI: 10.1063/1.555931

22. *National Bureau of Standards Certificate Standard Reference Material 720 Synthetic Sapphire ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)*, Publications NBS, U.C. Department of commerce, Washington D.C. 20234, April 1982, 3 p.

23. Svein Stolen, Ronny Glockner, and Fredrik Gronvold, *J. Chem. Thermodynamics*, 1996, vol. 28, pp. 1263–1281. DOI: 10.1006/jcht.1996.0113

24. Michio Sorai, *J. Chem. Thermodynamics*, 1992, vol. 24, pp. 167–180. DOI: 10.1016/S0021-9614(05)80046-1

Дата поступления: 30.03.2020.

Дата принятия: 06.04.2020.

## The State primary standard of the unit of specific heat capacity of solids GET 60-2019

Tatiana A. Kompan<sup>1</sup>, Valentin I. Kulagin<sup>1</sup>, Viktoriya V. Vlasova<sup>1</sup>, Sergey V. Kondratiev<sup>1</sup>, Alexander Ya. Lukin<sup>2</sup>, Nikolay F. Pukhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, e-mail: T.A.Kompan@vniim.ru.

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, e-mail: alexander\_lukin@inbox.ru

The paper describes the creation of the new State standard of thermal capacity of solids. The main point of the project is the design of the high accuracy adiabatic calorimeter KA-C4. The construction and the modes of operation of installation are presented. The sources of uncertainty and the resulting values of accuracy are analyzed. Also the paper contains the information about the measures for the transmitting of the unit to the devices of lower accuracy.

**Key words:** standard, heat capacity, adiabatic calorimeter, measure of specific heat capacity, metrological characteristics.

## Технологии уменьшения погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа зашумлённых сигналов

Т. А. Алиев<sup>1, 2</sup>, Н. Ф. Мусаева<sup>2</sup>, Н. Э. Рзаева<sup>2</sup>, А. И. Мамедова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт систем управления национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджан, e-mail: telmancyber@gmail.com, anahaciyeva@gmail.com

<sup>2</sup>Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан, e-mail: musanaila@gmail.com, nikanel1@gmail.com

Проанализированы факторы, влияющие на погрешности оценок корреляционных функций зашумлённых сигналов при применении традиционных алгоритмов их вычисления. Показано, что суммарная помеха зашумлённого сигнала обусловлена влиянием внешних факторов и шумом, который возникает из-за различных дефектов в процессе эксплуатации объектов контроля. Для исключения погрешности результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов созданы алгоритмы и технологии определения оценок дисперсии помехи и взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой. Предложены технологии определения приближённых эквивалентных отсчётов помехи зашумлённых сигналов. Показано, что при использовании эквивалентных отсчётов помех можно получить результаты, идентичные результатам реальных отсчётов помех при корреляционном анализе зашумлённых сигналов. При выделении из зашумлённого сигнала эквивалентных отсчётов помехи определены эквивалентные отсчёты полезного сигнала. Эти отсчёты позволяют определить оценки, эквивалентные оценкам корреляционных функций полезного сигнала. Найдены оценки взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой. Исследования показали, что несмотря на существующие погрешности эквивалентных отсчётов, при достаточно длительном времени наблюдения можно значительно уменьшить погрешности традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов при эквивалентных отсчётах. Применение этих технологий можно использовать для коррекции погрешностей результатов анализа экспериментальных данных в информационно-измерительных комплексах и системах, что значительно улучшит их метрологические характеристики.

**Ключевые слова:** сигнал, помеха, зашумлённый сигнал, корреляционная функция, объект, диагностика, идентификация, оценка, погрешность, отсчёты помехи, эквивалентные отсчёты, полезный сигнал.

**Введение.** Большинство современных средств измерений используют аналого-цифровые преобразователи. Измеряемые величины в этом случае представлены в виде цифровых сигналов. Решение задачи уменьшения погрешности измерений, а также реализация косвенных измерений заставляют обращаться к области знаний, называемой цифровой обработкой сигналов. Таким образом, тема статьи является весьма актуальной.

При корреляционном анализе случайных сигналов  $X(i\Delta t)$ , где  $i$  – номер отсчёта,  $\Delta t$  – шаг дискретизации, определение оценок корреляционных функций  $R_{xx}(\mu)$  вызывает на практике серьёзные трудности из-за зашумлённости помехами  $\varepsilon(i\Delta t)$  [1–8]. Трудности возникают, так как реальные зашумлённые сигналы  $g(i\Delta t)$ , которые получают от датчиков, установленных на различных объектах, являются суммой полезных сигналов  $X(i\Delta t)$  и помех  $\varepsilon(i\Delta t)$ :

$$g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t),$$

где  $g(i\Delta t)$ ,  $X(i\Delta t)$ ,  $\varepsilon(i\Delta t)$  – отсчёты центрированных дискретизированных сигналов  $g(t)$  и  $X(t)$  – зашумлённого и полезного соответственно, а также помехи  $\varepsilon(t)$ .

Поэтому при использовании традиционных алгоритмов определения оценок корреляционных функций  $R_{gg}(\mu)$  зашумлённых сигналов

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g[(i+\mu)\Delta t] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \{ X[(i+\mu)\Delta t] + \varepsilon[(i+\mu)\Delta t] \} \end{aligned}$$

возникают погрешности, которые можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) \varepsilon[(i+\mu)\Delta t] + \\ &+ \varepsilon(i\Delta t) X[(i+\mu)\Delta t] + \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon[(i+\mu)\Delta t]]. \end{aligned}$$

В результате между оценками корреляционных функций  $R_{gg}(\mu)$ ,  $R_{XX}(\mu)$  зашумлённого  $g(i\Delta t)$  и полезного  $X(i\Delta t)$  сигналов соответственно, имеет место неравенство [1–6]:

$$R_{XX}(\mu) \neq R_{gg}(\mu).$$

На практике часто не удаётся обеспечить адекватность результатов решения задач корреляционного анализа зашумлённых сигналов с применением традиционных технологий. В связи с этим необходимо создать алгоритмы и технологии устранения влияния указанных погрешностей на результат определения оценки  $R_{gg}(\mu)$  корреляционных функций зашумлённых сигналов  $g(i\Delta t)$ .

**Постановка задачи.** В работах [1, 2] показано, что суммарная помеха  $\varepsilon(i\Delta t)$  зашумлённого сигнала  $g(i\Delta t)$  во многих случаях складывается из помехи  $\varepsilon_1(i\Delta t)$ , обусловленной влиянием внешних факторов, и шума  $\varepsilon_2(i\Delta t)$ , который возникает вследствие зарождения различных дефектов в процессе эксплуатации объектов контроля:

$$\varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon_1(i\Delta t) + \varepsilon_2(i\Delta t).$$

Предположим, что  $g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$  – дискретизированный стационарный случайный сигнал с нормальным законом распределения. Он состоит из полезного сигнала  $X(i\Delta t)$  и помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  с математическим ожиданием, равным нулю [7–10]. При этом формула вычисления оценки  $R_{gg}(\mu=0)$ , т. е. дисперсии зашумлённого сигнала, имеет вид

$$\begin{aligned} D_g \approx R_{gg}(0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t) \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] \approx \\ &\approx R_{XX}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_{X\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)$  – взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой при  $\mu=0$ .

Следовательно, погрешность полученного результата составит

$$\lambda_{gg}(\mu=0) = 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = D_\varepsilon, \quad (2)$$

где  $R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)$  – автокорреляционная функция помехи.

Формулу для вычисления оценки корреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$  при  $\mu \neq 0$  можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g[(i+\mu)\Delta t] \approx \\ &\approx R_{XX}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X[(i+\mu)\Delta t]$  – автокорреляционная функция полезного сигнала;

$R_{\varepsilon X}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X[(i+\mu)\Delta t]$  – взаимная корреляционная функция между помехой и полезным сигналом;

$R_{X\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t]$  – взаимная корреляционная функция между полезным сигналом и помехой;

$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon[(i+\mu)\Delta t]$  – автокорреляционная функция помехи.

Если принять во внимание равенства

$$R_{X\varepsilon}(\mu) = R_{\varepsilon X}(\mu); R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu \neq 0) = 0,$$

то погрешность  $\lambda_{gg}(\mu \neq 0)$  полученного результата составит

$$\lambda_{gg}(\mu \neq 0) = 2R_{X\varepsilon}(\mu). \quad (4)$$

Из выражений (1), (3), (4) следует, что погрешность оценок традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов будет

$$\lambda_{gg}(\mu) = \begin{cases} 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) & \text{при } \mu = 0; \\ 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Следовательно, для исключения погрешности  $\lambda_{gg}(\mu)$  из оценок  $R_{gg}(\mu)$  результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов, полученных по традиционным технологиям, требуется создание алгоритмов и технологий определения оценки как дисперсии помехи  $D_\varepsilon$ , так и оценок взаимных корреляционных функций между полезным сигналом  $X(i\Delta t)$  и помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$ , т. е.  $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ ,  $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$ ,  $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$  [1, 2].

**Алгоритмы определения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов.** Из равенств (2)–(5) следует, что для определения оценок корреляционной функции  $R_{XX}(\mu)$  полезного сигнала  $X(i\Delta t)$  требуется устранить погрешности традиционных алгоритмов корреляционного анализа зашумлённых сигналов.

В работах [1, 2] показано, что дисперсию помехи можно определить из выражения

$$\begin{aligned} D_\varepsilon \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ &g^2(i\Delta t) - 2g(i\Delta t)g[(i+1)\Delta t] + \\ &+ g(i\Delta t)g[(i+2)\Delta t] \}. \end{aligned} \quad (6)$$

Справедливость выражения (6) можно проверить путём разложения правой части на соответствующие слагаемые:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon \approx &R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) + \\ &+ R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

Если выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения зашумлённых сигналов, то можно считать справедливыми следующие условия [11–18]:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon X}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \neq 0; \\ R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) &\approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon[(i+2)\Delta t] \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+2)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X[(i+1)\Delta t] \approx 0; \\ R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X[(i+2)\Delta t]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Если принять во внимание условия (8), то в правой части равенства (7) получим выражение

$$D_{\varepsilon} = R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) \approx 2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0).$$

Таким образом, оценка дисперсии помехи  $D_{\varepsilon}$ , которая определяется по формуле (6), представляет собой погрешность оценки корреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$  при  $\mu=0$ . Следовательно, оценку  $R_{XX}(\mu=0)$  корреляционной функции полезного сигнала  $X(i\Delta t)$ , зашумлённого помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$ , можно определить по формуле

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu=0) &= R_{gg}(\mu=0) - D_{\varepsilon} = \\ &= R_{gg}(\mu=0) - [R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu=0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu=0)]. \end{aligned}$$

Из выражения (5) следует, что погрешность оценки  $R_{gg}(\mu)$  при  $\mu \neq 0$  представляет собой оценку взаимно-корреляционной функции  $R_{X\varepsilon}(\mu)$  между полезным сигналом  $X(i\Delta t)$  и помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$ . Таким образом, для рассмотренного случая оценку корреляционной функции  $R_{XX}(\mu)$  полезного сигнала  $X(i\Delta t)$  при  $\mu \neq 0$  можно представить в виде

$$R_{XX}(\mu\Delta t) = R_{gg}(\mu\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t).$$

Следовательно, для уменьшения погрешности корреляционного анализа зашумлённых сигналов при  $\mu \neq 0$  необходимо определить оценку  $R_{X\varepsilon}(\mu\Delta t)$ .

В работе [1] показано, что формулу определения взаимно корреляционной функции между  $X(i\Delta t)$  и  $\varepsilon(i\Delta t)$  при  $\mu \neq 0$  можно представить как

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu=\Delta t) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{g(i\Delta t)g[(i+1)\Delta t] - \\ &- 2g(i\Delta t)g[(i+2)\Delta t] + g(i\Delta t)g[(i+3)\Delta t]\}. \end{aligned}$$

При разложении правой части этого равенства получим

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu=\Delta t) &\approx R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) - \\ &- 2R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + \\ &+ R_{XX}(3\Delta t) + R_{X\varepsilon}(3\Delta t) + R_{\varepsilon X}(3\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t). \end{aligned}$$

При выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумлённых сигналов, корреляции между  $X(i\Delta t)$  и  $\varepsilon[(i+1)\Delta t]$ , а также допустив справедливость отношений

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(\Delta t) \neq 0; R_{\varepsilon X}(\Delta t) \neq 0;$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0; R_{\varepsilon X}(2\Delta t) \approx 0;$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0; R_{X\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0; R_{\varepsilon X}(3\Delta t) \approx 0;$$

$$R_{XX}(\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) \approx 0,$$

получим равенство

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) \approx 2R_{X\varepsilon}(\Delta t).$$

Следовательно, оценку взаимно-корреляционной функции  $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$  между полезным сигналом  $X(i\Delta t)$  и помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$  при  $\mu=\Delta t$  можно вычислить из выражения

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) \approx \frac{R_{X\varepsilon}(\Delta t)}{2}. \quad (9)$$

Оценки  $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$ ,  $R_{X\varepsilon}(3\Delta t)$  при существовании корреляции между  $X(i\Delta t)$ ,  $\varepsilon(i\Delta t)$  при  $\mu=2\Delta t$ ,  $\mu=3\Delta t$  можно рассчитать аналогичным образом. Следовательно, при различных временных сдвигах  $\mu=k\Delta t$ ,  $k=1, 2, 3, \dots$ , оценки  $R_{X\varepsilon}(\mu)$  можно найти из выражения

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu=k\Delta t) &\approx \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{g(i\Delta t)g[(i+k)\Delta t] - \\ &- 2g(i\Delta t)g[(i+k+1)\Delta t] + g(i\Delta t)g[(i+k+2)\Delta t]\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, существование алгоритмов и технологий определения оценок дисперсии  $D_{\varepsilon}$  помехи и взаимно-корреляционной функции между полезным сигналом и помехой  $R_{X\varepsilon}(\mu)$  позволяет уменьшить погрешности традиционных алгоритмов вычисления оценок корреляционных функций.

Поэтому оценку корреляционной функции полезного сигнала  $X(i\Delta t)$ , зашумлённого помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$ , можно определить следующим образом:

$$R_{XX}(\mu) \approx \begin{cases} R_{gg}(0) - [2R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0)] & \text{при } \mu = 0; \\ R_{gg}(\mu) - 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0, \end{cases}$$

где оценки  $R_{\varepsilon\varepsilon}(0)$ ,  $R_{X\varepsilon}(\mu)$  вычисляются из выражений (6), (9), (10).

**Алгоритмы уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов помех этих сигналов.** Проведённые авторами исследования показали, что уменьшить погрешности традиционных методов корреляционного анализа зашумлённых сигналов можно с помощью технологии определения эквивалентных отсчётов помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  [1–6].

Рассмотрим возможность вычисления приближённых значений, неподдающихся непосредственному измерению, – отсчётов помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  зашумлённых сигналов  $g(i\Delta t)$ . Анализ возможных вариантов решения этой задачи, проведённый в работах [1–6, 16–20], показал, что с помощью технологии вычисления оценки дисперсии  $D_\varepsilon$  помехи по выражению (6) вместо неподдающихся измерению отсчётов помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  можно определить приближённые эквивалентные отсчёты  $\varepsilon^e(i\Delta t)$ . Для этого формулу (6) представим в виде

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) [g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]].$$

Введём обозначения:

$$\varepsilon'(i\Delta t) = g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\};$$

$$\text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) = \begin{cases} +1 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) > 0; \\ 0 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) = 0; \\ -1 & \text{при } \varepsilon'(i\Delta t) < 0. \end{cases}$$

Формулу вычисления эквивалентных отсчётов помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  представим в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon(i\Delta t) &\approx \varepsilon^e(i\Delta t) = \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \times \\ &\times \sqrt{g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\}} = \\ &= \text{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{\varepsilon'(i\Delta t)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Допустим справедливость выражения [1–3]:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e2}(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |g(i\Delta t) \{g(i\Delta t) + g[(i+2)\Delta t] - 2g[(i+1)\Delta t]\}|. \end{aligned} \quad (12)$$

Тогда формулу вычисления среднего значения отсчётов помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  можно свести к вычислению среднего значения эквивалентных отсчётов помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$ :

$$\bar{\varepsilon}(i\Delta t) \approx \bar{\varepsilon}^e(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t).$$

Многочисленные эксперименты показали, что несмотря на возможные отклонения

$$\Delta \varepsilon(i\Delta t) = \varepsilon^e(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t)$$

эквивалентных отсчётов  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  от истинных отсчётов  $\varepsilon(i\Delta t)$ , между оценками имеют место равенства

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{e2}(i\Delta t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) &\approx 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) &\approx 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Равенства (11)–(13) и проведённые экспериментальные исследования показали, что с помощью эквивалентных отсчётов помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  можно получить результаты, идентичные результатам корреляционного анализа тех же сигналов с известными реальными отсчётами помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$ . Для этого по формуле

$$X^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon(i\Delta t) = X(i\Delta t)$$

определим эквивалентные отсчёты  $X^e(i\Delta t)$  полезного сигнала. При этом появляется возможность получить оценки  $R_{X^e X^e}(\mu)$ , которые равны оценкам корреляционных функций полезного сигнала  $R_{XX}(\mu)$ :

$$R_{XX}(\mu) \approx R_{X^e X^e}(\mu), \quad (14)$$

где  $R_{X^e X^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e[(i+\mu)\Delta t]$  – автокорреляционная функция эквивалентных отсчётов полезного сигнала.

Выделив эквивалентные отсчёты помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  из зашумлённого сигнала  $g(i\Delta t)$ , можно рассчитать по полученным эквивалентным значениям отсчётов полезного сигнала

$$X^e(i\Delta t) = g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t)$$

оценки  $R_{X^e X^e}(\mu)$ ,  $R_{X^e X^e}(0)$ , эквивалентные оценкам корреляционных функций полезного сигнала  $R_{XX}(\mu)$ :

$$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) X^e[(i+\mu)\Delta t]. \quad (15)$$

Определив эквивалентные отсчёты помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  и полезного сигнала  $X^e(i\Delta t)$ , вычислим оценки взаимно-корреляционной функции между  $X(i\Delta t)$ ,  $\varepsilon(i\Delta t)$ :

$$\begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon[(i+\mu)\Delta t] \approx \\ &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t) \varepsilon^e[(i+\mu)\Delta t]. \end{aligned} \quad (16)$$

Следовательно, формулу нахождения оценки корреляционной функции полезного сигнала представим в виде

$$R_{X^e X^e}(\mu) \approx \begin{cases} R_{gg}(0) - [2R_{X^e \varepsilon^e}(0) + R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(0)] & \text{при } \mu=0; \\ R_{gg}(\mu) - 2R_{X^e \varepsilon^e}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Исследования также показали, что несмотря на определённые погрешности отсчётов  $X^e(i\Delta t)$  по сравнению с отсчётами полезных сигналов  $X(i\Delta t)$ , при достаточной длительности времени  $T$  наблюдения выполняется равенство (13). Поэтому  $R_{XX}(\mu) \approx R_{X^e X^e}(\mu)$ , т. е. по выражениям (14)–(17), используя эквивалентные отсчёты помехи  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  и полезного сигнала  $X^e(i\Delta t)$ , можно значительно уменьшить погрешность традиционных технологий корреляционного анализа зашумлённых сигналов.

**Результаты вычислительного эксперимента и сравнительного анализа.** Приведём результаты вычислительных экспериментов уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов их помех. Вычислительные эксперименты проведены с использованием MATLAB.

Сначала сформируем полезный сигнал  $X(t)$ . Из работы [3] известно, что любой стационарный случайный процесс  $X(t)$  на бесконечном интервале  $T$  можно сколь угодно точно аппроксимировать линейной комбинацией гармонических колебаний со случайной амплитудой и фазой. Поэтому при проведении вычислительных экспериментов смоделируем полезный случайный сигнал в виде возмущённой гармонической дискретной функции с начальной фазой  $\varphi$ :

$$X(t) = 60 \sin \left( 2\pi \frac{(0,5k)^n}{T} + \varphi \right) + 100,$$

где  $k=0,1,\dots,K$ ,  $K=2400$ ;  $n=1,5$  – показатель степени;  $T=200$  – период сигнала.

Начальная фаза  $\varphi$  имеет равномерное распределение вероятностей и задана в виде функции  $\text{rand}[\text{size}(k)] \cdot \pi/3$ , формирующей вектор, соразмерный с вектором  $k$ . Элементами

указанного вектора являются случайные значения, распределённые по равномерному закону в интервале  $(0, 1)$ . Допускается, что полезный сигнал – стационарный эргодический процесс и  $X(t)$  – истинный полезный сигнал.

С помощью генератора случайных чисел сформируем нормально распределённую помеху  $\varepsilon(t)$  с заданным значением среднего квадратического отклонения (СКО)  $\sigma_\varepsilon = 30$  и нулевым математическим ожиданием  $m_\varepsilon = 0$ . Предполагается, что это и есть истинная помеха. Далее сформируем зашумлённый сигнал  $g(t) = X(t) + \varepsilon(t)$ .

После этого по выражению (11) вычислим эквивалентные отсчёты помех  $\varepsilon^e(i\Delta t)$  и следующие характеристики:

$$\text{среднее значение } m_{\varepsilon^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^e(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{\varepsilon^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t) - m_{\varepsilon^e}]^2;$$

сумму квадратов отсчётов эквивалентной помехи

$$S_{\varepsilon^e} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t)]^2};$$

автокорреляционную функцию

$$R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon^e(i\Delta t) - m_{\varepsilon^e}] \{\varepsilon^e[(i+\mu)\Delta t] - m_{\varepsilon^e}\}.$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции  $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu)$  приведены в таблице, график функции представлен на рис. 1 (кривая 1).

Затем из выражения

$$X^e(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon^e(i\Delta t)$$

определим эквивалентные отсчёты  $X^e(i\Delta t)$  полезного сигнала  $X(t)$  и вычислим следующие параметры:

$$\text{среднее значение } m_{X^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^e(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{X^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X^e(i\Delta t) - m_{X^e}]^2;$$

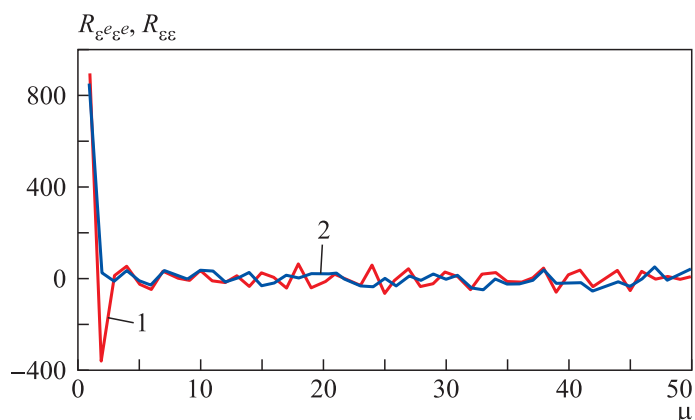


Рис. 1. Автокорреляционная функция эквивалентной (1) и сгенерированной (2) помех

Fig. 1. Autocorrelation function of equivalent (1) and the generated (2) noises

Автокорреляционные функции помех и полезных сигналов

| $i$ | $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ | $R_{\varepsilon^e\varepsilon^e}(\mu)$ | $R_{XX}(\mu)$ | $R_{X^eX^e}(\mu)$ | $\Delta R_{XX}(\mu), \%$ |
|-----|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| 1   | 849,920                           | 892,270                               | 1817,1        | 1855,10           | 2,0896                   |
| 2   | -11,011                           | 10,272                                | 1526,6        | 1579,70           | 3,4765                   |
| 3   | 34,070                            | 53,603                                | 1368,6        | 1518              | 10,916                   |
| 4   | -8,9155                           | -20,327                               | 1152          | 1144,80           | 0,63049                  |
| 5   | -30,541                           | -46,619                               | 899,82        | 832,85            | 7,4433                   |
| 6   | 34,019                            | 31,662                                | 620,29        | 590,87            | 4,7429                   |
| 7   | 12,781                            | 5,4964                                | 332,25        | 412,43            | 24,134                   |
| 8   | -2,9757                           | -7,4765                               | 47,246        | 30,745            | 34,925                   |
| 9   | 36,687                            | 34,601                                | -227,41       | -208,54           | 8,2982                   |
| 10  | 31,310                            | -10,233                               | -479,69       | -463,49           | 3,3775                   |

сумму квадратов отсчётов сгенерированной помехи

$$S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t)]^2};$$

автокорреляционные функции

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t) - m_{\varepsilon}] \{\varepsilon[(i+\mu)\Delta t] - m_{\varepsilon}\};$$

$$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) - m_X] \{X[(i+\mu)\Delta t] - m_X\}.$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции  $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$  приведены в таблице, график функции представлен на рис. 1 (кривая 2). Результаты вычисления автокорреляционной функции  $R_{XX}(\mu)$  представлены в таблице, график функции показан на рис. 2 (кривая 2).

Проведём сравнительный анализ. Для этого определим относительные погрешности:

оценок СКО помехи  $\varepsilon(t)$  и эквивалентной помехи  $\varepsilon^e(t)$ , а также полезного сигнала  $X(t)$  и эквивалентного полезного сигнала  $X^e(t)$ :

$$\Delta\sigma_{\varepsilon} = \frac{|\sigma_{\varepsilon} - \sigma_{\varepsilon^e}|}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot 100; \quad \Delta\sigma_X = \frac{|\sigma_X - \sigma_{X^e}|}{\sigma_X} \cdot 100;$$

оценок автокорреляционных функций полезного сигнала и помехи соответственно

$$\Delta R_{XX}(\mu) = \frac{|R_{XX}(\mu) - R_{X^eX^e}(\mu)|}{R_{XX}(\mu)} \cdot 100;$$

$$\Delta R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{|R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) - R_{\varepsilon^e\varepsilon^e}(\mu)|}{R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)} \cdot 100;$$

оценок взаимно корреляционных функций между полезным сигналом и помехой

$$\Delta R_{X\varepsilon}(\mu) = \frac{|R_{X\varepsilon}(\mu) - R_{X^e\varepsilon^e}(\mu)|}{R_{X\varepsilon}(\mu)} \cdot 100;$$

$$\Delta R_{\varepsilon X}(\mu) = \frac{|R_{\varepsilon X}(\mu) - R_{\varepsilon^eX^e}(\mu)|}{R_{\varepsilon X}(\mu)} \cdot 100.$$

Результаты вычислений  $\Delta R_{XX}(\mu)$  приведены в таблице.

После анализа результатов можно сделать следующие выводы.

1. Значения оценок средней помехи  $\varepsilon(t)$  и эквивалентной помехи  $\varepsilon^e(t)$ , а также полезного сигнала  $X(t)$  и эквивалентного полезного сигнала  $X^e(t)$  составляют  $m_{\varepsilon} = 0,40014$ ;  $m_{\varepsilon^e} = 5,4363$ ;  $m_X = 100,3$ ;  $m_{X^e} = 95,269$ ; при этом относительная погрешность составила

$$\Delta m_X = \frac{|m_X - m_{X^e}|}{m_X} \cdot 100 = 5,016 \, \%.$$

2. Значения оценок СКО сгенерированной помехи  $\varepsilon(t)$  и эквивалентной помехи  $\varepsilon^e(t)$  составляют  $\sigma_{\varepsilon} = 30,058$ ;  $\sigma_{\varepsilon^e} = 30,077$ ; относительная погрешность составила  $\Delta\sigma_{\varepsilon} = 0,061025 \, \%$ ; для полезного сигнала  $X(t)$  и эквивалентного полезного сигнала  $X^e(t)$  их значения соответствуют  $\sigma_X = 42,749$ ;  $\sigma_{X^e} = 43,071$ ; относительная погрешность составила  $\Delta\sigma_X = 0,75278 \, \%$ .

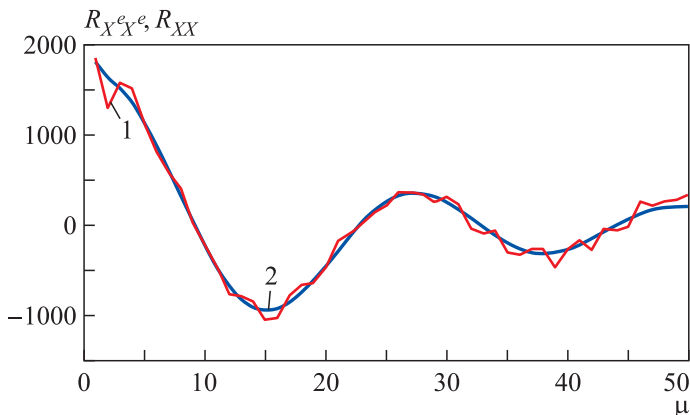


Рис. 2. Автокорреляционная функция эквивалентного (1) и сгенерированного (2) полезных сигналов

Fig. 2. Autocorrelation function of the equivalent (1) and the generated (2) useful signals

автокорреляционную функцию эквивалентного полезного сигнала

$$R_{X^eX^e}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X^e(i\Delta t) - m_{X^e}] \{X^e[(i+\mu)\Delta t] - m_{X^e}\}.$$

Результаты вычисления автокорреляционной функции  $R_{X^eX^e}(\mu)$  приведены в таблице, график функции представлен на рис. 2 (кривая 1).

На следующем шаге из выражения (16) вычислим оценки взаимно-корреляционной функции между эквивалентным полезным сигналом  $X^e(i\Delta t)$  и эквивалентной помехой  $\varepsilon^e(i\Delta t)$ .

Рассчитаем аналогичные характеристики для сгенерированных дискретных значений помехи  $\varepsilon(t)$  и полезного сигнала  $X(t)$ :

$$\text{средние значения } m_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t); \quad m_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t);$$

$$\text{СКО } \sigma_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon(i\Delta t) - m_{\varepsilon}]^2; \quad \sigma_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) - m_X]^2;$$

3. Значения сумм квадратов отсчётов сгенерированной помехи и эквивалентной помехи составляют  $S_{\varepsilon} = 903,67$ ;  $S_{\varepsilon^e} = 934,17$ , а относительная погрешность

$$\Delta S_{\varepsilon} = \frac{|S_{\varepsilon} - S_{\varepsilon^e}|}{S_{\varepsilon}} \cdot 100 = 3,3747 \, \%.$$

4. Значения оценок автокорреляционных функций сгенерированного полезного сигнала  $X(t)$  и эквивалентного полезного сигнала  $X^e(t)$  практически совпадают, т. е.  $R_{X^e X^e}(\mu) \approx R_{XX}(\mu)$  (см. таблицу и рис. 2), а относительные погрешности колеблются в пределах  $0,6\% < \Delta R_{XX}(\mu) < 11\%$ , исключение составляют лишь точки вблизи нуля.

5. Значения оценок автокорреляционных функций сгенерированной помехи  $\varepsilon(t)$  и эквивалентной помехи  $\varepsilon^e(t)$  практически совпадают, т. е.  $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu) \approx R_{\varepsilon \varepsilon}(\mu)$  (см. таблицу и рис. 1); относительная погрешность  $R_{\varepsilon \varepsilon}(0) = 4,9818 \, \%$  при  $\mu = 0$ . В остальных точках (см. рис. 1) несмотря на фактическое совпадение  $R_{\varepsilon^e \varepsilon^e}(\mu)$ ,  $R_{\varepsilon \varepsilon}(\mu)$  относительная погрешность может варьироваться в широких пределах из-за малости абсолютного значения.

6. Оценки взаимно-корреляционных функций между сгенерированными полезным сигналом и помехой, а также эквивалентными полезным сигналом и помехой практически совпадают:

$$R_{X\varepsilon}(\mu) \approx R_{X^e \varepsilon^e}(\mu);$$

$$R_{\varepsilon X}(\mu) \approx R_{\varepsilon^e X^e}(\mu).$$

Из приведённых выводов следует, что оценки для сгенерированных и эквивалентных сигналов практически совпадают.

Аналогичные результаты авторы получили и при проведении других вычислительных экспериментов. Таким образом, результаты множества вычислительных экспериментов подтвердили достоверность и эффективность алгоритмов уменьшения погрешностей результатов корреляционного анализа зашумлённых сигналов с помощью эквивалентных отсчётов их помех.

**Заключение.** Предложенные новые технологии позволяют устранить основные недостатки технологии корреляционного анализа зашумлённых сигналов и дают возможность широко и успешно применять новые технологии в областях, в которых требуется статистический анализ измерительной информации. Разработанные технологии можно использовать в системах контроля, диагностики и управления, где применение традиционных алгоритмов и методов корреляционного анализа зашумлённых сигналов из-за больших погрешностей затруднительно. Кроме того, новейшие технологии более широко используются в навигационных системах, радиолокационных системах, в сейсмоакустических системах разведки полезных ископаемых, медицине и т. д. Их применение также возможно при коррекции погрешностей результатов анализа экспериментальных данных в информационно-измерительных комплексах и системах, что значительно улучшит их метрологические характеристики. Статья будет полезна исследователям,

инженерам и метрологам, работающим с зашумлёнными цифровыми сигналами.

#### Список литературы

1. Aliev T. A., *Noise control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents*, Springer, 2019, 201 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12512-7
2. Aliev T. A., *Digital Noise Monitoring of Defect Origin*, Springer, 2007, 223 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71754-8
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 231–242. DOI: 10.3103/S0146411618030021
4. Aliyev T. A., Musaeva N. F., *Automation and Remote Control*, 1998, vol. 59, no. 5, pp. 679–688.
5. Aliev T. A., Rzayeva N. E., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 440–446. DOI: 10.1007/s11018-018-1449-7
6. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I., *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 35–55. DOI: 10.1615/JAutomatInfSci.v48.i4.0
7. Пупков К. А., Езупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статическая динамика и идентификация систем автоматического управления. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
8. Bendat J. S., Piersol A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2-nd ed, N. Y., Wiley, 1993, 458 p. DOI: org/10.2514/3.49131
9. Раннев Г. Г. Измерительные информационные системы. М.: Приборостроение, 2010. 336 с.
10. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Академия, 2009. 352 с.
11. Mehdiyeva G. Y., Ibrahimov V. R., Imanova M. N., *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, vol. 306, pp. 1–9, DOI: org/10.1016/j.cam.2016.03.026
12. Сандомирский С. Г. Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции между её истинными значениями и результатами измерений // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 13–17.
13. Сандомирский С. Г. Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведённой погрешности измерения // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 90–98. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98
14. Burkatovskaya Yu., B., Vorobeichikov S. E., *Automation and Remote Control*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 425–437.
15. Guseynov S. E., Aleksejeva J. V., Andreyev S. A., *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1117, pp. 254–257. DOI: org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.254
16. Bila G. D., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 160–172. DOI: 10.1007/s10559-016-9811-8
17. Stoikova L. S., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 217–224. DOI: org/10.1007/s10559-016-9892-4
18. Vishnyakov A. N., Tsyppin Ya. Z., *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 12, pp. 1744–1751.
19. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения, 5-е изд. М.: КНОРУС, 2013. 448 с.

20. Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B., *Mechatronics*, 2001, no. 11, pp. 439–449.  
DOI: org/10.1016/S0957-4158(00)00027-1

## References

1. Aliev T. A., *Noise control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents*, Springer, 2019, 201 p.  
DOI: 10.1007/978-3-030-12512-7
2. Aliev T. A., *Digital Noise Monitoring of Defect Origin*, Springer, 2007, 223 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71754-8
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 231–242. DOI: 10.3103/S0146411618030021
4. Aliyev T. A., Musaeva N. F., *Automation and Remote Control*, 1998, vol. 59, no. 5, pp. 679–688.
5. Aliev T. A., Rzayeva N. E., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 440–446. DOI: 10.1007/s11018-018-1449-7
6. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I., *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 35–55. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.0
7. Pupkov K. A., Yegupov N. D., *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya, Vol. 2. Staticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya*, Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2004, 640 p. (in Russian).
8. Bendat J. S., Piersol A. G., *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*, 2-nd ed, N. Y., Wiley, 1993, 458 p. DOI: org/10.2514/3.49131
9. Rannev G. G., *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy*, Moscow, Priborostroenie Publ., 2010, 336 p. (in Russian).

10. Alekseev A. A., Korablev Yu. A., Shestopalov M. Yu., *Identifikatsiya i diagnostika system*, Moscow, Akademiya Publ., 2009, 352 p. (in Russian).

11. Mehdiyeva G. Y., Ibrahimov V. R., Imanova M. N., *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, vol. 306, pp. 1–9. DOI: org/10.1016/j.cam.2016.03.026

12. Sandomirskii S. G., *Measurement Techniques*, 2014, no. 10, pp. 13–17 (in Russian).

13. Sandomirski S. G., *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

14. Burkatovskaya Yu., B., Vorobeichikov S. E., *Automation and Remote Control*, 2000, vol. 61, no. 3, pp. 425–437.

15. Guseynov S. E., Alekseyeva J. V., Andreyev S. A., *Advanced Materials Research*, 2015, no. 1117, pp. 254–257.  
DOI: org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1117.254

16. Bila G. D., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 160–172. DOI: 10.1007/s10559-016-9811-8

17. Stoikova L. S., *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 217–224. DOI: org/10.1007/s10559-016-9892-4

18. Vishnyakov A. N., Tsytkin Ya. Z., *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 12, pp. 1744–1751.

19. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A., *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya*, Moscow, KNORUS Publ., 2013, 448 p. (in Russian).

20. Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B., *Mechatronics*, 2001, no. 11, pp. 439–449.  
DOI: org/10.1016/S0957-4158(00)00027-1

Дата поступления: 12.02.2020.

Дата принятия: 03.03.2020.

## Development of technologies for reducing the error of traditional algorithms of correlation analysis of noisy signals

Telman A. Aliev<sup>1,2</sup>, Naila F. Musaeva<sup>2</sup>, Narmin E. Rzayeva<sup>2</sup>, Ana I. Mammadova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Science, Baku, Azerbaijan,  
e-mail: telmancyber@gmail.com, anahaciyeva@gmail.com

<sup>2</sup>Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan,  
e-mail: musanaila@gmail.com, nikanel1@gmail.com

The authors analyze the factors affecting the errors in the estimates of the correlation functions of the noisy signals when using traditional calculation algorithms. It is shown that the sum noise of the noisy signal in many cases consists of the noise caused by external factors and the noise caused by the initiation of various defects during the operation of control objects. For this reason, in order to eliminate the error in the results of the correlation analysis of noisy signals, it is necessary to create algorithms and technologies for determining the estimate of the noise variance and the cross-correlation functions between the useful signal and the noise. For this purpose, appropriate algorithms and technologies are proposed that open up the possibility of reducing the error of traditional technologies for determining the estimates of correlation functions. With the purpose of reducing the error of the results of correlation analysis, a technology is proposed for determining the approximate equivalent samples of the noise of the noisy signals. It is shown that using the equivalent noise samples, it is possible to obtain results that are identical to the results of using real samples of the noise in the correlation analysis of the same signals. Moreover, by extracting the equivalent noise samples from the noisy signal, the equivalent samples of the useful signal are also determined, which allow determining the estimates equivalent to the estimates of the correlation functions of the useful signal. At the same time, having equivalent noise samples and useful signal samples, the estimates of the cross-correlation function between the useful signal and the noise are determined. The study have shown that despite certain errors in the equivalent samples compared to the true samples, with a sufficient observation time using equivalent samples, the error of traditional technologies for the correlation analysis of noisy signals can be significantly reduced. These technologies can also be used to correct errors in the results of the analysis of experimental data in information-measuring and other measuring complexes and systems, which will significantly improve their metrological characteristics.

**Key words:** signal, noise, noisy signal, correlation function, object, diagnostics, identification, estimate, error, noise samples, equivalent samples, useful signal.

## Метод передачи единицы мощности высокоинтенсивного лазерного излучения

А. И. Колпаков<sup>1</sup>, А. М. Райцин<sup>2</sup>, М. В. Улановский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Российская Федерация, e-mail: 1978fox@mail.ru, ulanovsky1946@mail.ru

<sup>2</sup>Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация, e-mail: arcadiyram@rambler.ru

Предложен метод передачи единицы средней мощности лазерного излучения средствами измерений мощности больших уровней (киловатты) с возможностью постоянного контроля процесса передачи. Разработан измерительный оптический делитель мощности лазерного излучения, конструктивно выполненный в виде клина и позволяющий по сравнительно небольшой мощности излучения, отражённого от просветлённой поверхности передней грани клина, определить мощность излучения пучка, поступающего на калибруемое средство измерений. Предложенный метод основан на применении разработанного делителя в эталонной установке и предусматривает реализацию трёх режимов работы установки: режим определения коэффициента эквивалентности; режим определения коэффициента деления оптического делителя; режим передачи единицы мощности средствами измерений и определение контрольного параметра оптического делителя. Контроль процесса передачи осуществляется измерением мощности излучения, отражённого от задней грани клина, и определением контрольного параметра. Приведены условия, при которых целесообразно применение предложенного режима определения коэффициента деления оптического делителя. Особенность рассматриваемого метода – возможность оперативного контроля коэффициента деления оптического делителя, позволяющего в реальном времени оценивать достоверность процесса калибровки средств измерений. Получена формула метрологической прослеживаемости результатов измерений мощности к ГЭТ 28-2016. Рассмотрены основные составляющие погрешности определения мощности излучения, поступающей на вход калибруемого средства измерений. Результаты экспериментальных исследований метода позволяют утверждать, что на длине волны 10,6 мкм суммарная погрешность измерения мощности, выраженная в виде среднего квадратического отклонения, не превышает 2,0 %. Метод можно использовать в соответствующих вторичных эталонах единицы мощности, получающих единицу от Государственного специального эталона средней мощности ГЭТ 28-2016.

**Ключевые слова:** метрология, методы измерений параметров высокоинтенсивных лазеров, калибровка средств измерений, передача единицы мощности, вторичный эталон, измерительный оптический делитель мощности.

Одним из перспективных применений высокоинтенсивного излучения непрерывных технологических лазеров является промышленная обработка материалов [1]. Для её проведения широко используются CO<sub>2</sub>-лазеры, эффективность которых обусловлена высоким коэффициентом полезного действия (~15–20 %). При незначительных тепловых потерях лазерного излучения удаётся осуществлять резку, в том числе неметаллических материалов больших толщин.

Эффективность лазерного воздействия напрямую зависит от тщательного контроля энергетических и пространственно-энергетических параметров излучения, что обуславливает необходимость разработки высокоточных средств измерений (СИ) и соответствующей им эталонной аппаратуры различных рангов.

При метрологическом обеспечении технологических, исследовательских и специальных лазерных систем необходима измерительная аппаратура средней мощности высокоинтенсивного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм,

предназначенная для воспроизведения, хранения и передачи СИ единицы средней мощности больших уровней лазерного излучения. При этом актуальной задачей является метрологическая прослеживаемость результатов измерений мощности к эталонам, что обеспечивает единство измерений (Приказ Росстандарта от 22 октября 2018 года № 2197 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм»).

Известные методы передачи единицы мощности, предназначенные для метрологической аттестации эталонов, поверочных установок и СИ, основаны либо на последовательной схеме, где эталонный преобразователь (ЭП) заменяется калибруемым СИ, либо на параллельной схеме, при которой предусмотрена одновременная подача оптической мощности в ЭП и калибруемое СИ [2–8], либо на использовании комбинированной параллельно-последовательной схемы [9].

Упомянутые методы приводят к положительным результатам при сравнительно невысоких уровнях мощности излучения, но не позволяют передавать единицу средней мощности больших уровней излучения. Это связано с тем, что в случае больших уровней излучения разработка ЭП сопряжена с трудностями по сохранению метрологических характеристик, а также в связи с большой разницей значений измеряемых мощностей возникают сложности при передаче единицы мощности от ГЭТ 28-2016 такому ЭП.

Новым подходом к решению данной задачи является предлагаемый в работе метод передачи единицы средней мощности больших уровней лазерного излучения, основанный на возможности размещения ЭП в отражённом канале излучения, где значение измеряемой мощности может составлять 0,5–1,0 % излучаемой мощности [10]. При этом отпадает необходимость в использовании средства контроля относительного уровня мощности, что увеличивает достоверность результатов измерений. Метод может быть применен в соответствующих вторичных эталонах единицы мощности.

**Метод передачи единицы средней мощности больших уровней излучения.** Суть предлагаемого метода состоит в том, что в оптическую схему эталонной установки вводят измерительный оптический делитель, конструктивно выполненный в виде клина.

Излучение источника, попадающее на оптический делитель, разделяется:

на прямое, проходящее через клин на калибруемое СИ; отражённое от просветлённой поверхности передней грани клина и поступающее на ЭП;

отражённое от задней грани клина, поступающее на дополнительное средство измерений (ДСИ) излучения для контроля постоянства коэффициента деления оптического делителя [10].

Такой контроль является новым подходом при передаче единицы мощности, так как позволяет в реальном масштабе времени оценивать состояние оптического делителя, который является основным источником погрешности в канале передачи единицы мощности. Просветлённая поверхность передней грани клина позволяет по сравнительно небольшой мощности излучения, отражённого от неё, определить мощность излучения пучка, поступающего на калибруемое средство измерений.

Предложенный метод предусматривает три основных режима работы эталонной установки: 1) определение коэффициента эквивалентности; 2) определение коэффициента деления оптического делителя; 3) передача единицы мощности СИ и определение контрольного параметра оптического делителя.

**Режим определения коэффициента эквивалентности.** В первом режиме ЭП получает и хранит единицу мощности от ГЭТ 28-2016 в виде коэффициента эквивалентности  $K_э$  при подаче на вход ЭП оптической мощности  $P_{опт}$  непрерывного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм и электрической мощности  $P_{эл}$ , подаваемой в обмотку электрического нагревателя ЭП.

Коэффициент эквивалентности определяется как отношение коэффициентов  $A_{опт}^I$  преобразования ЭП по оптической мощности лазерного излучения к коэффициенту  $A_{эл}^I$  преобразования ЭП по электрической мощности, т. е.

$$K_э = A_{опт}^I / A_{эл}^I;$$

$$A_{опт}^I = u_{опт}^I / P_{опт}; \quad (1)$$

$$A_{эл}^I = u_{эл}^I / P_{эл}, \quad (2)$$

где верхний индекс указывает номер режима работы устройства;  $u_{опт}^I$  – сигнал на выходе ЭП при подаче на его вход оптического излучения ГЭТ 28-2016 мощностью  $P_{опт}$  в первом режиме работы;  $u_{эл}^I$  – сигнал на выходе ЭП при электрической мощности на его входе  $P_{эл}$  в первом режиме работы.

Из (1), (2) следует

$$P_{опт} = u_{опт}^I / A_{опт}^I = u_{опт}^I / (A_{эл}^I K_э),$$

где

$$K_э = u_{опт}^I P_{эл}^I / (u_{эл}^I P_{опт}). \quad (3)$$

ЭП хранит единицу мощности в виде  $K_э$  в течение межповерочного интервала. Значение  $A_{эл}$  уточняется перед каждой передачей единицы мощности во втором режиме. Таким образом, необходимая точность измерений мощности лазерного излучения достигается дополнительной высокоточной калибровкой ЭП электрической мощностью  $P_{эл}$ , подводимой к обмотке нагревателя ЭП.

**Режим определения коэффициента деления оптического делителя.** На рисунке *a* приведена упрощённая функциональная схема устройства, реализующего второй режим предлагаемого метода – определение коэффициента деления оптического делителя. Коэффициент деления оптического делителя представляет отношение:

$$K_d = K_{пр} / K_{отр}, \quad (4)$$

где  $K_{пр}$  – коэффициент пропускания оптического делителя;  $K_{отр}$  – коэффициент отражения излучения от передней грани оптического делителя.

В этом режиме излучение от источника излучения *ИИ* (см. рисунок *a*) поступает на оптический делитель *ОД* с просветляющим покрытием, обеспечивающим коэффициент пропускания 99,0–99,5 %. Излучение, отражённое от передней грани оптического делителя, попадает на *СИ1*, где производится серия из  $n_1$  измерений выходного сигнала  $U_1^{II}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_1$ , а излучение, отражённое от задней грани оптического делителя, поступает на поглотитель *П*. Излучение, прошедшее через оптический делитель, попадает на *СИ2*, где одновременно с *СИ1* производится серия  $n_1$  измерений выходного сигнала  $U_2^{II}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_1$ , задаваемая блоком управления *БУ*, результаты измерений поступают в компьютер *К*.

Для второго режима работы можно записать следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} U_1^{II}(i) &= P_0^{II}(i) K_{отр} K_{СИ1} + \xi_1^{II}(i), \\ U_2^{II}(i) &= P_0^{II}(i) K_{пр} K_{СИ2} + \xi_2^{II}(i), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $P_0^{II}(i)$  – мощность источника излучения;  $K_{СИ1}$ ,  $K_{СИ2}$  – коэффициенты преобразования соответственно СИ1, СИ2;  $\xi_1^{II}(i)$ ,  $\xi_2^{II}(i)$  – погрешности измерения мощности соответственно СИ1, СИ2.

Из (5) следует, что результаты измерений зависят от коэффициентов преобразования СИ1 и СИ2, влияющих на определение коэффициента деления (4). Заметим, что коэффициенты преобразования упомянутых СИ отличаются друг от друга. Причина отличия – неидентичность чувствительностей. Для учёта и устранения различий в коэффициентах преобразования СИ1 и СИ2 меняют местами, после чего проводят новую серию из  $n_1$  одновременных измерений выходных сигналов СИ1  $\tilde{U}_1^{II}(i)$  и СИ2  $\tilde{U}_2^{II}(i), i=1, 2, \dots, n_1$ :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_1^{II}(i) &= \tilde{P}_0^{II}(i) K_{пр} K_{СИ1} + \tilde{\xi}_1^{II}(i), \\ \tilde{U}_2^{II}(i) &= \tilde{P}_0^{II}(i) K_{отр} K_{СИ2} + \tilde{\xi}_2^{II}(i), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\tilde{P}_0^{II}(i)$  – мощность источника излучения в новой серии;  $\tilde{\xi}_1^{II}(i), \tilde{\xi}_2^{II}(i)$  – погрешности измерений выходных сигналов соответственно СИ1 и СИ2 в новой серии измерений.

Для наглядности выводов предположим идеальный случай, при котором в (5) и (6) отсутствуют слагаемые, определяющие погрешности измерений, и коэффициенты преобразования СИ1 и СИ2 не зависят от уровня измеряемой мощности.

Из (5), (6) следует

$$\frac{\hat{U}_2^{II}}{\hat{U}_1^{II}} = K_d \frac{K_{СИ2}}{K_{СИ1}}; \quad \frac{\hat{U}_1^{II}}{\hat{U}_2^{II}} = K_d \frac{K_{СИ1}}{K_{СИ2}} \Rightarrow K_d = \sqrt{\frac{\hat{U}_2^{II}}{\hat{U}_1^{II}} \frac{\hat{U}_1^{II}}{\hat{U}_2^{II}}}, \quad (7)$$

где

$$\hat{U}_1^{II} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_1^{II}(i); \quad \hat{U}_2^{II} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} U_2^{II}(i);$$

$$\hat{\tilde{U}}_1^{II} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \tilde{U}_1^{II}(i); \quad \hat{\tilde{U}}_2^{II} = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \tilde{U}_2^{II}(i).$$

Из (7) следует, что в идеальном случае влияние коэффициентов преобразования СИ1 и СИ2 на коэффициент деления оптического делителя полностью исключается. В реальном случае влияние  $K_{СИ1}, K_{СИ2}$  исключается с точностью, определяемой их изменением в зависимости от мощности излучения, а также параметрами погрешностей и нестабильностью мощности излучателя, что является предметом отдельного рассмотрения.

**Режим передачи единицы мощности СИ и определение контрольного параметра оптического делителя.** Упрощённая функциональная схема устройства, реализующего третий режим предлагаемого метода, представлена на рисунке б.

В третьем режиме работы в первую очередь определяется коэффициент преобразования ЭП по электрической мощности. На обмотку замещения ЭП подаётся электрическое напряжение известной мощности  $P_{эл}^{III}$ , равной  $P_{эл}^{III} = P_{эл}^I$  (в режиме определения коэффициента эквивалентности). Определяется коэффициент преобразования по электрической мощности в серии из  $n_2$  измерений:

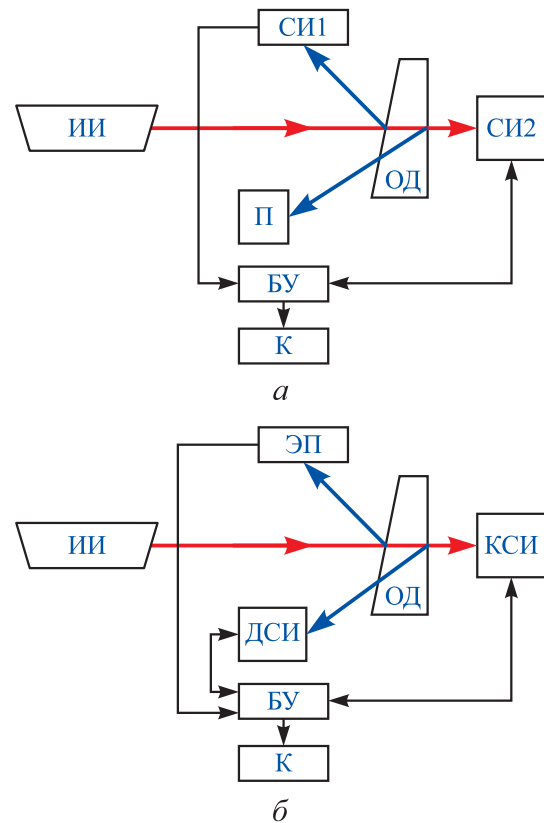
$$A_{эл}^{III} = \bar{U}_{эл}^{III} / P_{эл}^{III},$$

где  $\bar{U}_{эл}^{III} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} U_{эл}^{III}(i), U_{эл}^{III}(i), i=1, 2, \dots, n_2$  – сигнал на выходе ЭП при электрическом сигнале на его входе мощностью  $P_{эл}^{III}$  в третьем режиме работы.

Далее производится серия  $n_2$  измерений выходного сигнала ЭП  $U_{эл}^{III}(i), i=1, 2, \dots, n_2$  при подаче на его вход оптического излучения. Измерения проводятся на отражённом излучении, составляющем примерно 1 % мощности источника. Одновременно с  $U_{эл}^{III}(i)$  измеряется выходной сигнал калибруемого СИ  $U_{СИ}(i), i=1, 2, \dots, n_2$ . Мощность на входе калибруемого СИ определяется с учётом определённых ранее коэффициентов деления и эквивалентности:

$$P_{вх} = \frac{\hat{K}_d}{A_{эл}^{III} K_{э}} \bar{U}_{эл}^{III}, \quad (8)$$

где  $\bar{U}_{эл}^{III} = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} U_{эл}^{III}(i), U_{эл}^{III}(i), i=1, 2, \dots, n_2$  – сигнал на выходе ЭП при подаче на его вход оптического излучения в третьем режиме работы.



Функциональные схемы эталонной установки для режимов определения коэффициента деления (а), передачи единицы мощности и определения контрольного числа (б):

ИИ – источник излучения; СИ1, СИ2 – средства измерений; ОД – оптический делитель; П – поглотитель; БУ – блок управления; К – компьютер; ЭП – эталонный преобразователь; КСИ, ДСИ – калибруемое и дополнительное средства измерений соответственно

Functional diagrams of the reference installation for the modes of determining the division coefficient (а), transmission of a power unit and determination of the control number (б):

AI – radiation source; SI1, SI2 – measuring instruments; OD – optical divider; P – absorber; BU – control unit; K – computer; EP – reference converter; KSI, DSI – calibrated and additional measuring instruments, respectively

С учётом (3) выражение для  $P_{\text{вх}}$  запишем в виде

$$P_{\text{вх}} = \hat{K}_d \frac{u_{\text{эл}}^I \bar{u}_{\text{ЭП}}^{\text{III}}}{A_{\text{эл}}^{\text{III}} u_{\text{ЭП}}^I P_{\text{эл}}^I} P_{\text{опт}}. \quad (9)$$

Из (9) следует прослеживаемость результатов измерения мощности, поступающей на вход калибруемого СИ в третьем режиме работы, к измерению мощности  $P_{\text{опт}}$  ГЭТ 28-2016 в первом режиме работы.

Результатом калибровки СИ будет рассчитанное значение поправочного коэффициента:

$$K_{\text{СИ}} = \sum_{i=1}^{n_2} U_{\text{СИ}}(i) / (n_2 P_{\text{вх}}).$$

В процессе эксплуатации СИ значение его выходного сигнала  $U_{\text{СИ}}$  необходимо разделить на  $K_{\text{СИ}}$ , что определяет значение измеренной мощности ( $P_{\text{СИ}} = U_{\text{СИ}} / K_{\text{СИ}}$ ).

Оптический делитель вносит основную долю в погрешность измерения мощности предложенным методом. Поэтому в процессе передачи единицы мощности необходим контроль параметров оптического делителя. Параметры оптического делителя определяются текущим значением контрольного параметра  $\hat{K}_{\text{к.п}}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n_2$ . Вычисление контрольного параметра производится в серии из  $n_2$  одновременных измерений мощности излучения, отражённого от задней грани оптического делителя, и мощности излучения, отражённого от передней грани оптического делителя (см. рисунок б), по формуле

$$\hat{K}_{\text{к.п}}(i) = P_{\text{ЭП}}^{\text{III}}(i) / P_{\text{ДСИ}}^{\text{III}}(i), \quad i=1, 2, \dots, n_2,$$

где  $P_{\text{ДСИ}}^{\text{III}}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n_2$  – мощность излучения, измеренная ДСИ;  $P_{\text{ЭП}}^{\text{III}}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n_2$  – мощность излучения, измеренная ЭП.

Для получения достоверных результатов передачи единицы мощности излучения в каждом цикле измерений также определяется доверительный интервал для контрольного параметра. При этом  $\hat{K}_{\text{к.п}}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n_2$  в каждом измерении должен находиться в вычисленном доверительном интервале, определяемом заданной доверительной вероятностью, а изменение этого интервала в разных циклах из-за дестабилизирующих факторов не должно превышать допустимого значения. В случае выхода контрольного параметра за этот интервал и при изменении ширины доверительного интервала сверх допустимого необходимо дополнительно уточнять значение коэффициента деления оптического делителя.

**Оценка погрешности метода.** Исходя из функциональных схем эталонной установки (см. рисунок) мощность на входе калибруемого СИ определяется в соответствии с выражением (8). При этом реализуется метод непосредственного сличения, т. е. проведение одновременных измерений одного и того же значения единицы мощности калибруемым СИ и ЭП.

Из (8) следует, что относительное среднее квадратическое отклонение (СКО) (отношение абсолютного СКО к среднему значению) мощности на входе калибруемого СИ (суммарная погрешность измерения мощности) определяется в виде квадратного корня из суммы относительных дисперсий:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\text{КД}}^2 + S_{A_{\text{эл}}}^2 + S_{K_{\text{э}}}^2 + S_{\text{ЭП}}^2}, \quad (10)$$

где  $S_{\text{КД}}^2$  – погрешность определения коэффициента деления оптического делителя во втором режиме работы, являющаяся погрешностью передачи единицы мощности;  $S_{A_{\text{эл}}}^2$  – погрешность определения коэффициента преобразования ЭП по электрической мощности  $A_{\text{эл}}^{\text{III}}$  в третьем режиме работы;  $S_{K_{\text{э}}}^2$  – погрешность определения коэффициента эквивалентности в первом режиме работы;  $S_{\text{ЭП}}^2$  – погрешность измерения выходного сигнала ЭП  $\bar{u}_{\text{ЭП}}^{\text{III}}$  в третьем режиме работы.

Рассмотрим составляющие погрешности, входящие в (10). Погрешность  $S_{A_{\text{эл}}}^2$  определяется как

$$S_{A_{\text{эл}}}^2 = S_{P_{\text{эл}}^{\text{III}}}^2 + S_{\bar{u}_{\text{эл}}^{\text{III}}}^2,$$

где  $S_{P_{\text{эл}}^{\text{III}}}^2$  – относительная дисперсия значения электрической мощности, формируемой аппаратурой ЭП в третьем режиме работы;  $S_{\bar{u}_{\text{эл}}^{\text{III}}}^2$  – относительная дисперсия измерения электрической мощности ЭП в третьем режиме работы.

Коэффициент эквивалентности  $K_{\text{э}}$ , определяемый в первом режиме работы, вычисляется по формуле (3). Его значение устанавливается в выбранной точке динамического диапазона мощности излучения лазера. Исходя из (3) погрешность  $S_{K_{\text{э}}}^2$  может быть записана в виде суммы относительных дисперсий:

$$S_{K_{\text{э}}}^2 = S_{u_{\text{ЭП}}^I}^2 + S_{u_{\text{эл}}^I}^2 + S_{P_{\text{эл}}^I}^2 + S_{P_{\text{опт}}}^2,$$

где  $S_{u_{\text{ЭП}}^I}^2$  – погрешность измерения сигнала на выходе ЭП при подаче на вход излучения от ГЭТ 28-2016 мощностью  $P_{\text{опт}}$ ;  $S_{u_{\text{эл}}^I}^2$  – погрешность измерения сигнала на выходе ЭП от электрического сигнала на его входе мощностью  $P_{\text{эл}}^I$ ;  $S_{P_{\text{эл}}^I}^2$  – погрешность измерения электрической мощности, формируемой аппаратурой ЭП в первом режиме работы в выбранной точке динамического диапазона;  $S_{P_{\text{опт}}}^2$  – погрешность воспроизведения и передачи единицы мощности ГЭТ 28-2016.

В результате исследования и экспериментальной проверки работы устройства на длине волны 10,6 мкм суммарная погрешность измерения мощности, выраженная в виде СКО, составляет не более 2,0 %.

**Заключение.** Предложенный метод позволяет существенно расширить номенклатуру калибруемых СИ, измеряющих мощность высокоинтенсивного лазерного излучения. Для успешной реализации метода необходимо высокоточное определение коэффициента деления оптического делителя. Режим определения коэффициента деления, основанный на перестановке применяемых СИ, позволяет исключить погрешность, связанную с неидентичностью коэффициентов преобразования при условии их независимости от мощности излучения, что увеличивает достоверность калибровки СИ. В дальнейшем представляется необходимым провести исследование метрологических характеристик оптического делителя, учитывающего нелинейность применяемых СИ и погрешностей измерения, входящих в (5), (6).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (skr.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEF159519X0005).

## Список литературы

1. Голышев А. А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 1(70). С. 16–21. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21
2. Иванов В. С., Золотаревский Ю. М., Котюк А. Ф. и др. Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А. Ф. Котюка. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 542 с.
3. Длугоунович В. А., Исаевич А. В., Круплевич Е. А., Насенник Л. Н. Влияние характеристик излучения лазеров на точность калибровки средств измерений // Приборы и методы измерений. 2015. № 1 (10). С. 31–38.
4. Длугоунович В. А., Исаевич А. В., Круплевич Е. А. Комплекс для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения // Метрология и приборостроение. 2014. № 4. С. 20–23.
5. Kruplevich E., Nasennik L., Chernikov V., *Conference: SPIE Proceedings*, 2006, vol. 6251, pp. 62510 N-1-6, DOI: 10.1117/12.677693
6. Тимофеев Е. И. Метрологическое обеспечение в области энергетической лазерометрии // Украинский метрологический журнал. 2007. № 1. С. 29–33.
7. Тимофеев Е. И. Разработка и исследование средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения // Украинский метрологический журнал. 2012. № 3. С. 35–39.
8. Пат. № SU 1408245 A1 / А. А. Либерман, А. П. Кнупфер // Изобретения. 1988. № 25.
9. Тимофеев Е. И. Новая структура государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Метрология и измерительная техника» (Метрология 2014), Харьков 2014. С. 272–278.

10. Пат. № 2687303 С1 РФ / А. М. Райцин, М. В. Улановский // Изобретения. Полезные модели. 2019. № 14.

## References

1. Golyshev A. A., *Obrabotka metallov / Metal working and material science*, 2016, № 1 (70), pp. 16–21, DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-16-21 (in Russian).
2. Ivanov V. S., Zolotarevskii Yu. M., Kotyuk A. F., et al., *Osnovy opticheskoi radiometrii*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 542 p. (in Russian).
3. Dlugunovich V. A., Isaevich A. V., Kruplevich E. A., Nasennik L. N., *Devices and Methods of Measurements*, 2015, no. 1 (10), pp. 31–38 (in Russian).
4. Dlugunovich V. A., Isaevich A. V., Kruplevich E. A., *Metrologiya i priborostroenie*, 2014, no. 4, pp. 20–23 (in Russian).
5. Kruplevich E., Nasennik L., Chernikov V., *Conference: SPIE Proceedings*, 2006, vol. 6251, pp. 62510 N-1-6, DOI: 10.1117/12.677693
6. Timofeev E. I., *Ukrainskii metrologicheskii zhurnal*, 2007, no. 1, pp. 29–33.
7. Timofeev E. I., *Ukrainskii metrologicheskii zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 35–39.
8. Liberman A. A., Knyupfer A. P., Patent no. SU 1408245 A1, Byull. Izobret., no. 25 (1988).
9. Timofeev E. I., *Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Metrologiya i izmeritel'naya tekhnika" (Metrologiya 2014)*, Khar'kov, 2014, pp. 272–278.
10. Raitsin A. M., Ulanovskii M. V., Patent RF no. 2687303 S1, Byull. Izobret., no. 14 (2019).

Дата поступления: 02.03.2020.

Дата принятия: 01.04.2020.

## Method for transmitting a power unit high-intensity laser radiation

Aleksandr I. Kolpakov<sup>1</sup>, Arkady M. Raitsin<sup>2</sup>, Michael V. Ulanovskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Optical and Physical Measurements, Moscow, Russian Federation, e-mail: 1978fox@mail.ru, ulanovsky1946@mail.ru

<sup>2</sup>Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation, e-mail: arcadiyram@rambler.ru

A method is proposed for transferring a unit of laser radiation power to power measuring instruments of kilowatt levels with the possibility of constant monitoring of the transmission process. A measuring optical laser power divider has been developed, which is structurally made in the form of a wedge and allows one to determine the radiation power of the beam delivered to the calibrated measuring instrument using the relatively small radiation power reflected from the enlightened surface of the front edge of the wedge. The proposed method is based on the application of the developed divider in the reference installation and provides for the implementation of three modes of operation of the installation: the mode of determining the equivalence coefficient; the mode of determining the division ratio of the optical divider; transmission mode of a power unit to measuring instruments and determination of a control parameter of an optical divider. The control of the transmission process is carried out by measuring the radiation power reflected from the rear edge of the wedge, and determining the control parameter. The conditions are given under which it is advisable to use the proposed mode for determining the division coefficient of the optical divider. A feature of the method under consideration is the possibility of operational control of the division coefficient of the optical divider, which allows real-time assessment of the accuracy of the calibration process of measuring instruments. The formula of metrological traceability of the results of power measurements to GET 28-2016 is obtained. The main components of the error in determining the radiation power supplied to the input of a calibrated measuring instrument are considered. The results of experimental studies of the method suggest that at a wavelength of 10,6  $\mu\text{m}$ , the total error of power measurement, expressed as the standard deviation, does not exceed 2,0 %. The method can be used in the corresponding secondary power unit standards that receive a unit from the State Special Standard for Average Power GET 28-2016.

**Key words:** metrology, methods for measuring the parameters of high-intensity lasers, calibration of measuring instruments, transmission of a power unit, secondary standard, measuring optical power divider.

## Высокоточная установка для измерений длины волны отсечки одномодового оптического волокна

В. В. Григорьев, А. К. Митюрёв, А. О. Погonyшев, К. Б. Савкин

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,  
Москва, Российская Федерация, e-mail: gvv@vniiofi.ru, mak@vniiofi.ru,  
pogonyshhev@vniiofi.ru, savkin@vniiofi.ru

Рассмотрены проблемы определения и контроля оптического волокна – передающей среды волоконно-оптических систем связи. Одним из контролируемых параметров является длина волны отсечки одномодового оптического волокна, определяющая минимальную длину волны оптического излучения, при которой оптическое волокно поддерживает только одну распространяемую моду – работает в одномодовом режиме. Задача определения длины волны отсечки оптического волокна, используемого в волоконно-оптических системах связи, актуальна, так как при многомодовом режиме работы оптического волокна уменьшается его пропускная способность вследствие межмодовой дисперсии. Рассмотрены методы измерений длины волны отсечки оптического волокна. Предложен и опробован образец оригинальной высокоточной установки для измерений длины волны отсечки оптического волокна. Измерения выполнены на основе метода эталонного изгиба, описанного в стандарте ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013. Проанализированы точностные характеристики разработанной установки, получена количественная оценка погрешности измерений.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, волоконно-оптические системы связи, измерения параметров оптического волокна, длина волны отсечки.

**Введение.** В настоящее время оптическое волокно (ОВ) и кабели на его основе повсеместно используются в системах связи и передачи информации [1–3]. К основным преимуществам волоконно-оптических систем связи относят широкую полосу пропускания, малое затухание сигнала, низкий уровень шумов. Для обеспечения требуемой точности передачи необходимо контролировать параметры ОВ, являющегося основным компонентом в волоконно-оптических системах связи. Одним из этих параметров является длина волны отсечки ОВ.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 «Волокна оптические. Ч. 1-44. Методы измерений и проведение испытаний. Длина волны отсечки» длиной волны отсечки ОВ называется минимальная длина волны оптического излучения, при которой ОВ поддерживает только одну распространяемую моду. Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения оптического излучения [4]. При этом основная мода и моды высших порядков имеют разные групповые скорости, что приводит к межмодовой дисперсии. Межмодовая дисперсия уменьшает полосу пропускания ОВ и, как следствие, его пропускную способность, поэтому так важно знать предел одномодового диапазона – минимальную рабочую длину волны, для которой ОВ является одномодовым, т. е. длину волны отсечки ОВ [5]. Таким образом, рассматриваемый параметр может быть оценочным при определении пригодности ОВ и кабелей на их основе для использования, например, в волоконно-оптических системах связи.

В настоящей работе описана созданная во ВНИИОФИ установка для измерения длины волны отсечки ОВ с использованием метода эталонного изгиба, описанного в стандарте ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013. Для реализации теоретически описанного метода измерений длины волны отсечки ОВ разработаны технические решения. Выполнена количественная оценка погрешности измерений длины волны отсечки ОВ на созданной установке с учётом предложенных технических решений.

**Анализ структурной схемы установки для измерений длины волны отсечки ОВ.** В ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 и статьях [5–7] длина волны отсечки ОВ подразделяется на кабельную длину волны отсечки  $\lambda_{cc}$  для образца ОВ, помещённого в волоконно-оптический кабель, и волоконную длину волны отсечки  $\lambda_c$  для отдельного (свободного) образца ОВ. Однако на практике ОВ зачастую заключено в волоконно-оптический кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Эти механические деформации приводят к подавлению мод высших порядков и смещению значения кабельной длины волны отсечки в сторону коротких длин волн по сравнению с волоконной длиной волны отсечки. В настоящей работе исследовано только свободное ОВ с длиной волны отсечки  $\lambda_c$ , так как созданная установка предназначена для лабораторных применений, где не используется ОВ в составе волоконно-оптического кабеля.

Согласно определению из ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013, измеренная длина волны отсечки ОВ соответствует длине волны

оптического излучения, при которой отношение между общей мощностью мод, включая возбуждённые моды более высокого порядка, и мощностью основной моды составляет 0,1 дБ. В этом же стандарте описаны два метода измерения длины волны отсечки ОВ: эталонного изгиба и эталонного многомодового волокна. Работа предложенной установки основана на методе эталонного изгиба, так как при этом не изменяются условия ввода и вывода оптического излучения из ОВ и для измерений требуется только тестируемый образец ОВ. При использовании метода эталонного многомодового волокна требуется образец многомодового ОВ категории А1, принимаемого за эталонное [5].

Основной идеей метода эталонного изгиба является непосредственное измерение передаваемой тестируемым ОВ мощности оптического излучения от перестраиваемого источника излучения при селектировании мод высших порядков с помощью оправы (как правило, радиусом от 10 до 30 мм)  $P_b(\lambda)$  и в многомодовом режиме  $P_s(\lambda)$  [4, 7]. Искомая длина волны отсечки ОВ определяется путём сканирования спектрального диапазона с помощью перестраиваемого источника излучения. Перестраиваемый источник излучения должен быть стабильным по длине волны и интенсивности оптического излучения со спектральной шириной линии не более 10 нм, а также обеспечивать диапазон длин волн оптического излучения, соответствующего длине волны отсечки тестируемых ОВ (как правило, 1000–1600 нм) [6].

После получения значений мощности оптического излучения  $P_b(\lambda)$  и  $P_s(\lambda)$  во всём спектральном диапазоне перестраиваемого источника излучения требуется рассчитать

спектральный коэффициент пропускания  $A_b(\lambda)$  тестируемого образца ОВ без изгиба малого радиуса по отношению к образцу ОВ с изгибом малого радиуса

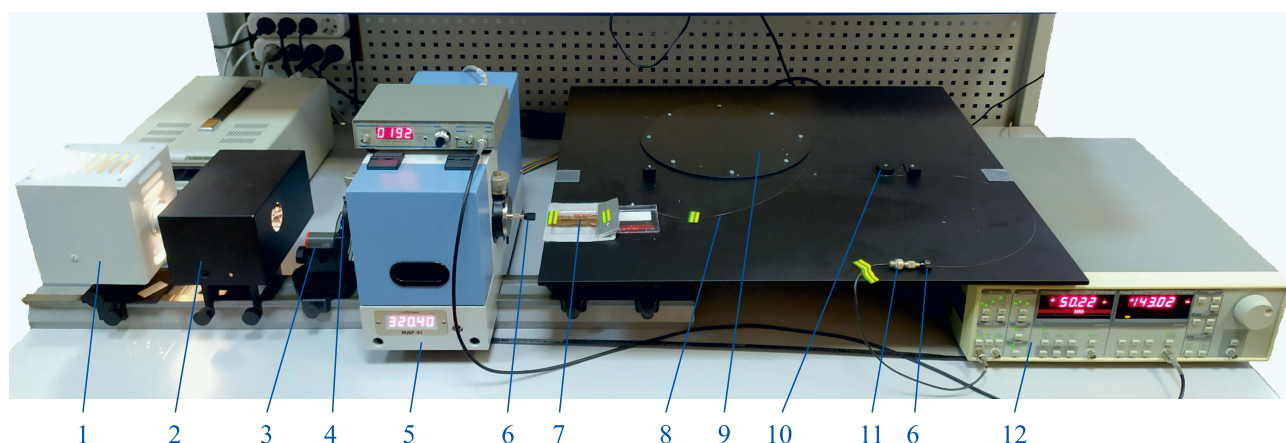
$$A_b(\lambda) = 10 \lg [P_s(\lambda) / P_b(\lambda)]. \quad (1)$$

Далее выполняется линейная интерполяция известных значений функции  $A_b(\lambda)$ , рассчитанных по формуле (1), строится график этой функции и по нему определяется наибольшее значение длины волны, при котором  $A_b(\lambda) = 0,1$  дБ. Это наибольшее значение длины волны и является искомой длиной волны отсечки тестируемого ОВ  $\lambda_c$  [4, 7].

Некоторые особенности процесса измерений длины волны отсечки ОВ, описанные в ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013, в настоящей статье не отражены, но различным образом учтены при разработке установки для измерений длины волны отсечки ОВ.

**Установка для измерений длины волны отсечки одномодового оптического волокна.** На основе описанного выше метода эталонного изгиба создана установка для измерений длины волны отсечки одномодового оптического волокна (рисунк).

Перестраиваемый источник излучения представляет собой связку двух устройств: галогеновой лампы 1 типа КГМ 30-300, предназначенной для получения непрерывного спектра в спектральном диапазоне 340–2500 нм, и монохроматора МДР-41 5, необходимого для получения селективного на определённой длине волны оптического



Установка для измерений длины волны отсечки ОВ:

- 1 – галогеновая лампа; 2 – зеркальный конденсор; 3 – механический модулятор оптического излучения; 4 – светофильтр; 5 – монохроматор МДР-41; 6 – адаптер для быстрого оконцевания оптических волокон и кабелей; 7 – фильтр оболочечных мод; 8 – тестируемое ОВ; 9 – стол с круглой оправой; 10 – оправка для селекции мод высших порядков; 11 – InGaAs-фотодиод; 12 – синхронный усилитель SR810

Apparatus for measuring cut-off wavelength of the optical fiber:

- 1 – halogen lamp; 2 – mirror condenser; 3 – mechanical modulator of optical radiation; 4 – optical filter; 5 – monochromator MDR-41; 6 – adapter for quick termination of optical fibers and cables; 7 – cladding mode filter; 8 – optical fiber under test; 9 – table with round frame; 10 – frame for the selection of higher-order optical modes; 11 – InGaAs photodiode; 12 – lock-In Amplifier SR810

излучения с малой спектральной шириной линии. Зеркальный конденсор 2 с фокусным расстоянием 125 мм служит для проецирования на входную щель монохроматора изображения светящегося тела галогеновой лампы. В состав монохроматора входит дифракционная решётка с числом штрихов 750 линий на мм и обратной линейной дисперсией 4 нм/мм, необходимая для селектирования оптического излучения по длине волны. Перестройка по длине волны источника излучения осуществляется при повороте дифракционной решётки монохроматора. Выбранная дифракционная решётка обеспечивает перестройку по длине волны оптического излучения в диапазоне от 800 до 2000 нм, что полностью перекрывает диапазон значений длины волны отсечки большинства тестируемых ОВ (как правило, составляющий от 1000 до 1600 нм). Ширина входной и выходной щелей монохроматора выставлена равной 0,25 мм, что позволяет получить спектральную ширину 1 нм линии выходящего из монохроматора оптического излучения. Длина волны оптического излучения, выходящего из монохроматора, контролируется с помощью высокоточного анализатора оптического спектра 771A-NIR-APC. Приведённый способ контроля выходящего из монохроматора оптического излучения позволяет измерять длину волны отсечки с высокой точностью.

Для исключения световых потоков высших порядков дифракции в монохроматоре используется светофильтр 4, с полосой пропускания 1000–1600 нм, соответствующей длине волны отсечки большинства тестируемых ОВ.

В целях предотвращения влияния фонового излучения на результаты измерений применяется механический модулятор оптического излучения 3 из комплекта синхронного усилителя SR810 12, усиливающий сигнал определённой частоты модуляции, задаваемой модулятором. Для ввода и вывода излучения из тестируемого ОВ 8 используются адаптеры для быстрого оконцевания оптических волокон и кабелей 6. Применение данных адаптеров позволяет подключать тестируемое ОВ к монохроматору и приёмнику излучения с высокой степенью точности и повторяемости, а также обеспечивает устойчивое положение входного и выходного концов тестируемого ОВ.

При измерениях длины волны отсечки требуется исключить распространение оптической мощности в оболочке тестируемого ОВ, другими словами, исключить появление оболочечных мод, так как они существенно влияют на принимаемый сигнал, что отрицательно сказывается на точности измерений, как указано в работах [8, 9] и стандартах ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013, ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012. Для исключения оптической мощности, распространяющейся через оболочку тестируемого ОВ, применяется фильтр оболочечных мод 7 (см. рисунок), представляющий собой кювету с иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой выше или равен показателю преломления оболочки ОВ. С участка тестируемого ОВ, вводимого в фильтр оболочечных мод, удаляется первичное покрытие, и зачищенный участок помещается в иммерсионную жидкость (ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012). Таким образом, в данном

случае, для распространяющегося через оболочку ОВ оптического излучения не будет выполняться условие полного внутреннего отражения, которое является основным для распространения излучения по ОВ [8–9], так как показатель преломления иммерсионной жидкости выше или равен показателю преломления оболочки тестируемого ОВ.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 размещение и длина тестируемого образца ОВ, а также оборудование для поддержки волокна являются ключевыми элементами метода измерений длины волны отсечки ОВ. Вследствие этого для размещения тестируемого образца ОВ был разработан стол 9 с круглой оправой радиусом 140 мм (см. рисунок). Оборудованием для поддержки тестируемого ОВ являются описанные ранее адаптеры для быстрого оконцевания оптических волокон и кабелей 6. В качестве оправы для селекции мод высших порядков использовалась металлическая цилиндрическая поверхность диаметром 30 мм, размер которой был выбран экспериментально, с учётом того факта, что значение диаметра должно быть достаточно мало для ослабления мод второго порядка, но не слишком мало во избежание эффекта макроизгиба при больших значениях длины волны (см. ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012, ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013).

В качестве приёмника излучения используется InGaAs-фотодиод 11, характеристики которого позволяют производить измерения мощности оптического излучения, передаваемой тестируемому ОВ, в зависимости от длины волны оптического излучения. Выбранный фотодетектор чувствителен к выходящему из тестируемого ОВ оптическому излучению в диапазоне измеряемых длин волн 1000–1600 нм и является линейным в диапазоне значений измеряемой мощности оптического излучения [6].

Оцифровку и усиление поступающего на приёмник излучения сигнала производится с помощью синхронного усилителя SR810 12. Данный прибор усиливает сигнал на частоте модуляции подключённого к нему механического модулятора 3, а встроенный в синхронный усилитель пикоамперметр оцифровывает и регистрирует принимаемый сигнал. Управление монохроматором 5 и математическая обработка данных синхронного усилителя 12 осуществляются с помощью персонального компьютера (на рисунке не показан).

Следует отметить, что при выбранном подходе к созданию перестраиваемого источника излучения в виде широкополосного источника излучения с монохроматором для селекции оптического излучения по длине волны в тестируемое ОВ попадает сравнительно малая часть оптического излучения. Данный факт объясняется тем, что выбранная в качестве широкополосного источника излучения галогеновая лампа является протяжённым источником излучения [10], т. е. имеет существенно разные размеры по вертикали и горизонтали. В результате вследствие малой ширины щелей монохроматора и малого диаметра сердцевин ОВ в тестируемое ОВ попадает оптическое излучение мощностью порядка  $10^{-9}$  Вт. Однако используемые в качестве детектора приборы и устройства позволяют работать с такими уровнями оптической мощности и производить требуемые измерения с высокой точностью.

Кратко напомним процедуру измерений длины волны отсечки тестируемого ОВ. С помощью разработанной установки измеряются передаваемые тестируемым ОВ мощности оптического излучения при селектировании мод высших порядков с помощью оправы  $P_b(\lambda)$  и в многомодовом режиме  $P_s(\lambda)$ . Далее по формуле (1) рассчитывается спектральный коэффициент пропускания тестируемого образца ОВ  $A_b(\lambda)$ , по которому определяется требуемая длина волны отсечки тестируемого ОВ согласно методу эталонного изгиба.

**Оценка точности измерений длины волны отсечки одномодового оптического волокна.** Точность измерений длины волны отсечки тестируемого ОВ с помощью разработанной установки оценена по абсолютной погрешности измерений. Согласно ГОСТ Р 8.736-2011 абсолютная погрешность (в нанометрах) измерений длины волны отсечки  $\Delta$  с помощью разработанной установки рассчитывается по формуле

$$\Delta = k\sqrt{\Theta^2/3 + s^2}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый принятым уровнем доверительной вероятности ( $k=2$ , что соответствует доверительной вероятности  $P=0,95$  при допущении нормального распределения);  $\Theta$  – неисклѐченная систематическая погрешность (НСП) измерений длины волны отсечки;  $s$  – среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического результатов измерений длины волны отсечки; все величины измеряются в нанометрах.

В соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 СКО среднего арифметического результатов измерений длины волны отсечки  $s$  получено путѐм многократных измерений (число измерений  $n \geq 5$ ) образца ОВ на разработанной установке и рассчитано по формуле

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_{c\_i} - \lambda_{c\_cp})^2 [n(n-1)]^{-1}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{c\_i}$  –  $i$ -й результат измерений;  $\lambda_{c\_cp}$  – среднее арифметическое результатов измерений длины волны отсечки,

$$\lambda_{c\_cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{c\_i}.$$

В результате многократных измерений длины волны отсечки тестируемого ОВ на разработанной установке получено рассчитанное по формуле (3) СКО  $s=0,4$  нм.

Согласно ГОСТ Р 8.736-2011 НСП  $\Theta$  измерений длины волны отсечки на разработанной установке вычислена как

$$\Theta = k_{\Theta} \sqrt{\sum_{j=1}^m \Theta_j^2}, \quad (4)$$

где  $k_{\Theta}$  – коэффициент, определяемый принятым уровнем доверительной вероятности и числом составляющих НСП  $\Theta_j$  ( $k_{\Theta}=1,1$ , что соответствует доверительной вероятности  $P=0,95$  при допущении нормального закона распределения и числе составляющих НСП  $\Theta_j$  равного трѐм);  $\Theta_j$  –  $j$ -я составляющая

НСП измерений длины волны отсечки;  $m=3$  – число составляющих НСП измерений длины волны отсечки.

Из соотношения (4) следует, что для определения НСП  $\Theta$  измерений длины волны отсечки необходимо определить её составляющие, влияющие на итоговую погрешность измерений. В результате анализа установлены и рассчитаны конкретные значения составляющих НСП.

Самая очевидная и весомая составляющая  $\Theta_1=1$  нм НСП измерений длины волны отсечки связана со спектральной шириной 1 нм выходящего из монохроматора оптического излучения.

Составляющая  $\Theta_2$  НСП измерений длины волны отсечки обусловлена использованием линейной интерполяции для построения графика функции  $A_b(\lambda)$  в рамках метода эталонного изгиба. В результате расчѐтов получено значение  $\Theta_2=1$  нм.

Составляющая  $\Theta_3$  НСП измерений длины волны отсечки связана с погрешностью измерения сигнала синхронным усилителем SR810. В технических характеристиках данного прибора указана относительная погрешность измерения сигнала 1 %, что соответствует значению составляющей НСП  $\Theta_3=0,1$  нм.

При подстановке вычисленных значений составляющих  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  в формулу (4) найдено значение НСП измерений длины волны отсечки  $\Theta=1,6$  нм. Затем выполнена подстановка значений  $s, \Theta$  в формулу (2) и вычислена абсолютная погрешность измерений длины волны отсечки  $\Delta=2$  нм. Полученное значение  $\Delta$  удовлетворяет условию прецизионности измерений длины волны отсечки ОВ в лабораторных условиях и соответствует абсолютной погрешности измерений зарубежными приборами данного типа.

**Заключение.** Созданная установка для измерений длины волны отсечки ОВ работает на основе метода эталонного изгиба, подробно описанного в ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013. Применение в разработанной установке предложенных авторами настоящей статьи технических решений позволило достичь высокой точности измерений длины волны отсечки ОВ. Абсолютная погрешность измерений длины волны отсечки составляет 2 нм, что соответствует абсолютным погрешностям измерений зарубежными приборами. На созданной установке можно тестировать (оценивать пригодность) ОВ для лабораторных применений. Данная установка может быть одним из средств обеспечения единства измерений в волоконной оптике.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

#### Список литературы

1. Глазов А. И., Григорьев В. В., Иванов В. С., Кравцов В. Е., Митюрев А. К., Тихомиров С. В., Крутиков В. Н. Эталонная база ВНИИОФИ в области волоконно-оптических систем передачи информации // Фотон-экспресс. 2015. № 8 (128). С. 18–25.
2. Glazov A., Grigoriev V., Kravtsov V., Svetlichny A., Tikhomirov S., *Measurement in Research and Industry: XXI IMEKO World Congress*, Czech Republic, Prague, 2015.

3. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Мороз Е. А., Погонышев А. О., Савкин К. Б. Методы калибровки оптических рефлектометров высокого разрешения, работающих в частотной области. *Измерительная техника*. 2018. № 9. С. 40–43. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-9-40-43
4. Murakami Y., Kawana A., Tsuchiya H., *Applied optics*, 1979, vol. 18, no. 7, pp. 1101–1105. DOI: 10.1364/AO.18.001101
5. Bayuwati D., Waluyo T., Mulyanto I., *Journal of Physics Conference Series*, 2018, no. 985 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/985/1/012002
6. Celikel O., *Optical and Quantum Electronics*, 2005, vol. 37, pp. 587–604. DOI: 10.1007/s11082-005-5687-y
7. Krahn F., Sange B., Neumann E., Schwierz H., Streckert J., Wilczewski F., *Fiber and Integrated Optics*, 1989, vol. 8, no. 3, pp. 203–215. DOI: 10.1080/01468038908202877
8. Иванов О. В., Никитов С. А., Гуляев Ю. В. Оболочечные моды волоконных световодов, их свойства и применение // *Успехи физические наук*. 2006. № 2 (176). С. 175–202. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200602b.0175
9. Eggleton B., Westbrook P., White C., Kerbage C., Windeler R., Burdge G., *Journal of Lightwave Technology*, 2000, vol. 18, no. 8, pp. 1084–1100. DOI: 10.1109/50.857754
10. Заказов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 488 с.

#### References

1. Glazov A. I., Grigoriev V. V., Ivanov V. S., Kravtsov V. E., Mityurev A. K., Tikhomirov S. V., Krutikov V. N., *Foton-ekspress*, 2015, no. 8 (128), pp. 18–25 (in Russian).

2. Glazov A., Grigoriev V., Kravtsov V., Svetlichny A., Tikhomirov S., *Measurement in Research and Industry: XXI IMEKO World Congress*, Czech Republic, Prague, 2015.
3. Grigoriev V., Kravtsov V., Mityurev A., Moroz E., Pogonyshev A., Savkin K., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 903–907. DOI: 10.1007/s11018-018-1522-2
4. Murakami Y., Kawana A., Tsuchiya H., *Applied optics*, 1979, vol. 18, no. 7, pp. 1101–1105. DOI: 10.1364/AO.18.001101
5. Bayuwati D., Waluyo T., Mulyanto I., *Journal of Physics Conference Series*, 2018, no. 985 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/985/1/012002
6. Celikel O., *Optical and Quantum Electronics*, 2005, vol. 37, pp. 587–604. DOI: 10.1007/s11082-005-5687-y
7. Krahn F., Sange B., Neumann E., Schwierz H., Streckert J., Wilczewski F., *Fiber and Integrated Optics*, 1989, vol. 8, no. 3, pp. 203–215. DOI: 10.1080/01468038908202877
8. Ivanov O. V., Nikitov S. A., Gulyayev U. V., *Physics-Uspekh*, 2006, no. 2 (176), pp. 175–202. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200602b.0175
9. Eggleton B., Westbrook P., White C., Kerbage C., Windeler R., Burdge G., *Journal of Lightwave Technology*, 2000, vol. 18, no. 8, pp. 1084–1100. DOI: 10.1109/50.857754
10. Zakaznov N. P., Kiryushin S. I., Kuzichev V. I., *Teoriya opticheskikh system*, 3rd ed, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1992, 488 p. (in Russian).

Дата поступления: 02.03.2020.

Дата принятия: 30.03.2020.

## High-precision apparatus for measuring cutoff wavelength of the single-mode optical fiber

Vasilii V. Grigoriev, Alexei K. Mityurev, Andrey O. Pogonyshev, Konstantin B. Savkin

The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russian Federation,  
e-mail: gvv@vniiofi.ru, mak@vniiofi.ru, pogonyshev@vniiofi.ru, savkin@vniiofi.ru

Currently, communication systems are widely used, where optical fiber is used as a transmission medium. In turn, decision and control of optical fiber parameters has become needfull, since these parameters have a significant impact on the quality and quantity of transmitted information using fiber-optic communication systems. One of these parameters is cut-off wavelength of the single-mode optical fiber, which determines the minimum wavelength of optical radiation at which the optical fiber supports only one propagated mode, in other words, operates in single-mode. The problem of decision cut-off wavelength of the optical fiber used in fiber-optic communication systems is quite relevant and demand, since when the optical fiber operates in multimode, its throughput decreases due to inter-mode dispersion. The article describes methods for measuring cut-off wavelength of the optical fiber. Variant of a high-precision apparatus for measuring cut-off wavelength of the optical fiber has been proposed and tested. The measurements were performed based on the reference bending technique described in GOST R IEC 60793-1-44-2013. The analysis of the accuracy characteristics of the developed apparatus is made, a quantitative assessment of the measurement error is obtained.

**Key words:** optical fiber, fiber optical communication systems, measurement of optical fiber parameters, cut-off wavelength.

# **Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени с использованием эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в оптическом волокне**

**О. В. Колмогоров, Д. В. Прохоров, С. С. Донченко, Е. В. Чемесова**

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,  
р. п. Менделеево, г. Солнечногорск, Московская обл., Российская Федерация,  
e-mail: kolmogorov32@rambler.ru, prokhorov@vniiftri.ru,  
donchenko\_ss@vniiftri.ru, dobro\_k@list.ru*

*Описаны задачи, требующие проведения высокоточных сравнений и синхронизации шкал времени удалённых стандартов времени и частоты. Для решения ряда задач дальности действия существующих систем сравнения шкал времени недостаточно. Рассмотрены перспективы использования волоконно-оптических линий связи для решения рассматриваемых задач. Предложен способ усиления оптических сигналов в волоконно-оптических линиях связи с помощью эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (рамановского рассеяния). Рассмотрено применение рамановского усилителя в телекоммуникационных системах. Представлена схема и результаты оценки погрешности и дальности действия системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов, использующей усиление сигналов на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния, реализуемого с помощью двухсторонней встречной накачки. Изложен принцип действия системы и порядок определения расхождения шкал времени удалённых объектов. Показано, что усиление сигналов с помощью эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в аппаратуре систем одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности.*

**Ключевые слова:** *эталонные шкалы времени и частоты, сравнение шкал времени, синхронизация, волоконно-оптическая линия связи, вынужденное комбинационное рассеяние.*

**Введение. Задачи, требующие высокоточных сравнений и синхронизации шкал времени.** Для функционирования измерительных средств глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС (комплексов метрологического обеспечения, беззапросных и запросных измерительных средств, квантово-оптических систем и др.) необходимо обеспечить передачу к ним эталонных сигналов времени или обеспечить синхронизацию шкал времени (ШВ) измерительных средств со ШВ эталона [1]. Для обеспечения соответствия точностных характеристик измерительных средств ГЛОНАСС заданным требованиям необходимо контролировать расхождение ШВ в пункте размещения измерительного средства и ШВ эталона. Измерительные средства размещаются на объектах (полигонах, комплексах и т. д.), расстояния между пунктами размещения измерительных средств и эталонов могут составлять от сотен метров до десятков километров.

Кроме того, в последние годы активно реализуется идея использования протяжённых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для дистанционного сравнения сигналов времени и частоты удалённых эталонов при проведении перспективных научных исследований. Например, это даёт возможность мониторинга изменений разности гравитационных

потенциалов между удалёнными точками [2]. На территории Европы уже созданы такие волоконно-оптические измерительные сети протяжённостью сотни километров.

Современные требования к точности синхронизации ШВ пространственно-удалённых эталонов характеризуются погрешностью не более 100–200 пс, а для некоторых задач, например исследований гравитационного поля Земли [2], требуется на порядок меньшая погрешность сравнений ШВ. В настоящее время заданный уровень точности сравнений и синхронизации ШВ удалённых до 100 км пунктов можно достичь только при передаче сигналов по ВОЛС. Причём в ряде случаев экономически целесообразно не создавать специально для систем синхронизации новые ВОЛС, а использовать имеющиеся на объектах ВОЛС при условии их пригодности для данной задачи.

В работе [3] предложена конструкция системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ), использующей ВОЛС для обеспечения сравнения и синхронизации ШВ двух удалённых объектов. Особенности СОДС ШВ являются: использование одного оптического волокна; алгоритмическое исключение времени прохождения оптического импульса в волокне; исключение влияния нестабильности временного положения фронтов

импульсов, генератора импульсов и лазерного передающего модуля на точность сравнения; возможность поэлементной калибровки системы.

В работе [4] показана возможность синхронизации ШВ времени пространственно-разнесённых (до 30 км) объектов с применением СОДС ШВ с погрешностью, не превышающей 70 пс (среднее квадратическое отклонение (СКО)). При этом систематическую погрешность можно уменьшить до 10–20 пс при использовании современных высокоточных средств измерений для калибровки системы.

Таким образом, разработанные в Российской Федерации системы синхронизации ШВ, использующие ВОЛС (СОДС ШВ, системы на основе оптоволоконного шлейфа [5]), зачастую имеют недостаточную дальность действия, составляющую единицы километров для оптоволоконного шлейфа и до 30 км для СОДС ШВ, что существенно ограничивает возможности их применения. Промышленно изготавливаемые системы синхронизации зарубежного производства (например, Timetech Optical Link, OTWTST) также имеют дальность действия значительно меньше 100 км и, кроме того, требуют использования независимой аппаратуры для контроля систематической погрешности.

Вышеизложенное обуславливает необходимость повышения дальности действия систем сравнения и синхронизации ШВ, использующих ВОЛС, причём достичь повышения дальности действия систем требуется без ухудшения их метрологических характеристик.

**Перспективы использования эффекта вынужденного комбинационного рассеяния для повышения дальности действия систем сравнений и синхронизации ШВ, использующих ВОЛС.** Перспективным направлением совершенствования систем сравнений и синхронизации ШВ в целях повышения дальности их работы представляется

использование эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (рамановского рассеяния) (ВКР) [6–8]. Явление ВКР используется в некоторых телекоммуникационных системах для усиления информационного оптического сигнала, распространяющегося в одном волокне вместе с излучением накачки [9], при этом длина волны сигнального излучения лежит в полосе комбинационного усиления. В процессе распространения по волокну энергия излучения накачки уменьшается в результате преобразования в энергию упругих колебаний молекул среды (оптического волокна), энергия которых, в свою очередь, переходит в энергию сигнальной волны. Таким образом, усиление сигнала за счёт энергии волны накачки происходит по всей длине волокна, которое вместе с источником накачки представляет собой распределённый ВКР-усилитель. Слабое (около 0,5 дБ/км) поглощение оптического излучения на длине волны накачки обеспечивает проникновение накачки на большую дальность, т. е. усиление оказывается распределённым вдоль волокна. В этом случае удаётся получить более равномерное распределение мощности оптического импульса вдоль направления распространения, при этом энергия сигнала не опускается до уровня шумов и уровня, при котором становятся существенными нелинейные искажения сигналов. Свойство распределённости ВКР-усиления позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум при усилении сигнала в ВОЛС и, следовательно, повысить максимальную дальность работы систем сравнения и синхронизации ШВ.

На рис. 1 показаны оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной и встречной накачками. Толщина линий условно соответствует мощностям излучения накачки и усиливаемого оптического импульса в ВОЛС в зависимости от расстояния от источника импульса. При практической реализации ВКР-усилителей в телекоммуникациях чаще используется встречная

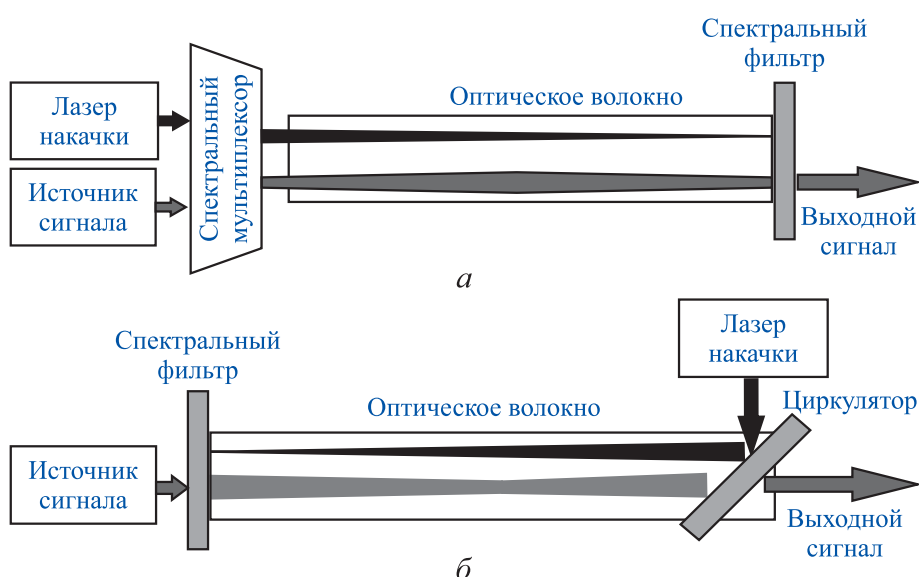


Рис. 1. Оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной (а) и встречной (б) накачками

Fig. 1. Optical scheme of Raman-amplifiers with one way directed (a) and counter (b) pumping

схема. Недостатком сонаправленной схемы применительно к телекоммуникационным системам является эффект, вызванный вынужденным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна [6]. При увеличении мощности передаваемого периодического сигнала увеличивается рассеяние в обратную сторону. Вследствие этого увеличение мощности подаваемого в ВОЛС сигнала выше некоторого порогового значения уже не приводит к росту мощности на выходе ВОЛС, а потому не имеет смысла. Таким образом, в телекоммуникационных приложениях ВКР-усилители используют в конце ВОЛС перед фотоприёмным устройством по встречной схеме. Однако в рассматриваемых системах сравнений ШВ используются одиночные короткие, длительностью не более десятков наносекунд, импульсы, при прохождении которых не возникает вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ).

На эффективность ВКР-усиления значительное влияние оказывает взаимное соотношение плоскостей поляризации сигнала и накачки: усиление максимально при совпадении плоскостей поляризации и минимально для их ортогональных положений. Поскольку на прохождение сигнала по ВОЛС оказывает влияние поляризационная модовая дисперсия, поляризация как сигнальной волны, так и волны накачки, может изменяться по длине трассы ВОЛС непредсказуемым образом, что значительно снижает результирующее усиление. Для устранения влияния данного эффекта в ВКР-усилителях накачка осуществляется с помощью двух лазерных источников с ортогональными плоскостями поляризации. Подключение такого ВКР-усилителя к ВОЛС для работы по встречной схеме представлено на рис. 2.

В [10–13] приведены результаты экспериментов по передаче телекоммуникационных сигналов по ВОЛС длиной до сотен километров с использованием ВКР-усилителей, а в [14] представлена система передачи эталонного сигнала частоты по ВОЛС с применением каскада ВРМБ-усилителей. Эти результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения таких усилителей в волоконно-оптической технике, в том числе и в системах сравнений и синхронизации ШВ.

Использовать построенный по такой схеме ВКР-усилитель в составе СОДС ШВ возможно, если модернизировать блок разветвителей-объединителей так, чтобы он обеспечивал усиление излученного импульса по сонаправленной схеме и отраженного по встречной. Для построения блока разветвителей-объединителей с функцией усиления (БРО-У) в исходный состав блока следует включить блок лазеров накачки (см. рис. 2) и оптоволоконный объединитель.

При дополнении аппаратуры систем двумя блоками лазеров накачки, установленными на противоположных концах ВОЛС, будет осуществляться двунаправленная накачка (сонаправленная и встречная), что обеспечит более равномерное распределение мощности прямого и обратного сигналов вдоль волокна и максимально возможную дальность передачи сигнала.

**СОДС ШВ с усилением сигнала на основе эффекта ВКР.** Предлагаемая схема СОДС ШВ с блоком БРО-У и дополнительным блоком лазеров накачки на конце ВОЛС приведена на рис. 3.

Особенностями данной схемы являются:

использование на передающей стороне ВОЛС (пункт 1) блока лазеров накачки БЛН1, обеспечивающего накачку волокна для усиления по сонаправленной схеме прямого сигнала, переданного с лазерного передающего модуля ЛПМ в ВОЛС, и по встречной схеме – усиления обратного сигнала, отраженного от полупрозрачного ретрорефлектора РР;

включение в оптическую схему спектральных фильтров  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ , пропускающих на фотоприёмники  $\Phi П 1$ ,  $\Phi П 2$  только сигнал от лазерного передающего модуля и фильтрующих излучение накачки;

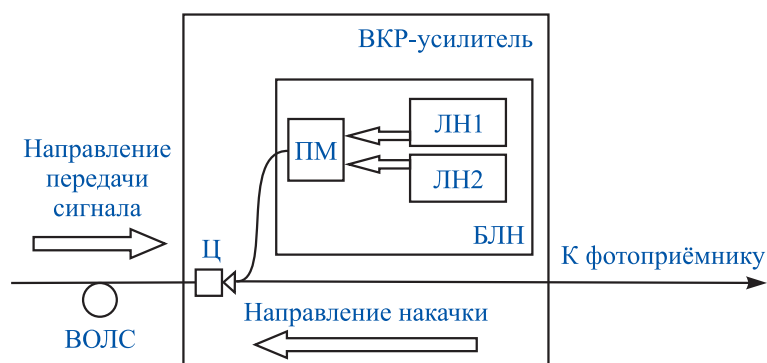


Рис. 2. Встречная схема подключения ВКР-усилителя к ВОЛС: ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи; ПМ – поляризационный мультиплексор; ЛН1, ЛН2 – лазеры накачки с ортогональными состояниями поляризациями; БЛН – блок лазеров накачки; Ц – циркулятор

Fig. 2. Scheme of counter connection of Raman-amplifier to FOCL: FOCL – fiber optic communication line; PM – polarization multiplexer; LP1, LP2 – lasers pumping with orthogonal states of polarization; UPL – unit of pump lasers; CR – circulator

использование дополнительного блока лазеров накачки БЛН2, обеспечивающего усиление прямого сигнала по встречной схеме и усиление отраженного сигнала по сонаправленной.

Принцип действия СОДС ШВ состоит в следующем. Генератор импульсов ГИ в течение секундного цикла формирует последовательность импульсов, которые преобразуются лазерным передающим модулем в оптические импульсы. Каждый  $i$ -й оптический импульс проходит через блок разветвителей-объединителей БРО-У, где небольшая часть мощности оптического импульса через разветвитель Р, объединитель О и спектральный фильтр  $\Phi 1$  поступает в фотоприёмное устройство  $\Phi П 1$ , а основная часть мощности импульса поступает в ВОЛС. Электрический сигнал с фотоприёмника  $\Phi П 1$  поступает в таймер событий ТС1, на который также подаётся импульсный сигнал времени 1 PPS, формируемый стандартом частоты и времени пункта 1 СЧВ1, что обеспечивает фиксацию момента времени  $t_i$  излучения импульса в ВОЛС в ШВ пункта 1 ШВ1.

Оптический импульс, пришедший по ВОЛС в пункт 2 с некоторой временной задержкой  $\tau_3$ , через полупрозрачный ретрорефлектор поступает в фотоприёмник  $\Phi П 2$ , который преобразует импульс в электрический сигнал, и попадает на таймер событий ТС2. Также в таймер событий ТС2 от стандарта частоты и времени пункта 2 СЧВ2 поступает сигнал 1 PPS ШВ пункта 2 ШВ2, что позволяет определить время прихода  $i$ -го оптического импульса  $\tau_{2i}$  в ШВ пункта 2.

Часть мощности оптического импульса, пришедшего в пункт 2, отражается от ретрорефлектора и проходит по ВОЛС обратный путь. С временной задержкой, равной задержке  $\tau_3$  в линии при прямом прохождении, отраженный импульс через блок разветвителей-объединителей БРО-У поступает на вход фотоприёмника пункта 1  $\Phi П 1$ .

Сигнал с фотоприёмника  $\Phi П1$  поступает на вход таймера событий  $ТС1$ , что позволяет зафиксировать время прихода  $i$ -го отражённого импульса  $\tau_{1i}$  в ШВ пункта 1. Время прохождения оптического импульса по ВОЛС протяжённостью сотни километров составляет не более единиц миллисекунд, поэтому изменение длины линии за счёт колебаний температуры не создаёт разницы времени прохождения оптического импульса по ВОЛС в прямом и обратном направлениях.

Компьютеры  $ПК1$  и  $ПК2$ , обрабатывающие измерительную информацию, объединены в локальную сеть FastEthernet. По локальной сети информация с компьютера  $ПК1$  о моментах времени  $\tau_{1i}$  поступает в компьютер  $ПК2$  для последующей обработки измерительных данных, поступающих с таймеров событий пунктов 1 и 2.

При необходимости на стандарт частоты и времени пункта 2  $СЧВ2$  можно подать команду коррекции с компьютера  $ПК2$  с целью синхронизации ШВ пунктов 1 и 2  $ШВ2$  с  $ШВ1$  и передачи синхронизированной  $ШВ2$  на измерительное средство  $ИС$  пункта 2.

В результате применения блоков лазеров накачки происходит усиление прямых и отражённых оптических импульсов как описано выше.

В работе [4] показана работоспособность системы СОДС ШВ на дальности до 30 км при длине волны лазерного излучения 1310 нм, что при коэффициенте поглощения

в волокне 0,31 дБ/км (стандартное волокно SMF-28) соответствует динамическому диапазону системы 9,3 дБ. Применение оптоэлектронных компонентов с теми же энергетическими характеристиками с длиной волны 1550 нм при коэффициенте поглощения в волокне 0,17 дБ/км обеспечит дальность действия СОДС ШВ до 50 км. В [9] экспериментально показано, что для входного сигнала мощностью 1 мВт и с длиной волны 1550 нм при использовании излучения накачки мощностью 700 мВт и с длиной волны 1455 нм коэффициент усиления за счёт ВКР по встречной схеме в волокне длиной 100 км составляет около 20 дБ (соответственно, удельный коэффициент – 0,2 дБ/км), что практически равно коэффициенту ослабления оптического волокна. Таким образом, при двунаправленной схеме усиления, даже без учёта сонаправленного усиления, дальность работы системы сравнений ШВ составит не менее 100 км.

При работе предложенной системы расхождение ШВ  $T_i$ , полученное по результатам измерений для каждого  $i$ -го импульса, рассчитывается по формуле

$$T_i = (t_i + \tau_{1i}) / 2 - \tau_{2i} + \tau_{\text{анп}} + \tau_{\text{о.в}}, \quad (1)$$

где  $t_i$  – момент времени излучения  $i$ -го импульса с пункта 1 в ШВ1;  $\tau_{1i}$  – момент времени приёма  $i$ -го отражённого импульса в пункте 1 в ШВ1;  $\tau_{2i}$  – момент времени приёма  $i$ -го

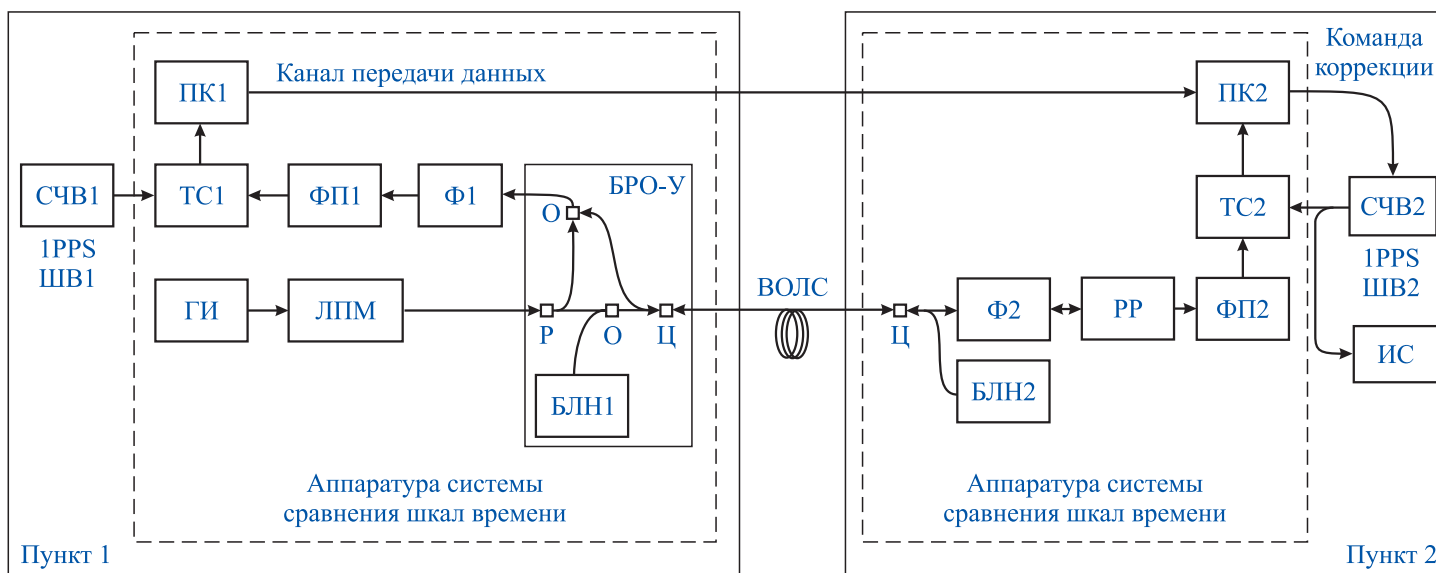


Рис. 3. Система СОДС ШВ с двунаправленным ВКР-усилением:

$СЧВ1$ ,  $СЧВ2$  – стандарты частоты и времени;  $ТС1$ ,  $ТС2$  – таймеры событий;  $\Phi П1$ ,  $\Phi П2$  – фотоприёмники;  $ЛПМ$  – лазерный передающий модуль;  $ГИ$  – генератор импульсов;  $БЛН1$ ,  $БЛН2$  – блоки лазеров накачки;  $БРО-У$  – блок разветвителей-объединителей;  $Р$  – разветвитель;  $Ц$  – циркуляторы;  $О$  – объединители;  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  – спектральные фильтры;  $РР$  – ретрорефлектор;  $ВОЛС$  – волоконно-оптическая линия связи;  $ПК1$ ,  $ПК2$  – персональные компьютеры;  $ИС$  – измерительное средство – потребитель сигналов 1 PPS

Fig. 3. System of one- and two-way comparisons of time scales using bidirectional Raman-amplifier

$SFT1$ ,  $SFT2$  – standards of frequency and time;  $TIC1$ ,  $TIC2$  – time interval counters;  $PD1$ ,  $PD2$  – photodetectors;  $LTM$  – laser transmitting module;  $PG$  – pulse generator;  $BPL$  – block of pumping lasers;  $BSC-A$  – block of splitters and combiners;  $S$  – splitter;  $CR$  – circulator;  $C$  – combiner;  $F$  – spectral filter;  $PP$  – retroreflector;  $FOCL$  – fiber optic communication line;  $PC1$ ,  $PC2$  – personal computer;  $CS$  – measuring instrument – consumer of signals 1 PPS

импульса в пункте 2 в ШВ2;  $\tau_{\text{анп}}$  – поправка для учёта задержек сигнала в аппаратуре системы;  $\tau_{\text{о.в}}$  – поправка для учёта невзаимности задержки распространения сигнала в прямом и обратном направлении, обусловленной нелинейными и дисперсионными эффектами в оптическом волокне.

При усреднении результатов измерений серии из  $N$  импульсов, излучённых в секундном цикле работы системы, усреднённое расхождение ШВ рассчитывается по формуле

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{t_i + \tau_{1i}}{2} - \tau_{2i} + \tau_{\text{анп}} + \tau_{\text{о.в}} \right). \quad (2)$$

Основными составляющими погрешности рассмотренных систем являются погрешности определения моментов времени излучения и приёма импульсов (погрешности таймеров событий – измерителей временных интервалов) и погрешность определения аппаратурной поправки.

Проанализировав выражения (1), (2), запишем выражение для оценки границ неисключённой систематической погрешности (НСП)  $\Theta_{\Sigma}$  системы, считая составляющие погрешности некоррелированными:

$$\Theta_{\Sigma}^2 = k^2 \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 \Theta_t^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial \tau_1} \right)^2 \Theta_{\tau_1}^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial \tau_2} \right)^2 \Theta_{\tau_2}^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial \tau_{\text{анп}}} \right)^2 \Theta_{\tau_{\text{анп}}}^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial \tau_{\text{о.в}}} \right)^2 \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}^2 \right], \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности;  $\Theta_t$  – погрешность определения момента времени излучения импульса в пункте 1;  $\Theta_{\tau_1}$  – погрешность определения момента времени приёма отражённого импульса в пункте 1;  $\Theta_{\tau_2}$  – погрешность определения момента времени приёма импульса в пункте 2;  $\Theta_{\tau_{\text{анп}}}$  – погрешность определения аппаратурной поправки;  $\Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$  – погрешность определения поправки за счёт невзаимности задержки распространения сигнала.

Заметим, что для случая использования одного многостопового измерителя временных интервалов (ИВИ) для регистрации как моментов излучения оптических импульсов в ВОЛС, так и моментов приёма отражённых обратно импульсов, обеспечить выполнение условия отсутствия корреляции его погрешностей можно за счёт выбора длительности интервалов времени между моментами излучения импульсов в линию.

Определив частные производные, входящие в выражение (3), получим

$$\Theta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Theta_t^2/4 + \Theta_{\tau_1}^2/4 + \Theta_{\tau_2}^2 + \Theta_{\tau_{\text{анп}}}^2 + \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}^2}. \quad (4)$$

Для оценки границ абсолютной погрешности  $\Delta_T$  измерений расхождения ШВ системой запишем соотношение

$$\Delta_T = \pm k \sqrt{\Theta_{\Sigma}^2/3 + \sigma^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – случайная составляющая погрешности измерений системы сравнений ШВ, выраженная в виде СКО.

Границы абсолютной погрешности  $\Delta_T$ , пс, измерений расхождения ШВ СОДС ШВ с ВКР-усилением

| $\Theta_T$ | $\Theta_{\Sigma}$ | $\sigma$ , пс |            |            |
|------------|-------------------|---------------|------------|------------|
|            |                   | 10            | 20         | 30         |
| $\pm 10$   | $\pm 20,6$        | $\pm 31,1$    | $\pm 46,5$ | $\pm 64,5$ |
| $\pm 20$   | $\pm 41,7$        | $\pm 51,6$    | $\pm 62,1$ | $\pm 76,5$ |
| $\pm 30$   | $\pm 61,7$        | $\pm 74,0$    | $\pm 81,7$ | $\pm 93,2$ |

Значение  $\sigma$  определяется в результате обработки результатов многократных измерений, выполненных системой сравнений и синхронизации ШВ.

Для оценки точностных характеристик предложенной системы сравнений ШВ, использующей эффект ВКР-усиления, вычислим оценки границ погрешности системы, воспользовавшись выражениями (4), (5). Результаты расчётов приведены в таблице. При расчётах значения  $\Theta_t$ ,  $\Theta_{\tau_1}$ ,  $\Theta_{\tau_2}$ ,  $\Theta_{\tau_{\text{анп}}}$ ,  $\Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$  принимали равными указанным в таблице значениям  $\Theta_T$  ( $\Theta_T = \Theta_t = \Theta_{\tau_1} = \Theta_{\tau_2} = \Theta_{\tau_{\text{анп}}} = \Theta_{\tau_{\text{о.в}}}$ ), а коэффициент охвата  $k = 2$ .

Полученные результаты расчётов показывают, что границы погрешности систем сравнений ШВ, использующих эффект ВКР-усиления в оптическом волокне, составят  $\pm 35... \pm 100$  пс (при доверительной вероятности 0,95), что не уступает по точности лучшим существующим образцам систем сравнений ШВ по ВОЛС. Таким образом, использование ВКР-усилителей в аппаратуре СОДС ШВ позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности систем.

**Заключение.** Перспективным путём повышения дальности действия систем сравнений и синхронизации ШВ удалённых объектов является использование усиления сигналов в оптическом волокне на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния. Предложена схема системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени удалённых объектов, использующей двунаправленное ВКР-усиление. В результате оценки погрешности и дальности действия систем одно- и двухсторонних сравнений шкал времени, использующих ВКР-усиление, выявлено, что реализация ВКР-усиления в аппаратуре таких систем позволит более чем в три раза увеличить их дальность действия без снижения точности систем.

#### Список литературы

1. Денисенко О. В. и др. Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 17–20.
2. Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околосветового пространства-времени. М.: ВНИИФТРИ, 2017. 438 с.
3. Донченко С. С., Колмогоров О. В., Прохоров Д. В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 14–17.

4. Колмогоров О. В., Донченко С. С., Прохоров Д. В., Бувев С. Г. Экспериментальные исследования макета системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. 2016. № 10. С. 49–51.

5. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3(7). С. 39–42.

6. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 324 с.

7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 512 с.

8. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. М.: Техносфера, 2010. 608 с.

9. Леонов А. В., Наний О. Е., Трещиков В. Н. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. 2014. № 1. С. 26–49.

10. Hansen P. B. et al., *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no. 11, pp. 1018–1019.

11. Nielsen T. N. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079–1081.

12. Zhu B. et al., *Proc. OFS 2002, Postdeadline paper FC8*, 2002, pp. FC8-1–FC8-3.

13. Mikkelsen B. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400–1402.

14. Sebastian M. F. Raupach, Andreas Koczwar, Gesine Grosche, *Physical Review A*, 2015, vol. 92, Iss. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>

## References

1. Denisenko O. V., Fedotov V. N., Sil'vestrov I. S. et al., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0657-7>

2. Fateev V. F. *Relyativistskaya metrologiya okolozemnogo prostranstva-vremeni*, VNIIFTRI, Mendeleevo Publ., 2018, 439 p. (in Russian).

3. Donchenko S. S., Kolmogorov O. V., Prokhorov D. V., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 18–22. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0656-8>

4. Kolmogorov O. V., Donchenko S. S., Prokhorov D. V., Buev S. G., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 59, no. 10, pp. 1094–1097. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1098-2>

5. Sadovnikov M. A., Sumerin V. V., *Vestnik GLONASS*, 2012, no. 3(7), pp. 39–42 (in Russian).

6. Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1995, 592 p.

7. Roger L. Freeman, *Fiber-Optic Systems for Telecommunications*, Wiley, 2002, 416 p.

8. *Volononno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyaniye i novye perspektivy*, Ed. Dmitriev S. A., Slepov N. N., Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010, 608 p. (in Russian).

9. Leonov A. V., Nanii O. E., Treshchikov V. N., *Prikladnaya fotonika*, 2014, no. 1, pp. 26–49 (in Russian).

10. Hansen P. B. et al., *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no. 11, pp. 1018–1019.

11. Nielsen T. N. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079–1081.

12. Zhu B. et al., *Proc. OFS 2002, Postdeadline paper FC8*, 2002, pp. FC8-1–FC8-3.

13. Mikkelsen B. et al., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400–1402.

14. Sebastian M. F. Raupach, Andreas Koczwar, Gesine Grosche, *Physical Review A*, 2015, vol. 92, Iss. 2. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.021801>

Дата поступления: 25.11.2019.

Дата принятия: 25.12.2019.

## A system of one- and two-way comparisons of time scales using stimulated Raman scattering

Oleg V. Kolmogorov, Dmitriy V. Prokhorov, Sergey S. Donchenko, Ekaterina V. Chemesova

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Solnechnogorsk, Moscow region, Russian Federation, e-mail: kolmogorov32@rambler.ru, prokhorov@vniiftri.ru, donchenko\_ss@vniiftri.ru, dobro\_k@list.ru

Problems requiring high-precision comparisons and synchronization of time scales of remote time and frequency standards are considered. The prospects of using fiber-optic communication lines to solve these problems are considered. Data on maximum operating distances and accuracy characteristics of time scale comparison systems using fiber-optic communication lines are given. It is shown that the range of existing systems is not enough to solve a number of problems. A method for amplifying optical signals in an optical fiber using the effect of stimulated Raman scattering is considered. The application of the Raman amplifier in telecommunication systems is considered. A method is proposed for using the effect of stimulated Raman scattering (SRS) to amplify the optical signals of time scale comparison systems. A scheme is proposed for a system of one- and two-way comparisons of time scales of distant objects, using signal amplification based on the SRS effect realized using two-way counter-pumping. The principle of the system's operation and the procedure for determining the divergence in the time scales of remote objects are described. The results of estimation of the error and range of systems of one- and two-way comparisons of time scales using Raman amplifier are presented. It is shown that the implementation of Raman-amplification in the equipment of such systems will allow more than three times to increase their range without reducing the accuracy of the systems.

**Key words:** time and frequency standards, comparison of time scales, synchronization, fiber-optical link, stimulated Raman scattering.

## Совершенствование методов и средств поверки и градуировки тепловизоров

В. В. Герасютенко<sup>1</sup>, А. В. Шарков<sup>1</sup>, В. А. Кораблев<sup>1</sup>, Д. А. Минкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru, avsharkov@corp.ifmo.ru, kvant1953@gmail.com

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: mindim-spb@mail.ru

Предложен метод поверки и градуировки тепловизоров на основе сравнения показаний температуры, полученных контактным методом с использованием хромель-алюмелевых термопар и методом тепловизионной съёмки. Для подтверждения достоверности предложенного метода изготовлена экспериментальная установка, основным элементом которой является излучающая поверхность в виде прямоугольной пластины размерами 330×200×4 мм. Пластина покрыта краской со степенью черноты не менее 0,96. Приведены результаты расчётов температурного поля излучающей поверхности пластины. Установлено, что при температурах излучающей поверхности пластины, близких к 50 °С, существенное влияние на её температурное поле оказывает теплообмен с окружающим воздухом. С целью уменьшения рассеивания тепловых потоков с излучающей поверхности пластины в окружающую среду применены нагреватели воздуха, прикреплённые к боковым торцам излучающей поверхности. Нагреватели изготовлены в виде пластин из сплава алюминия с магнием. Приведены рекомендации относительно выбора размеров пластин-нагревателей. Основные преимущества предложенного метода поверки и градуировки тепловизоров – обеспечение высокой изотермичности излучающей поверхности по высоте пластины, точность поддержания температуры на заданном уровне, сокращение времени выхода экспериментальной установки в стационарный режим.

**Ключевые слова:** тепловизор, метод поверки и градуировки, температурное поле, излучающая поверхность, теплообмен, поле зрения тепловизора, нагреватель.

**Введение.** Инфракрасная термография – это способ измерения интенсивности излучения окружающих объектов в инфракрасной области спектра с последующим определением их температуры с помощью электронно-оптических приборов. Для бесконтактных измерений и регистрации температурного поля объектов предназначены оптико-электронные приборы – тепловизоры (ГОСТ Р 8.619-2006 «ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методы поверки»). Главные преимущества тепловизионных систем: возможность бесконтактного (дистанционного) измерения температуры объекта; широкий диапазон измерения температур; отсутствие необходимости отключения устройств, оборудования, а также остановки производства для измерений; наглядность, т. е. получение общей картины теплового распределения исследуемого объекта с возможностью установления значений температур в конкретных точках объекта.

Важной задачей является обеспечение высокой точности показаний тепловизионных устройств и систем инфракрасной техники путём их градуировки [1–10]. Цель настоящей работы – разработка установки для градуировки тепловизионных устройств, позволяющей выявить возможный разброс действительных значений температуры и

показаний поверяемых средств измерений (СИ), а также обнаружить возможные неточности получаемой термограммы по всему полю зрения тепловизоров.

**Методы поверки и градуировки тепловизоров.** Для поддержания приемлемого уровня точности и надежности показаний тепловизионных измерительных приборов необходима их своевременная и профессиональная поверка, первичная и периодическая – раз в год, согласно ГОСТ Р 8.619-2006. Поверка включает внешний осмотр, проверку изоляции, опробование и проверку работы во всех режимах, определение углового разрешения, проверку диапазона и погрешностей измерения температуры, измерение порога температурной чувствительности, нахождение неравномерностей чувствительности по всему полю зрения, проверку сходимости показаний прибора.

В качестве эталонных излучателей для поверки тепловизоров применяются излучатели в виде модели абсолютно чёрного тела (АЧТ) и протяжённые излучатели (размеры которых в десять и более раз превышают элементарное поле зрения тепловизора) [4–10]. Инфракрасные излучатели в виде модели АЧТ разработаны для поверки, настройки и градуировки бесконтактных СИ температуры. Принцип действия инфракрасных излучателей в виде

модели АЧТ основан на законах Стефана–Больцмана и Планка, которые связывают между собой температуру АЧТ, излучательную способность и яркость излучения.

Температура излучающей полости в модели АЧТ устанавливается регулятором температуры. В полость встроен контактный датчик температуры, передающий информацию о текущей температуре на индикатор регулятора. Нагрев излучающей полости происходит с использованием электронагревателя. В некоторых моделях излучателей присутствует возможность охлаждения с помощью циркулирующего теплоносителя в системе охлаждения.

Инфракрасный излучатель в виде модели протяжённого черного тела (ПЧТ) (например, ПЧТ 540/40/100) используется для поверки бесконтактных СИ температуры в диапазоне 30–95 °С, определения минимальной разрешающей способности, а также угла поля зрения и геометрических параметров разрешения тепловизионных приборов с помощью мир (пластинок с крестовыми или штриховыми отверстиями, расположенными на определенном расстоянии).

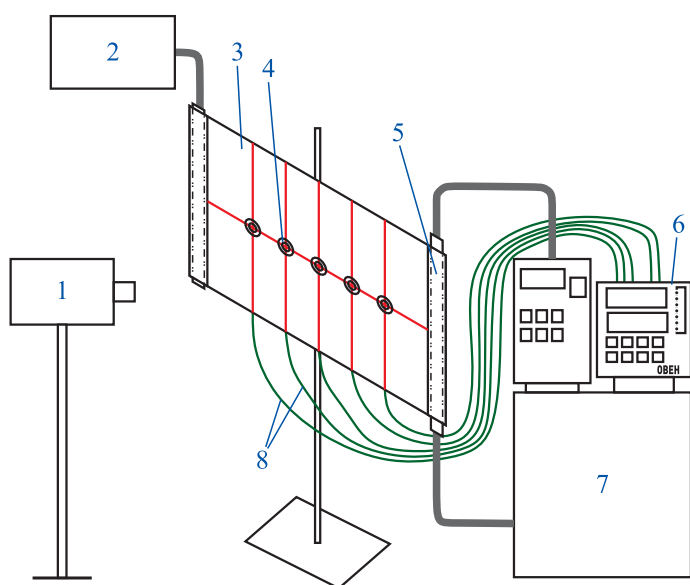


Рис. 1. Схема установки для поверки и градуировки тепловизоров; 1 – тепловизор FLIR SC620; 2 – источник стабилизированного питания Mastech HY3020E; 3 – излучающая поверхность; 4 – шайбы с гальваническим покрытием для точного наведения тепловизора; 5 – трубка квадратного сечения для термостатирования правой кромки; 6 – устройство для измерения и контроля температуры; 7 – жидкостный термостат ТЖ-ТС-01/12; 8 – термопары

Fig. 1. The scheme of experimental set up for thermal imagers verification and calibration:

1 – thermal imager FLIR SC620; 2 – stabilized power supply Mastech HY3020E; 3 – emitting surface; 4 – washers with galvanic coating for precise guidance of the imager; 5 – square tube for thermostating the right edge; 6 – device for measuring and controlling temperature; 7 – liquid thermostat TJ-TS-01/12; 8 – thermocouples

Излучатель ПЧТ 540/40/100 является моделью ПЧТ с излучающей поверхностью в форме квадрата и состоит из протяжённого теплового излучателя, блока управления и мир. Температурный режим излучателя задаётся термостатированным теплоносителем – дистиллированной водой, омывающей обратную сторону излучающей поверхности. В резервуаре с теплоносителем расположен датчик, с помощью которого блок управления поддерживает температуру теплоносителя на заданном уровне. Температура излучающей поверхности определяется эталонным термометром сопротивления.

Существующие излучатели для поверки тепловизоров имеют следующие недостатки: воспроизводится только одно значение температуры, установленное на регуляторе; перенастройка с одного уровня значения температуры на другой занимает достаточно много времени; сложности при создании изотермической поверхности значительных размеров; место расположения датчиков температуры не отмечено.

#### Установка для поверки и градуировки тепловизоров.

В настоящей работе предложен метод поверки портативного матричного измерительного тепловизора FLIR SC620 (Flir Systems, США, Швеция), оснащённого сверхточной высокочувствительной инфракрасной камерой с большим набором функций.

#### Технические характеристики тепловизора FLIR SC620

|                                                                     |                                                |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Тип детектора .....                                                 | матрица 640×480 пикселей в фокальной плоскости |
| Угол обзора .....                                                   | 45°×25°                                        |
| Спектральный диапазон .....                                         | 7,5–13 мкм                                     |
| Температурная чувствительность при 30 °С.....                       | 0,065 °С                                       |
| Цифровое увеличение непрерывное.....                                | (1–2) <sup>х</sup>                             |
| Частота обновления кадров.....                                      | 30 Гц                                          |
| Фокус.....                                                          | ручной и автоматический                        |
| Видеокамера с автофокусировкой.....                                 | 3,2 Мп                                         |
| Цветной (16000 цветов) жидкокристаллический дисплей, диагональ..... | 5,6 дюйма                                      |
| Интервал температур.....                                            | –40...+1500 °С (опция – до +2000 °С)           |
| Погрешность.....                                                    | ±2 % абсолютной температуры (не более ±2 °С)   |
| Рабочий диапазон температур.....                                    | –15...+50 °С                                   |
| Размер камеры.....                                                  | 120×140×220 мм                                 |

Для определения и калибровки основных параметров инфракрасных измерительных приборов авторы настоящей статьи разработали установку, которая содержит прямоугольную пластину-излучатель 3 из сплава АМг-5 [11–13] толщиной  $\delta=4$  мм, источник 2 стабилизированного питания Mastech HY3020E (Mastech, КНР), жидкостный термостат ТЖ-ТС-01/12 (ЛОИП, Россия) 7, устройство 6 для измерения и контроля температуры и тепловизор FLIR SC620 1 (рис. 1). Излучающая поверхность пластины 3 покрыта чёрной порошковой краской с коэффициентом

черноты  $\varepsilon \approx 0,96$ . Задняя стенка излучающей поверхности изолирована от окружающей среды пенопластом, поэтому через неё не рассеивается тепловой поток в окружающую среду. Пластина по всей высоте изотермическая. На одном крае с обратной стороны излучающей пластины по всей высоте закреплён копелевый нагреватель 1 (рис. 2), обеспечивающий равномерное поступление теплового потока на пластину. На противоположном крае по всей высоте пластины закреплена металлическая трубка 3 квадратного сечения, соединённая резиновыми шлангами с жидкостным термостатом ТЖ-ТС-01/12. Через трубку 3 циркулирует нагретая в термостате дистиллированная вода для термостатирования правого торца пластины.

**Методика проведения измерений. Измерение температуры поверхности излучающей пластины с помощью тепловизора.** Температуру излучающей поверхности регулируют изменением температуры жидкости охладителя или мощности нагревателя. Мощность нагревателя изменяют варьированием подаваемого на нагреватель напряжения с помощью стабилизированного источника питания Mastech HY3020E. Тепловой поток рассеивается с поверхности пластины в окружающую среду излучением и свободной конвекцией. Тепловое излучение передаётся от пластины в окружающую среду с помощью лучисто-конвективного механизма теплообмена. На расстоянии 0,45 м от лицевой стороны пластины установлен тепловизор FLIR SC620, который фиксирует излучение пластины и воспроизводит на дисплее её температурное поле в виде термограммы.

**Контактное измерение температуры поверхности излучающей пластины.** На данном этапе температуру пластины измеряют с использованием термопар. На обратной стороне излучающей поверхности пластины с помощью высокотеплопроводного клея закрепляют пять хромель-алюмелевых термопар 2 (см. рис. 2). Рабочие концы термопар находятся вблизи излучающей поверхности, что обеспечивает высокую точность измерений. Показания термопар отображаются на дисплее электронного устройства измерения и контроля температуры. Для точного наведения тепловизора к лицевой части излучающей пластины в качестве маркеров, указывающих на места расположения термопар, прикреплены тонкие металлические шайбы с гальваническим покрытием. Коэффициент черноты гальванического покрытия  $\varepsilon \approx 0,2$ , поэтому на термограмме шайбы всегда будут затемнены.

Результаты показаний тепловизора сравнивают с результатами контактных измерений температур и оценивают расхождение полученных значений.

**Расчёт и выбор параметров конструкции установки.** В ходе разработки установки особое внимание уделяли следующим моментам: обеспечению высокой изотермичности излучающей поверхности по высоте пластины в условиях лучисто-конвективного теплообмена; точности поддержания температуры на заданном уровне; выбору оптимального покрытия с высоким ( $\varepsilon \geq 0,96$ ) коэффициентом

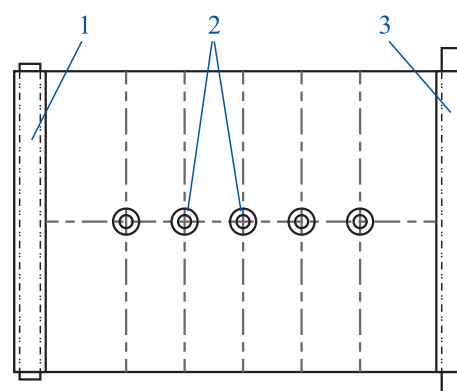


Рис. 2. Схема исследуемой пластины:  
1 – электрический нагреватель; 2 – места контакта термопар с пластиной; 3 – трубка квадратного сечения для термостатирования правой кромки

Fig. 2. The scheme of the plate tested:  
1 – electrical heater; 2 – the contact place of the thermocouples with plate; 3 – square tube for thermostating the right edge

черноты; сокращению времени выхода прибора в стационарный режим по сравнению с другими устройствами для проверки.

Геометрические размеры пластины-излучателя выбирали исходя из разрешающей способности макрообъектива тепловизионной системы, размера матрицы и угла обзора объектива [14, 15]. Рассчитывали поле зрения (field of view) тепловизора, которое соответствует размерам получаемого на экране пространства. С уменьшением угла поля зрения увеличивается максимальное расстояние от тепловизионной системы до исследуемого объекта. Размеры излучающей пластины, представленной на рис. 2, получены на основе результатов проведенного расчёта.

Необходимую мощность  $P$  нагревателя находили из решения дифференциального уравнения теплопроводности для пластины [16, 17]:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{\alpha h}{\lambda A} [T(x) - T_c] = 0, \quad (1)$$

где  $T(x)$  – температура пластины в точке  $x$  на оси  $OX$ ;  $T_c$  – температура среды;  $A$  – площадь поперечного сечения пластины;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\alpha$  – суммарный коэффициент лучисто-конвективной теплоотдачи.

Уравнение (1) решали в общем виде:

$$T(x) - T_c = (T_{\text{охл}} - T_c) \frac{\text{ch}(bx)}{\text{ch}(bl)} + \frac{P}{\lambda Ab} \frac{\text{sh}[b(l-x)]}{\text{ch}(bl)}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{охл}}$  – температура охлаждающей жидкости в термостате;  $b = \sqrt{\alpha h / (\lambda A)}$ .

Из зависимости (2) определяли мощность нагревателя  $P = 18$  Вт. Рассчитывали количество витков  $N_B$  и длину  $l_H$

Таблица 1

Зависимость коэффициентов теплообмена от температуры поверхности пластины

| $T_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_{\text{л}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | $\alpha_{\text{к}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | $\alpha, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 30                               | 6,0                                                    | 3,7                                                    | 9,7                                         |
| 45                               | 6,5                                                    | 4,7                                                    | 11,2                                        |
| 60                               | 6,9                                                    | 5,3                                                    | 12,2                                        |

Таблица 2

Результаты измерений температуры тепловизором  $T_1$  и термодарами  $T_2$  при температурах охлаждающей среды  $T_{\text{охл}} = 30^\circ\text{C}$  и среды  $T_{\text{с}} = 27^\circ\text{C}$

| $x, \text{м}$ | $T_1, ^\circ\text{C}$ | $T_2, ^\circ\text{C}$ | $\Delta T_1, ^\circ\text{C}$ |
|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 0,055         | 41,8                  | 42                    | 0,2                          |
| 0,095         | 40,1                  | 39                    | 1,1                          |
| 0,135         | 38,6                  | 37                    | 1,6                          |
| 0,175         | 37,2                  | 36                    | 1,2                          |
| 0,215         | 36,1                  | 34                    | 2,1                          |

провода (выбранный диаметр  $d = 0,2 \text{ мм}$ ) нагревателя при подаваемом напряжении  $U = 20 \text{ В}$  и мощности  $P = 18 \text{ Вт}$ :  $l_{\text{н}} = 2,6 \text{ м}$ ;  $N_{\text{в}} \approx 12$ . Для термостатирования правого торца пластины применяли жидкостный термостат погружного типа ТЖ-ТС-01/12.

**Расчёт температурного поля пластины.** Принимали следующие допущения:

предложенная установка для калибровки и поверки тепловизоров находится в стационарном режиме;

коэффициент лучисто-конвективной теплоотдачи  $\alpha$  не зависит от координат;

на левой границе пластины соблюдаются граничные условия II рода, в левый торец поступает непрерывный тепловой поток;

на правой границе пластины соблюдаются граничные условия I рода, задана температура правого торца;

на верхней и нижней границах пластины соблюдаются адиабатические условия, рассеивание теплоты с верхней и нижней границы пренебрежимо мало и поэтому не учитывается;

дифференциальное уравнение (1) описывает температурное поле пластины.

Граничные условия:

по левой границе (при  $x = 0$ ) в торец пластины поступает непрерывный тепловой поток и распространяется по её длине:

$$-\lambda A \frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=0} = P;$$

на правой границе (при  $x = l$ ) можно пренебречь потоком, рассеиваемым с торца в окружающую среду, так как он значительно меньше теплового потока от боковой поверхности пластины, и принять температуру торца за температуру термостата:

$$T(x) \Big|_{x=l} = T_{\text{охл}}.$$

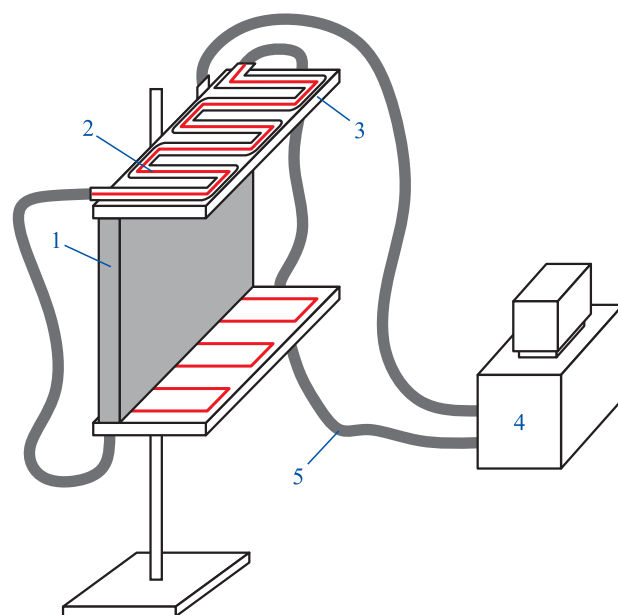


Рис. 3. Схема установки с нагревателями воздуха:

1 – исследуемая пластина; 2 – змеевики; 3 – пластины-нагреватели; 4 – жидкостный термостат; 5 – резиновые шланги

Fig. 3. The scheme of experimental set up with air heaters:

1 – tested plate; 2 – coils; 3 – plates-heaters; 4 – liquid thermostat; 5 – rubber hoses

Суммарный коэффициент теплоотдачи складывается из лучистого  $\alpha_{\text{л}}$  и конвективного  $\alpha_{\text{к}}$  коэффициентов теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}.$$

Лучистую составляющую находили по закону Стефана–Больцмана [18], конвективную составляющую – по законам конвективного теплообмена [19, 20]. Изменение температуры  $T_{\text{пов}}$  поверхности пластины значительно влияет на коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена, как показано в табл. 1.

**Результаты исследований температурного поля пластины.** Решая уравнения (2), определяли температурное поле пластины для контрольных точек  $x$  (табл. 2). В качестве контрольных точек выбирали координаты мест подключений термодар.

При температурах излучающей поверхности пластины, близких к  $50^\circ\text{C}$ , существенную роль играет теплообмен пластины с окружающим воздухом. Поэтому необходимо уменьшать рассеивание тепловых потоков с излучающей поверхности пластины в окружающую среду. Тепловую изоляцию использовать невозможно, так как в этом случае излучающая поверхность не будет попадать в поле зрения тепловизора. В работах [11, 12] предложено обдувать поверхность пластины подогретым воздухом. Для подогревания воздуха две пластины-нагревателя 3 из сплава АМГ-5 прикрепляют к верхнему и нижнему торцам излучающей пластины 1 (рис. 3). На поверхностях пластин-нагревателей устанавливают металлические

теплообменники-змеевики 2, присоединённые резиновыми шлангами 5 к жидкостному термостату ТЖ-ТС-01/12 4. Через шланги циркулирует дистиллированная вода, которая протекает и в канале охлаждения излучающей поверхности. Одна пластина подогревает воздух, обтекающий излучающую поверхность, а другая пластина препятствует распространению теплоты излучением в окружающую среду. Воздух является диатермической средой (не поглощает и не излучает электромагнитное излучение), поэтому температура окружающего пластину воздуха не оказывает влияния на излучающие свойства пластины и не перекрывает обзор тепловизору. Поэтому при повышенной температуре окружающего воздуха градиент температуры на излучающей пластине будет практически постоянным.

**Рекомендации относительно выбора размеров пластин-нагревателей.** При выборе оптимальной ширины пластин необходимо учитывать, что между излучающей и нагревающей воздух пластинами происходит лучистый теплообмен. При этом принимаются допущения: тела непрозрачны и имеют изотермические поверхности; среда между телами прозрачна для излучения; вся лучистая энергия, поглощаемая телами, переходит в тепловую энергию; коэффициенты поглощения и черноты не зависят от температуры; процессы стационарны. Таким образом, с увеличением влияния пластин-нагревателей на излучающую поверхность, уменьшается влияние окружающей среды. Для данной задачи удовлетворительный суммарный коэффициент облучённости должен быть не менее 0,5, что уменьшит влияние окружающей среды приблизительно в пять раз. Соответственно для одной пластины-нагревателя этот коэффициент составит не менее 0,25.

**Расчёт температурного поля пластины для условий, когда температура охлаждающей жидкости в термостате равна температуре окружающей среды.** Результаты решения уравнения (2) для контрольных точек  $x$  – мест подключений термопар при температуре окружающей среды  $T_c$ , близкой к температуре на правом торце  $T_{охл}$ , представлены в табл. 3.

На рис. 4 показано распределение температуры по длине пластины при температурах охладителя  $T_{охл} = 30, 45, 60$  °C. Вследствие подогрева обтекающего излучающую поверхность пластины воздуха, градиент температурного поля пластины выравнивается, и температурная зависимость имеет практически линейное распределение.

**Закключение.** Предложенный в данной работе метод поверки и градуировки тепловизоров можно использовать для установления погрешности измерения температурного поля,

Таблица 3  
Температурные поля  $T_{пов}$ , °C, пластины

| $x$ , м | $T_{охл}$ , °C |      |      |
|---------|----------------|------|------|
|         | 30             | 45   | 60   |
| 0,055   | 54,8           | 68,7 | 82,7 |
| 0,095   | 49,5           | 63,6 | 77,6 |
| 0,135   | 44,9           | 59,1 | 73,3 |
| 0,175   | 40,7           | 55,1 | 69,5 |
| 0,215   | 37,0           | 51,6 | 66,2 |

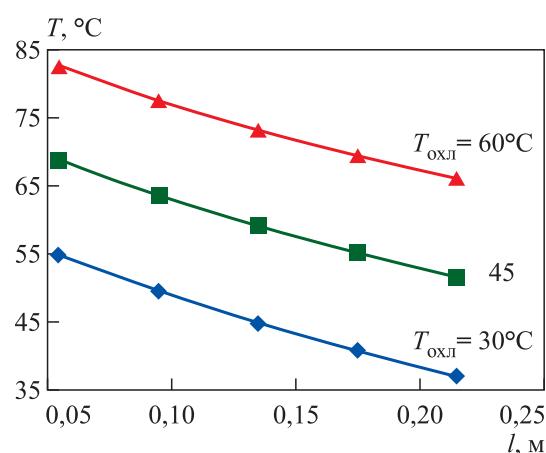


Рис. 4. Распределение температуры по длине пластины при температурах охладителя  $T_{охл} = 30, 45, 60$  °C

Fig. 4. Temperature distribution throughout the plate length at cooler temperatures 30, 45, 60 °C

определения характеристик тепловизоров и инфракрасных пирометров. Метод и установка для поверки и градуировки тепловизоров позволяют проверить характеристики тепловизора по следующим параметрам: погрешность измерения температуры в диапазоне температур поверхности 20–90 °C по сравнению с действительным значением, измеренным термоэлектрическими термометрами; определить количество и расположение неисправных пикселей матрицы тепловизора; сократить время перенастройки установки на другой диапазон температур.

#### Список литературы

1. Гоголинский К. В., Сильд Ю. А. Метрологическое обеспечение средств теплового неразрушающего контроля: измерительных тепловизоров и пирометров // В мире неразрушающего контроля. 2017. № 1 (20). С. 21–25.
2. Волков С. П., Никоненко В. А. Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры // Контроль. Диагностика. 2007. № 8. С. 63–70.
3. Сильд Ю. А., Иванова М. А., Никоненко В. А. Разработка системы метрологического обеспечения измерительных тепловизионных приборов // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 48–51.
4. Сильд Ю. А., Матвеев М. С., Походун А. И., Визулайнен Е. В. Исследование нового излучателя ВНИИМ для метрологического обеспечения радиационной термометрии // Приборы. 2008. № 10 (100). С. 46–52.
5. Шарганов К. А., Сильд Ю. А., Визулайнен Е. В. Метод воспроизведения, хранения и передачи единицы температуры неконтактным способом // Вестник Метролога. 2017. № 2. С. 19–22.
6. Grgić G., Pušnik I., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, no. 1–2, pp. 237–247. DOI: 10.1007/s10765-011-0932-z

7. Vendt R., Jaanson P., et al., *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2009, pp. 729902-5. DOI: 10.1117/12.818423

8. Miklavac A., Pušnik I., Batagelj V., Drnovšek J., *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 025001. DOI: 10.1088/0957-0233/24/2/025001

9. Hartmann J., Hollandt J., et al., *Experimental methods in the physical sciences*, 2009, vol. 42, no. C, pp. 241–295. DOI: 10.1016/S1079-4042(09)04206-4

10. Lagüela S., Gonzalez H. et al., *Infrared Physics & Technology*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.01.002

11. Кораблев В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В. Обеспечение изотермических условий на излучателе устройства для калибровки тепловизоров // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2014. № 3 (11). С. 42–50.

12. Кораблев В. А., Шарков А. В., Минкин Д. А. Методы выравнивания температурного поля вертикальной теплоотдающей пластины // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 2 (18). С. 42–46.

13. Кораблев В. А., Шарков А. В., Минкин Д. А. Метод формирования равномерного температурного поля охлаждаемой поверхности в условиях принудительного движения теплоносителя // Проблемы управления рисками в техносфере. 2015. № 4(36). С. 43–49.

14. Мошаров В. Е., Радченко В. Н., Сенюев И. В. Измерение тепловых потоков с помощью тепловизора // Материалы XXIX Научно-технической конференции по аэродинамике, Жуковский, 1–2 марта 2018. Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, 2018. С. 161.

15. Госсорж Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с фр. Н. В. Васильченко / Под ред. Л. Н. Курбатова. М.: Мир, 1988. 399 с.

16. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепло-массообмена, Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. 93 с.

17. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи, М.: ИД «БАСТЕТ», 2010 г. 344 с.

18. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

19. Мартыненко О. Г., Соковishин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен на вертикальной поверхности. Граничные условия II рода. М.: Наука и техника, 1977, 216 с.

20. Schaub M., Kriegel M., Brandt. S., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 1186–1198. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.089

## References

1. Gogolinskij K. V., Sil'd Yu. A., *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2017, no. 1 (20), pp. 21–25 (in Russian).

2. Volkov S. P., Nikonenko V. A., *Kontrol'. Diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 63–70 (in Russian).

3. Sil'd Yu. A., Ivanova M. A., Nikonenko V. A., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 4, pp. 389–392. DOI: 10.1023/B:METE.0000033697.57678.4f

4. Sil'd Yu. A., Matveev M. S., Pohodun A. I., Vizulajnen E. V., *Instruments*, 2008, no. 10 (100), pp. 46–52.

5. Sharganov K. A., Sil'd Yu. A., Vizulajnen E. V., *Vestnik Metrologa*, 2017, no. 2, pp. 19–22 (in Russian).

6. Grgić G., Pušnik I., *International Journal of Thermophysics*, 2011, vol. 32, no. 1–2, pp. 237–247. DOI: 10.1007/s10765-011-0932-z

7. Vendt R., Jaanson P., et al., *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2009, pp. 729902-5. DOI: 10.1117/12.818423

8. Miklavac A., Pušnik I., Batagelj V., Drnovšek J., *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 2, p. 025001. DOI: 10.1088/0957-0233/24/2/025001

9. Hartmann J., Hollandt J., et al., *Experimental methods in the physical sciences*, 2009, vol. 42, no. C, pp. 241–295. DOI: 10.1016/S1079-4042(09)04206-4

10. Lagüela S., Gonzalez H. et al., *Infrared Physics & Technology*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.infrared.2011.01.002

11. Korablev V. A., Minkin D. A., Sharkov A. V., *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)*, 2014, no. 3 (11), pp. 42–50 (in Russian).

12. Korablev V. A., Sharkov A. V., Minkin D. A., *Prirodnye i Tekhnogennye riski (fiziko – matematicheskie i prikladnye aspekty)*, 2016, no. 2 (18), pp. 42–46 (in Russian).

13. Korablev V. A., Sharkov A. V., Minkin D. A., *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*, 2015, no. 4 (36), pp. 43–49 (in Russian).

14. Mosharov V. E., Radchenko V. N., Senyuev I. V., *Proceedings of the XXIX Scientific And Technical conference of Aerodynamics*, Zhukovsky, Moscow region, March 1–2, 2018, Zhukovsky, Central Aerohydrodynamic Institute Publ., 2018, p. 161.

15. Gilbert Gaussorgues, *La Thermographie Infrarouge. Principes – Technologie – Applications*, Paris, 1984.

16. Dul'nev G. N., Tihonov S. V., *Osnovy teorii teplo-massobmena*, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies Mechanics and Optics Publ., 2010, 93 p. (in Russian).

17. Miheev M. A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi*, Moscow, Izdatel'skij dom "BASTET" Publ., 2010, 344 p. (in Russian).

18. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S., *Teploperedacha*, Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 416 p. (in Russian).

19. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A., *Svobodno-konvektivnyj teploobmen na vertikal'noj poverhnosti. Granichnye usloviya II roda*, Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 1977, 216 p. (in Russian).

20. Schaub M., Kriegel M., Brandt. S., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 1186–1198. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.089

Дата поступления: 27.12.2019.

Дата принятия: 03.03.2020.

## Improvement of methods and means of thermal imagers verification and calibration

Victoria V. Gerasyutenko<sup>1</sup>, Alexander V. Sharkov<sup>1</sup>, Vladimir A. Korablev<sup>1</sup>, Dmitry A. Minkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru, avsharkov@corp.ifmo.ru, kvant1953@gmail.com

<sup>2</sup>St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: mindim-spb@mail.ru

*This paper suggests the verification and calibration method of thermal imagers that consists in comparison of temperature readings obtained by contact and thermal imaging method. The experimental setup has been developed to confirm the reliability of the proposed method. The main element of experimental setup is an emitting surface in the form of rectangular plate that measures 330×200×4 mm. The plate is covered with paint which emissivity factor is not less than 0,96. The paper presents the results of temperature field calculations on the plate emitting surface. The temperature field of the plate emitting surface has been determined by the contact method using chromel-alumel thermocouples and thermal imaging method. As a result of the obtained temperature values analysis, it has been concluded that if the plate emitting surface temperatures close to 50 °C, the heat exchange of the plate with the ambient air plays a significant role. The air heaters are applied in order to reduce the heat flows dissipation from the plate emitting surface into the environment. The heaters are two aluminum-magnesium alloy plates attached to the end face of the emitting surface. The metal heat exchangers – coils are installed on the surfaces of the plates and connected by hoses to the liquid thermostat. One of the plates heats the air flowing around the emitting surface, and another one prevents the emission thermal expansion into the environment. As a result of heaters application, the heat exchange intensity of a plate radiating surface with environment decreases. Moreover, recommendations about the choice of heaters sizes have been given. The main advantages of the method proposed are the following: ensuring high isothermic of the emitting surface throughout the height of the plate; accuracy of the temperature maintaining at a given level; reducing the device transition time to steady-state regime.*

**Key words:** thermal imager, verification and calibration method, temperature field, emitting surface, heat exchange, thermal imager field of view, heater.

## Оптимизация времени выхода термостатов хроматографа на заданную температуру

Н. О. Вздудева<sup>1</sup>, В. Б. Гитлин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ижевский электромеханический завод «Купол», Ижевск, Российская Федерация, e-mail: sizovan@list.ru

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: vbg\_istu@mail.ru

*Рассмотрены проблемы обеспечения стабильности температуры хроматографического эксперимента, проводимого с использованием серийного газового хроматографа ЛГХ-3000. Ограничение допустимой скорости нагрева термостатов хроматографа не позволяет выполнять быстрый переход к новым условиям хроматографического эксперимента в соответствии с требованиями технических условий. Проанализированы процессы нагрева–охлаждения термостата. Показано, что отношение длительности интервала, равного сумме длительностей интервалов нагрева и охлаждения, к длительности интервала нагрева обратно пропорционально температуре хроматографического эксперимента. Исходя из этого положения предложен эмпирический алгоритм нагрева термостата до заданной температуры, позволивший уменьшить время выхода на заданную температуру во всём диапазоне рабочих температур.*

**Ключевые слова:** хроматограф, система стабилизации температуры термостата, время выхода на заданную температуру.

**Введение.** Хроматография, в частности газовая хроматография, – это метод разделения смесей веществ или частиц. Метод основан на различии скоростей перемещения смесей веществ или частиц в системе несмешивающихся и движущихся относительно друг друга фаз. Ни один аналитический метод не может конкурировать с хроматографией по универсальности применения и эффективности разделения самых сложных многокомпонентных смесей (ГОСТ 17567-81 «Хроматография газовая. Термины и определения») [1–5]. Отмеченные особенности хроматографии обусловили широкое её применение как в лабораторных условиях, так и в условиях промышленного производства (ГОСТ 17567-81) [5–8]. В настоящее время интенсивно развиваются отдельные разделы хроматографии – масс-спектрометрия и препаративная газовая хроматография, а также увеличивается ассортимент хроматографического оборудования [7, 8].

Широко применяемый в хроматографических измерениях газовый хроматограф состоит из нескольких элементов: термостатов испарителей, где проба исследуемого вещества переходит в газообразное состояние; термостатов колонок, где происходит хроматографическое разделение пробы на компоненты за счёт различия скоростей перемещения газообразной смеси веществ или частиц через сорбент; термостатов детектора, где регистрируются разделённые компоненты.

К газовым хроматографам, в частности к хроматографу ЛГХ-3000 (<http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki/>),

предъявляют следующие требования. Первое – широкий диапазон рабочих температур 35–450 °С; второе – стабильность температуры хроматографического эксперимента: 0,1 °С – для температуры термостата колонок, 0,5 °С – для температуры термостатов детекторов и 1,0 °С – для температуры термостатов испарителей независимо от значения температуры эксперимента; третье – время выхода термостатов хроматографа на рабочий режим – время установки хроматографа в рабочее состояние начала эксперимента – менее 10 мин [3, 4, 8].

В серийном хроматографе ЛГХ-3000 указанные требования обеспечиваются применением нелинейной системы автоматического регулирования (САР), содержащей микропроцессор. В режиме стабилизации работа САР будет устойчивой только при соблюдении определённых ограничений допустимой скорости изменения температуры термостата [9]. Ограничения скорости изменения температуры термостата существенно увеличивают время выхода термостата хроматографа из выключенного состояния на заданную температуру. Таким образом, первое и второе требования противоречат третьему требованию.

**Структура системы управления.** В промышленно изготавливаемом хроматографе ЛГХ-3000 [10] для обеспечения первого и второго требований установлена система стабилизации температуры хроматографического эксперимента, которая относится к САР температуры. Схема стабилизации температуры приведена на рис. 1, где  $t_{уст}$  – температура уставки, определяемая требуемой температурой

нагрева термостата при выполнении хроматографического эксперимента;  $\gamma$  – управляющее воздействие. Блоки анализа и управления системы стабилизации выполнены на процессорной плате VSX-6154 (Vortex86SX300, DMP Electronics, Тайвань). Температуры измеряют платиновыми термометрами сопротивления ТСП 100 П согласно ГОСТ Р 8.625-2006 «ГСИ. Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний».

В работах [11], [12] предложен алгоритм управления САР хроматографа ЛГХ-3000, применение которого существенно увеличило чувствительность хроматографа, упростило процедуру проектирования указанной САР. При этом соблюдались требования к стабильности работы САР во всём диапазоне рабочих температур, однако возникли проблемы с минимизацией времени выхода САР на режим стабилизации при смене условий эксперимента.

Цель настоящей работы – минимизировать время выхода САР на режим стабилизации во всём диапазоне рабочих температур хроматографа.

**Теоретическая часть.** При исследовании системы стабилизации температуры хроматографа ЛГХ-3000 установлено, что его конструктивные и электрические параметры нелинейно зависят от температуры  $t_{уст}$  хроматографического эксперимента, конструктивных особенностей хроматографа и параметров окружающей среды [11, 12]. Система стабилизации температуры (см. рис. 1) также оказывается нелинейной.

В работах [13, 14] в качестве системы стабилизации температуры термостатов предложено использовать систему релейного типа с пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулированием. Управляющее воздействие  $\gamma$  в данной системе определяется отношением суммарной длительности  $\Delta\tau_n + \Delta\tau_o$  цикла нагрев–охлаждение термостата к длительности  $\Delta\tau_n$  интервала нагрева (скважности) [11, 12]:

$$\gamma = (\Delta\tau_n + \Delta\tau_o) / \Delta\tau_n. \quad (1)$$

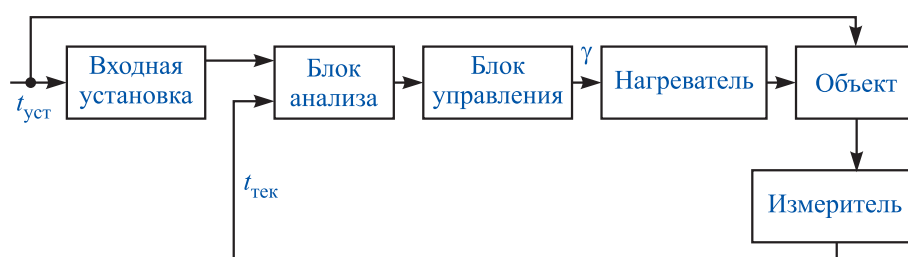


Рис. 1. Структура системы стабилизации температуры термостатов хроматографа ЛГХ-3000

Fig. 1. Structure of the temperature stabilization system of thermostats of the LGH-3000 chromatograph

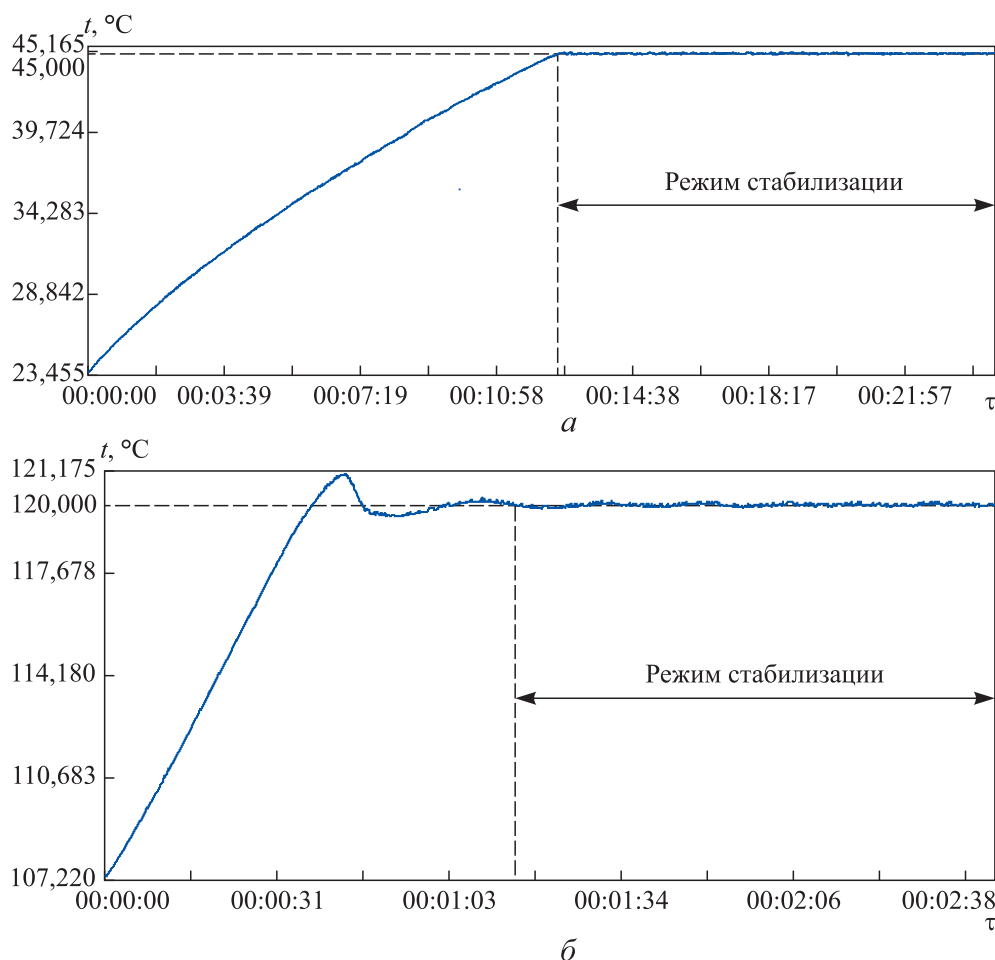


Рис. 2. Установление температур 45 °С (а) и 120 °С (б) для термостата колонок; 00:00:00 – время начала эксперимента

Fig. 2. Temperature setting 45 °C (a) and 120 °C (b) for column thermostat for column thermostat; 00:00:00 – start time of the experiment

К достоинствам параметра  $\gamma$  как управляющего воздействия можно отнести его безразмерность и ограниченный диапазон изменения обратной величины  $\gamma^{-1}$ .

Интервал  $\Delta\tau_o$  выбирается так, чтобы количество теплоты  $Q_n$ , поступающее в термостат за время  $\Delta\tau_n$  в режиме

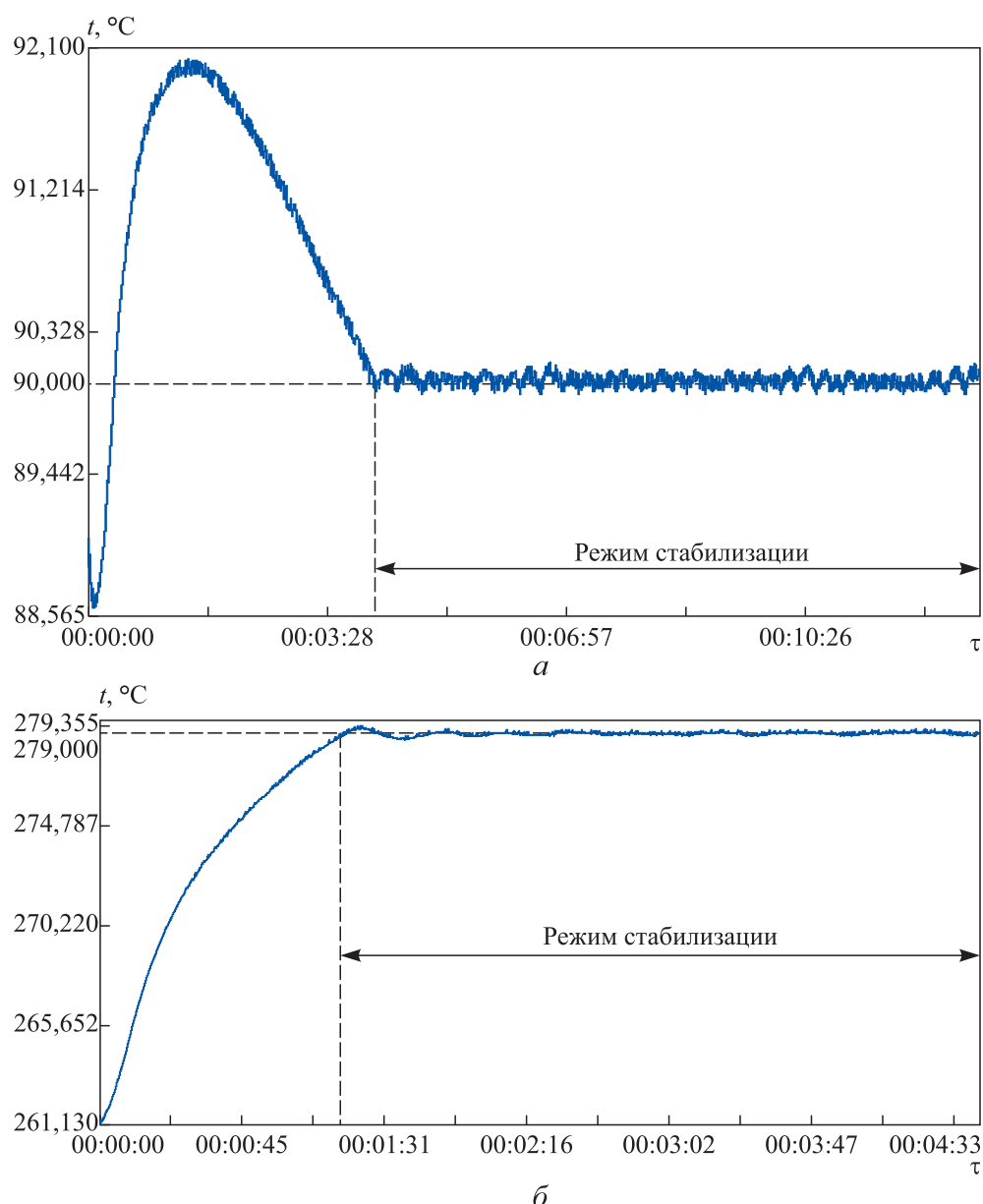


Рис. 3. Установление температуры 90 °C (а) и 279 °C (б) для термостата детектора; 00:00:00 – время начала эксперимента

Fig. 3. Temperature setting 90 °C (a) and 279 °C (б) for detector thermostat; 00:00:00 – start time of the experiment

стабилизации, было равно количеству теплоты  $Q_o$ , теряемому термостатом за время охлаждения. В описываемой системе  $\Delta t_n = \text{const}$ , а значение скважности  $\gamma$  определяется интервалом охлаждения  $\Delta t_o$ .

Количество теплоты, передаваемое от нагревателя в термостат за время нагрева, а соответственно, и скорость нагрева термостата при температуре уставки  $t_{уст}$  выражается в виде

$$Q_n = K_n(t_{уст} \Delta t_n), \quad (2)$$

где  $K_n$  – коэффициент, определяемый параметрами нагревателя.

Количество теплоты, теряемое термостатом за время охлаждения, зависит от скорости охлаждения термостата и увеличивается совместно с температурой уставки.

Ограничения скорости нагрева термостата, обусловленные условием устойчивости САР в режиме стабилизации, существенно увеличивают время выхода термостата на заданную температуру уставки. Пример такого переходного процесса (выход на температуру  $t_{уст} = 45$  °C) при соблюдении ограничений на скорость нагрева до этого значения показан на рис. 2, а. В этом эксперименте САР вышла на режим стабилизации через 12 мин после включения. Момент перехода от режима нагрева к режиму стабилизации определяется значением  $\gamma_{min}$ , при котором устанавливается равенство между количествами теплоты, передаваемыми в термостат в режиме нагрева и количеством теплоты, теряемым за время охлаждения при заданном значении  $t_{уст}$  в режиме стабилизации и при условии  $\gamma_{max} < \gamma_{max\_доп}$ , где  $\gamma_{max\_доп}$  определяется параметрами системы стабилизации [11, 12].

Для уменьшения времени выхода термостата на рабочий режим в работах [15, 16] рекомендовано отключать обратную связь системы стабилизации и уменьшать мощность нагревателя в импульсном режиме вплоть до полного отключения

нагревателя при приближении текущей температуры термостата  $t_{тек}$  к температуре уставки.

На рис. 3, а показан результат эксперимента, когда нагреватель на этапе перехода в рабочий режим, был включён непрерывно при постоянной мощности, соответствующей начальной мощности, и отключался при достижении термостатом колонок температуры уставки  $t_{уст} = 90$  °C. Ограничения скорости изменения температуры термостата отсутствовали. Как и ожидалось, произошёл большой перегрев системы и для снижения температуры термостата до требуемого значения  $t_{уст}$  потребовалось определённое время.

Тем не менее, время выхода на рабочий режим снизилось до 3,5 мин. Одновременно отмена ограничений скорости изменения температуры привела к увеличению пульсаций выходного сигнала хроматографа в режиме стабилизации, превысивших допустимое значение  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 3, а). Такой существенный перегрев термостата на этапе перехода в рабочий режим нежелателен по следующим причинам. Во-первых, допустимое значение перегрева ограничено техническими условиями эксплуатации хроматографа. Во-вторых, понижение температуры термостата после перегрева до уровня  $t_{\text{уст}}$  происходит в течение некоторого времени, что увеличивает общее время выхода термостата на рабочий режим.

В момент включения термостата при постоянном режиме нагрева охлаждение термостата отсутствует, т. е.  $\Delta\tau_0=0$ , а скважность  $\gamma_0=\gamma=1$ , где  $\gamma$  определяется формулой (1). С увеличением температуры  $\Delta\tau_0$  скважность  $\gamma$  увеличивается и в пределе может стать бесконечно большой. Соответственно, обратная величина  $\gamma^{-1}$  будет изменяться в диапазоне от единицы до нуля.

Для минимизации времени перехода в рабочий режим и уменьшения уровня перегрева термостата желательно снижать мощность нагревателя так, чтобы в момент нагрева термостата до температуры  $t_{\text{уст}}$  количество теплоты  $Q(t_{\text{уст}})$ , передаваемое в термостат нагревателем в непрерывном режиме работы с учётом инерционности его распространения, соответствовало бы количеству теплоты, передаваемому в термостат в течение цикла нагрев–охлаждение в режиме стабилизации. В соответствии с формулами (1), (2) это значение мощности может быть определено как [11, 12]:

$$Q(t_{\text{уст}}) = [K_{\text{H}}(t_{\text{уст}} \Delta\tau_{\text{H}})] / \gamma_{\text{min}}(t_{\text{уст}}), \quad (3)$$

где  $\gamma_{\text{min}}(t_{\text{уст}}) > \gamma_0 = 1$  – минимальное значение скважности, обеспечивающее требуемый режим работы системы стабилизации на уровне температуры уставки.

Минимизировать время нагрева термостата путём снижения мощности нагревателя на этапе перехода в рабочий режим до минимального значения скважности  $\gamma_{\text{min}}(t_{\text{уст}})$  можно методами вариационного исчисления, если линейна исследуемая система с постоянными параметрами. Нелинейные зависимости параметров термостата от температуры уставки не позволяют решить эту задачу аналитически.

В работе [12] показано, что в случае представления термостата в виде чёрного ящика с обобщенной теплоёмкостью  $C$ , температурным коэффициентом  $\alpha$  теплоотдачи и площадью  $S$  поверхности охлаждения, значение скважности  $\gamma$  как функции  $t_{\text{уст}}$  зависит только от параметров нагревателя  $K_{\text{H}}$  и скорости снижения  $v(\tau)$  температуры  $t_{\tau}$  термостата вблизи температуры  $t_{\text{уст}}$  в режиме свободного охлаждения ( $\tau$  имеет размерность времени и находится в диапазоне  $[0; \Delta\tau_{\text{охл}}]$ ). В этих условиях скважность  $\gamma_{\text{min}}$  связана со скоростью  $v(\tau)$  охлаждения экспоненциальной зависимостью вида

$$\gamma_{\text{min}} = A + B e^{-Dv(\tau)}, \quad (4)$$

где  $A, B, D$  – параметры нагревателя термостата.

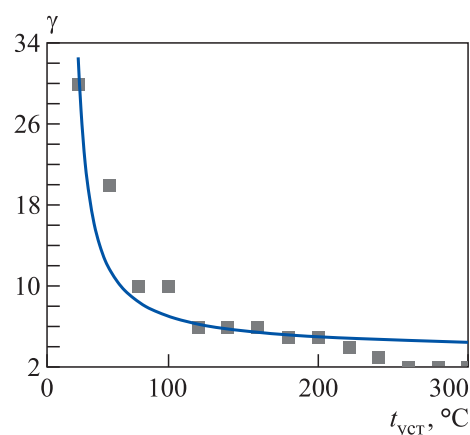


Рис. 4. Зависимость скважности  $\gamma$  от температуры уставки

Fig. 4. Duty cycle versus set temperature

При этом скорость  $v(\tau)$  охлаждения линейно зависит от температуры термостата [12]:

$$v(\tau) = K[t_{\tau}(\tau) - t_c], \quad (5)$$

где  $t_c$  – температура окружающей среды,  $t_0 \geq t_{\tau} \geq t_c$ ,  $t_0$  – температура термостата в начале режима охлаждения;  $K = \alpha S / C$ .

Из формул (4), (5) следует, что с увеличением температуры  $t_{\tau}$  значение  $\gamma_{\text{min}}$  должно уменьшаться обратно пропорционально значению температуры. На рис. 4 показана экспериментально полученная зависимость  $\gamma_{\text{min}}(t_{\text{уст}})$  для термостата колонок хроматографа ЛГХ-3000. Кривая имеет вид гиперболы и аппроксимируется по формуле

$$\gamma_{\text{min}} = 3,62 + 232,34 / (t_{\text{уст}} - 31,97), \quad (6)$$

что соответствует теоретическим положениям, сделанным выше.

Таким образом, в режиме перехода в рабочий режим порог переключения нагревателя на пониженную мощность с увеличением температуры  $t_{\text{уст}}$  должен снижаться обратно пропорционально  $t_{\tau}$ . С увеличением разности  $(t_{\text{уст}} - t_c)$  для достижения необходимого значения  $t_{\tau}$  за меньшее время необходимо увеличивать начальную скорость повышения температуры термостата, увеличивая начальную мощность его нагревателя.

**Алгоритм переключения мощности нагревателя в режиме установки рабочего режима.** С учётом установленных зависимостей начальной мощности нагревателя термостата (3) и скважности (6) от температуры уставки разработан алгоритм переключения мощности нагревателя в режиме установки рабочего режима как функции текущего значения температуры термостата:

$t_{\text{уст}} - t_{\text{тек}} \geq 20 \cdot 200 / t_{\text{уст}}$  – полная мощность;

$20 \cdot 200 / t_{\text{уст}} \geq t_{\text{уст}} - t_{\text{тек}} \geq 200 / t_{\text{уст}}$  – половинная мощность;

$t_{\text{уст}} - t_{\text{тек}} \leq 200 / t_{\text{уст}}$  – отключение импульсного режима управления.

Полученные экспериментальные результаты для термостатов колонок и детектора представлены на рис. 2, б и 3, б соответственно. Время выхода на режим составило 1,15 мин для термостата колонок при нагреве от 100 до 120 °С и 1,4 мин для термостата детектора при нагреве от 260 до 280 °С при общем допустимом времени 10 мин перехода хроматографа на новый режим работы согласно техническому заданию на хроматограф ЛГХ-3000.

**Заключение.** Предложены способы сокращения времени выхода термостатов хроматографа на заданную температуру при смене режима работы термостата. Найденные зависимости отношения длительности интервала нагрева термостата к сумме длительностей интервалов нагрева и охлаждения, а также зависимость начальной мощности нагрева термостата от температуры уставки, позволили разработать алгоритм выхода термостатов на рабочий режим. Применение данного алгоритма позволило существенно уменьшить время выхода термостатов хроматографа на рабочий режим. Нагрев термостатов колонок до произвольной температуры нагрева происходит плавно при возможных небольших перегревах колонок. При использовании разработанного алгоритма для других термостатов хроматографа перегревов практически не возникало в связи с тем, что их объёмы и, соответственно, инерционность меньше, чем у термостатов колонок.

#### Список литературы

1. Kuvshinova S. A., Burmistrov V. A., Novikov I. V., Alexandriysky V. V., Koifman O. I., *Journal of Chromatography & Separation Techniques*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 314–321. DOI: 10.4172/2157-764.1000314
2. Pinkerton D. K., Parson B. A., Synovec R. E., *Journal of Chromatography A*, 2016, vol. 1476, pp. 114–123. DOI: 10.1016/j.chroma.2016.11.015
3. Айвазов Б. В. Введение в хроматографию. М.: Высшая школа, 1983. 236 с.
4. Винарский В. А. Хроматография: Курс лекций в двух частях: Ч. 1. Газовая хроматография. Минск: Издательство Белорусского государственного университета, 2002. 192 с.
5. Царев Н. И., Царев В. И., Катраков И. Б. Практическая газовая хроматография: Учебно-методическое пособие для студентов химического факультета по спецкурсу «Газохроматографические методы анализа». Барнаул: Издательство Алтайского государственного университета, 2000. 156 с.
6. Балакина М. Г. Точная хроматография – и ничего лишнего // Аналитика. 2018. Т. 8. № 1 (38). С. 18–21. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.38.1.18.21
7. Hua-Li Zuo, Feng-Qing Yang, Wei-Hua Huang and Zhi-Ning Xia, *Journal of chromatographic science*, 2013, pp. 1–12. DOI: 10.1093/chromsci/bmt040
8. Пахомов А. Л. Компания «Хромос» на выставке «Аналитика Экспо-2018» // Аналитика. 2018. Т. 8. № 3 (40). С. 230–235. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.40.3.230.241

9. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е переработанное и дополненное. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.

10. Пат. № 2476874 РФ / Морозов В. А., Скурихин С. А., Старикова Л. М., Сизова Н. О. // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 6.

11. Вздудева Н. О., Гитлин В. Б. Поддержание температурного режима колонок хроматографа путём изменения скважности управляющих импульсов // Вестник ИжГТУ. 2012. № 3. С. 111–113.

12. Вздудева Н. О., Гитлин В. Б. Система регулирования температуры термостатов хроматографа // Автоматизация и современные технологии. 2016. № 6. С. 3–9.

13. Егоров В. И., Кораблев В. А., Шарков А. В. Системы термостатирования. Методические указания к лабораторным работам. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 51 с.

14. Волков В. В. Моделирование и экспериментальная отработка системы терморегулирования калибровочного источника излучения на базе ПИД-регулятора // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 4. С. 101–107. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-101-107

15. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74.

16. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. 2007, № 1. С. 78–88.

#### References

1. Kuvshinova S. A., Burmistrov V. A., Novikov I. V., Alexandriysky V. V., Koifman O. I., *Journal of Chromatography & Separation Techniques*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 314–321. DOI: 10.4172/2157-764.1000314
2. Pinkerton D. K., Parson B. A., Synovec R. E., *Journal of Chromatography A*, 2016, vol. 1476, pp. 114–123. DOI: 10.1016/j.chroma.2016.11.015
3. Aivazov B. V., *Vvedeniye v khromatografiyu*, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983, 236 p. (in Russian).
4. Vinarskiy V. A., *Khromatografiya: kurs lektsiy v dvukh chastyakh. Chast' 1. Gazovaya khromatografiya*, Minsk, BGU Publ, 2002. 192 p. (in Russian).
5. Tsarev N. I., Tsarev V. I., Katrakov I. B., *Prakticheskaya gazovaya khromatografiya: uchebno-metodicheskoye posobiye dlya studentov khimicheskogo fakul'teta po spetskursu "Gazokhromatograficheskiye metody analiza"*, Barnaul, Altayskiy universitet Publ., 2000. 156 p. (in Russian).
6. Balakina M. G., *Analitika*, 2018, vol. 8, no. 1 (38), pp. 18–21. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.38.1.18.21
7. Hua-Li Zuo, Feng-Qing Yang, Wei-Hua Huang and Zhi-Ning Xia, *Journal of chromatographic science*, 2013, pp. 1–12. DOI: 10.1093/chromsci/bmt040
8. Pakhomov A. L., *Analitika*, 2018, vol. 8, no. 3 (40), pp. 230–235. DOI: 10.22184/2227-572X.2018.40.3.230.241
9. Besekersky V. A., Popov E. P., *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya*, 4 ed., Saint Petersburgs, Professiya Publ., 2003, 752 p. (in Russian).

10. Morozov V. A., Skurikhin S. A., Starikova L. M., Sizova N. O., RF Patent no. 2476874, *Byull. Izobret.*, no. 6 (2013).
  11. Vzduleva N. O., Gitlin V. B., *Vestnik IzhGTU*, 2012, no. 3, pp. 111–113 (in Russian).
  12. Vzduleva N. O., Gitlin V. B., *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*, 2016, no. 6, pp. 3–9 (in Russian).
  13. Yegorov V. I., Korablev V. A., Sharkov A. V., *Sistemy termostatirovaniya. Metodicheskiye ukazaniya k laboratornym rabotam*, Saint Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2006, 51 p. (in Russian).
  14. Volkov V. V., *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 101–107. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-4-101-107
  15. Denisenko V. V., *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*, 2006, no. 4, pp. 66–74 (in Russian).
  16. Denisenko V. V., *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii*, 2007, no. 1, pp. 78–88 (in Russian).
- Дата поступления: 04.12.2019.  
Дата принятия: 14.01.2020.

## Optimization of the time the chromatograph thermostats exit to a given temperature

Nadezhda O. Vzduleva<sup>1</sup>, Valery B. Gitlin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Izhevsk electromechanical plant Kupol, JSC, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: sizovan@list.ru,

<sup>2</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: vbg\_istu@mail.ru

The problems of ensuring the stability of the temperature of the chromatographic experiment carried out using a serial gas chromatograph LGH-3000 are considered. Limiting the permissible heating rate of the chromatograph thermostats does not allow a quick transition to the new conditions of the chromatographic experiment in accordance with the requirements of the technical conditions. The processes of heating and cooling the thermostat are analyzed. It is shown that the ratio of the duration of the interval equal to the sum of the durations of the heating and cooling intervals to the duration of the heating interval is inversely proportional to the temperature of the chromatographic experiment. Based on this situation, an empirical algorithm is proposed for heating the thermostat to a given temperature, which made it possible to reduce the time it takes to reach a given temperature in the entire range of operating temperatures.

**Key words:** chromatograph, thermostat temperature stabilization system, time to reach the set temperature.

## Анализ зависимости магнитных свойств гранулированных ферромагнитных образцов от соотношения их длины к диаметру

А. В. Сандуляк<sup>1</sup>, Р. Ю. Ткаченко<sup>1</sup>, Д. А. Сандуляк<sup>1</sup>, М. Н. Полисмакова<sup>1</sup>,  
А. А. Сандуляк<sup>1</sup>, В. А. Ершова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация,  
e-mail: a.sandulyak@mail.ru, separator-mami@mail.ru, d.sandulyak@mail.ru, m.polismakova@mail.ru

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация,  
e-mail: a.separator@mail.ru, v.ershova@mail.ru

Рассмотрены проблемы экспериментальных определений магнитных параметров неоднородных гранулированных магнетиков. Отмечено, что нехватка прямых и (или) косвенных экспериментальных данных о магнитных свойствах гранулированных ферромагнитных образцов различной относительной длины, в частности, негативно сказывается на обоснованности требований и решений по созданию и обеспечению работоспособности функциональных элементов и рабочих органов различных аппаратов и приборов. Для цилиндрических полишаровых образцов, относительная длина которых находится в диапазоне 1–16, в рамках макромодели эффективной среды получены зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности от напряжённости намагничивающего поля. Показано, что в диапазоне напряжённости поля 9–47 кА/м значения индукции и намагниченности исследуемых образцов увеличиваются, что свидетельствует об отсутствии магнитного насыщения гранулированных магнетиков (в отличие от сплошных магнетиков). При этом значения магнитной проницаемости и восприимчивости остаются практически стабильными. Полученные результаты будут полезны при создании рабочих органов различных аппаратов и приборов.

**Ключевые слова:** полишаровый образец цилиндрической формы, относительная длина, полевые зависимости, магнитная индукция, проницаемость, восприимчивость, намагниченность.

**Введение.** В различных аппаратах и приборах лабораторного и промышленного назначения роль функциональных элементов, рабочих органов выполняют неоднородные ферро- и ферримагнетики в виде упаковки (засыпки) ферромагнитных гранул (зёрен и порошков) [1–11]. Информация о таких гранулированных магнетиках должна содержать данные об их магнитных свойствах. При этом гранулированные магнетики рассматривают, прежде всего, как формально квазисплошные объекты, т. е. используют модель так называемой эффективной среды. Данная модель предусматривает получение значений соответствующих эффективных параметров магнетиков – магнитной индукции  $B$ , проницаемости  $\mu$ , восприимчивости  $\chi$ , намагниченности  $M$  и др. Такую макромодель эффективной среды применяют не только для описания свойств гетерогенных магнетиков [8, 12], но и для определения эффективной диэлектрической проницаемости материалов [13].

Неоднородные магнетики (в рассматриваемом случае – гранулированные, формально уподобляемые квазисплошным) обычно являются короткими, т. е. имеют сравнительно сопоставимые (преимущественно в пределах одного порядка) размеры в трёх характерных направлениях (одно из них – направление намагничивания). Разные по размерам, но при этом одинаковые по составу квазисплошные,

как и сплошные (в определённой мере однородные), образцы-тела обладают разными магнитными свойствами из-за проявления размагничивающего фактора, в существенной мере зависящего от формы образца-тела. В настоящее время практически отсутствуют необходимые прямые и (или) косвенные экспериментальные данные о магнитных параметрах коротких гранулированных образцов. Так, отсутствуют семейства полученных при целенаправленном изменении геометрии образца полевых зависимостей магнитных параметров. Поэтому невозможно обосновать выбор и проанализировать работоспособность ферро- и ферримагнитных гранулированных функциональных элементов, рабочих органов аппаратов и приборов, например, магнитных фильтр-сепараторов и анализаторов (фильтрационного типа) [6, 7]. В работе [6] рассмотрена следующая ситуация: в связи с отсутствием данных о магнитных параметрах разработчики соленоидных фильтр-сепараторов ограничились испытаниями лабораторного тест-фильтра (малой производительности с соответствующей длиной фильтр-матрицы цилиндрической формы) и рекомендовали лабораторно установленную длину фильтр-матрицы для производства промышленных аппаратов повышенной и высокой производительности (с увеличенным сечением фильтр-матрицы), что привело к получению крайне низкого

результата их работы. Отсутствие указанных экспериментальных данных магнетиков также не позволяет объективно анализировать различные, зачастую разноречивые, результаты компьютерного моделирования для совершенствования подходов к моделированию.

Базой необходимых знаний о магнитных свойствах (магнитной проницаемости  $\mu$ , восприимчивости  $\chi$ , намагниченности  $M$ ) как сплошных, так и квазисплошных образцов могут служить сведения, получаемые, например, баллистическим методом [14, 15], о средней индукции  $B$  поля в образце в зависимости от его геометрии и напряжённости  $H$  приложенного магнитного поля. Обобщающим безразмерным геометрическим параметром для квазисплошного и сплошного образцов цилиндрической формы является относительная длина  $L/D$  образца длиной  $L$  и диаметром  $D$  [14–20].

В работе [21] изложены результаты анализа полевых зависимостей магнитных параметров  $B$ ,  $\mu$ ,  $\chi$ ,  $M$ , полученные для гранулированных (полишаровых) образцов цилиндрической формы с различной относительной длиной  $L/D=1...22$  в диапазоне напряжённости поля  $H=25...163$  кА/м. Образцы для исследований представляли собой плотные засыпки подшипниковых шаров из стали марки ШХ15 диаметром 6 мм в цилиндрической ёмкости диаметром 49 мм. Петля для измерений магнитного потока (и последующего получения полевых зависимостей индукции) размещалась посередине образца. Были оценены магнитные свойства образцов такого рода с учётом особенностей, отличающих эти образцы от сплошных образцов из стали. Однако остались нерешёнными некоторые вопросы, например, отсутствие признаков магнитного насыщения гранулированных образцов при их намагничивании, в отличие от известных результатов намагничивания сплошных, в частности, стальных образцов. Это прослеживалось уже на получаемых изначально полевых зависимостях индукции  $B$ , а затем особенно наглядно – на полевых зависимостях намагниченности  $M$  гранулированных образцов. В указанных зависимостях, в том числе полученных для длинного образца (т. е. для квазисплошного материала этого образца) отсутствует область автомодельных значений  $M$  при увеличении напряжённости поля  $H$  до 163 кА/м и даже более.

Цель работы – получить зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности цилиндрических полишаровых образцов в широком диапазоне их относительной длины от напряжённости намагничивающего поля.

**Результаты исследований и их анализ.** На рис. 1 показано дополнительно полученное – расширенное по сравнению с приведённым в работе [21] – семейство полевых зависимостей индукции  $B$  цилиндрических гранулированных образцов. Исследовали засыпку шаров из нержавеющей стали диаметром 8 мм в цилиндрической ёмкости диаметром  $D=40$  мм различной длины  $L$ . Эксперименты проводили при напряжённости поля  $H=9,4...47,2$  кА/м и относительной длине образцов  $L/D=1...16$ . Значения  $B$  находили как частное от деления измеряемых милливеберметром значений магнитного потока (с погрешностью не более 1,7 %) сквозь петлю,

охватывающую образец в его средней части, на площадь петли и число её витков. При этом число сравнительно коротких образцов (характеризующихся допредельными кривыми намагничивания, т. е. уступающими кривой намагничивания достаточно длинного образца) образцов и соответствующих им зависимостей увеличено почти в три раза по сравнению с работой [21].

Значения индукции  $B$  монотонно возрастают с увеличением напряжённости поля  $H$  (см. рис. 1) аналогично кривым  $B(H)$

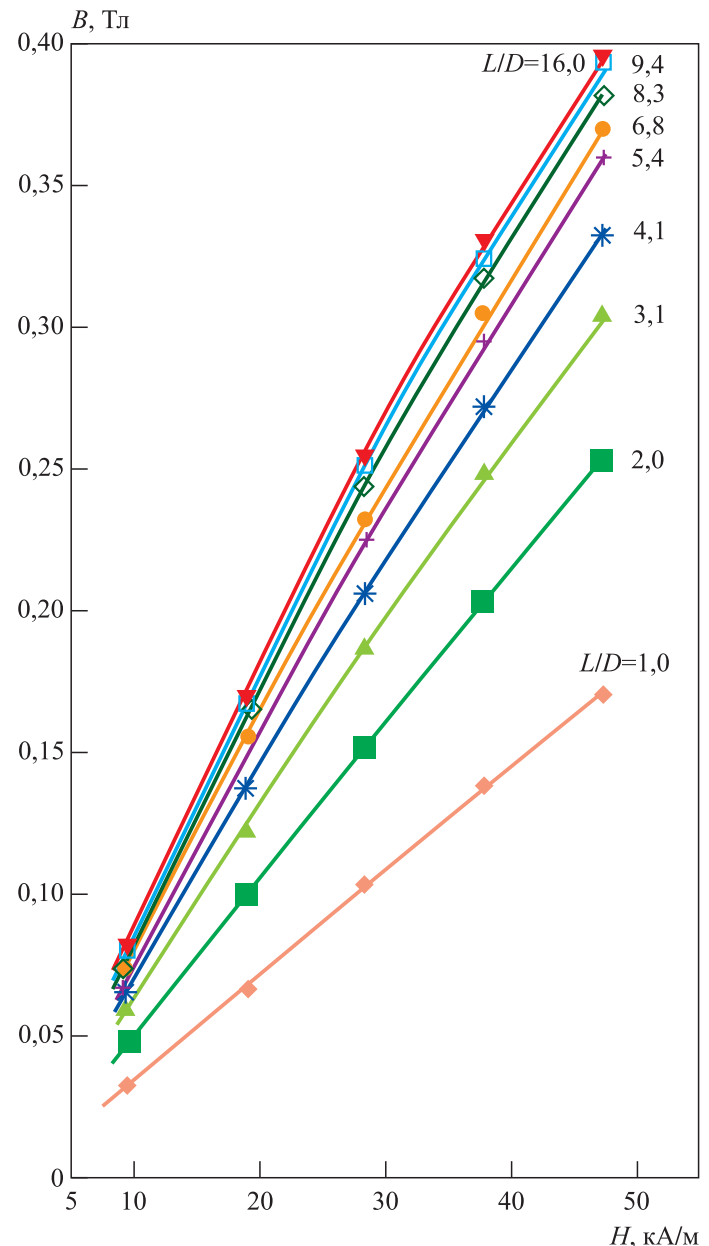


Рис. 1. Зависимости магнитной индукции цилиндрических полишаровых образцов от напряжённости поля при различной относительной длине образца  $L/D$

Fig. 1. Field dependencies of magnetic induction at various relative length of a cylindrical specimens of balls  $L/D$

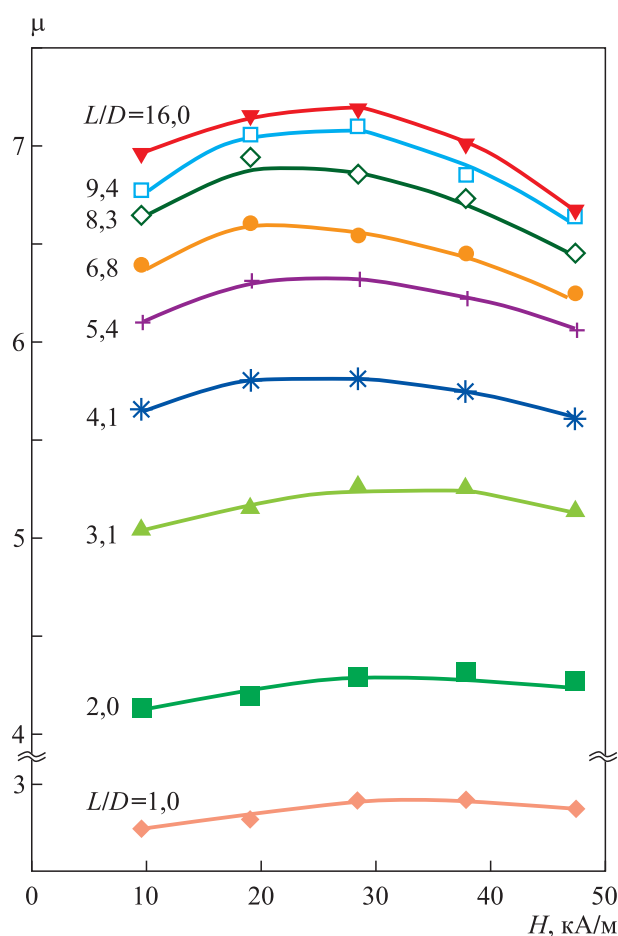


Рис. 2. Магнитная проницаемость цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формуле (1) с учётом приведённых на рис. 1 данных о магнитной индукции

Fig. 2. Magnetic permeability of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (1) and data on Fig. 1

из [21]. Судя по взаимному расположению кривых, с повышением относительной длины образцов  $L/D$  значения  $B$  в образце увеличиваются (при снижении интенсивности этого увеличения) вплоть до достижения при  $L/D \geq [L/D] \approx 10...12$  предельных значений индукции  $B = B_m$  и соответственно предельной кривой намагничивания. Эту предельную кривую следует воспринимать уже как кривую намагничивания именно материала (квасисплошного) образца.

На рис. 2 представлены полевые зависимости магнитной проницаемости  $\mu$  гранулированных (полишаровых) образцов. Значения  $\mu$  найдены с учётом значений индукции  $B$  на рис. 1 по формуле

$$\mu = B/(\mu_0 H), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная константа.

Как и в случае с семейством полевых зависимостей индукции  $B$ , семейство полевых зависимостей магнитной

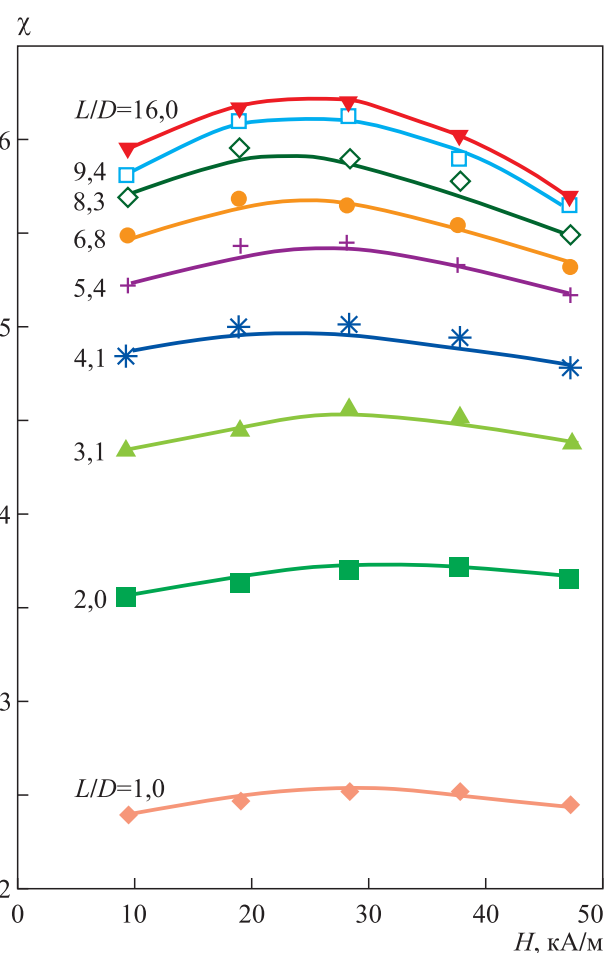


Рис. 3. Магнитная восприимчивость цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формулам (2), (3) для длинного и коротких образцов соответственно с учётом приведённых на рис. 2 данных о магнитной проницаемости

Fig. 3. Magnetic susceptibility of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (2) for short and (3) for long specimens and data on Fig. 2

проницаемости  $\mu$  ограничивается сверху предельной кривой  $\mu = \mu_m$ , характеризующей магнитную проницаемость именно материала (квасисплошного) образца. Согласно рис. 2 экспериментальные зависимости  $\mu(H)$  отличаются от аналогичных зависимостей, приведённых в работе [21]: в принятом диапазоне напряжённости поля  $H = 9,4...47,2$  кА/м кривые лежат в окрестности слабо выраженных экстремумов  $\mu$ , т. е. в области почти стабильных значений  $\mu$ .

На рис. 3 представлены полевые зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  гранулированных (полишаровых) образцов. При этом следует различать получение зависимостей магнитной восприимчивости именно материала образца  $\chi = \chi_m$  (здесь – длинного образца с  $L/D \geq [L/D] \approx 10...12$ ) и того или иного короткого образца  $\chi < \chi_m$ . В первом и втором случаях соответственно используют формулы

$$\chi_m = \mu_m - 1; \quad (2)$$

$$\chi = \mu(\mu_m - 1) / \mu_m. \quad (3)$$

Как отмечено в [21], данное обстоятельство не всегда учитывается при анализе и обработке экспериментальных данных (например, в [14]), что обуславливает появление погрешности полученных результатов.

Согласно рис. 3 экспериментальные зависимости  $\chi(H)$  отличаются от аналогичных зависимостей, приведённых в работе [21] (как и зависимости  $\mu(H)$ ): в принятом диапазоне напряжённости поля  $H=9,4 \dots 47,2$  кА/м кривые лежат в окрестности слабо выраженных экстремумов  $\chi$ , т. е. в области почти стабильных значений  $\chi$ .

На рис. 4 приведены полевые зависимости намагниченности  $M$  изучаемых гранулированных образцов. Необходимые для построения зависимостей значения  $M$  находят по значениям магнитной восприимчивости  $\chi$  (см. рис. 3):

$$M = \chi H. \quad (4)$$

Характер полученных полевых зависимостей намагниченности  $M$  на рис. 4 (как и индукции  $B$ , см. рис. 1) подтверждает сделанный в [21] вывод об отсутствии признаков магнитного насыщения гранулированных магнетиков. Так, с увеличением напряжённости поля  $H$  эти зависимости, хотя и с уменьшением интенсивности, но все же продолжают заметно возрастать.

Фактическое отсутствие магнитного насыщения гранулированных магнетиков (в отличие от сплошных магнетиков) при увеличении  $H$  вплоть до 40–50 кА/м можно проследить на примере предельной полевой зависимости намагниченности  $M$  (см. рис. 4, кривые 1, 2), т. е. полевой зависимости  $M$  именно квазисплошного материала образцов. В противном случае, начиная с определённого, сравнительно небольшого значения  $H$ , на этой зависимости была бы выражена область автомодельности, как это обычно наблюдается для материала сплошных, в частности стальных, образцов. Более того, судя по рассмотренным в [21] аналогичным данным, полученным при намного более высоких значениях напряжённости поля (до  $H=163$  кА/м), магнитное насыщение такого рода магнетиков вряд ли возможно в принципе (или, вероятно, достижимо только при гиперзначениях  $H \gg 163$  кА/м).

**Закключение.** Проанализированы экспериментально полученные в магнитном поле напряжённостью до 47 кА/м полевые зависимости индукции, магнитной проницаемости, восприимчивости и намагниченности цилиндрических гранулированных ферромагнитных образцов (естественная упаковка шаров диаметром 8 мм) при значениях отношения длины образца к его диаметру от 1 до 16. Установлено принципиальное отличие характера намагничивания гранулированных магнетиков от характера намагничивания сплошных магнетиков – отсутствие не только магнитного насыщения, но и признаков приближения к такому насыщению. Полученные результаты будут полезны при создании рабочих органов и функциональных элементов различных аппаратов и приборов с точки зрения обоснования выбора

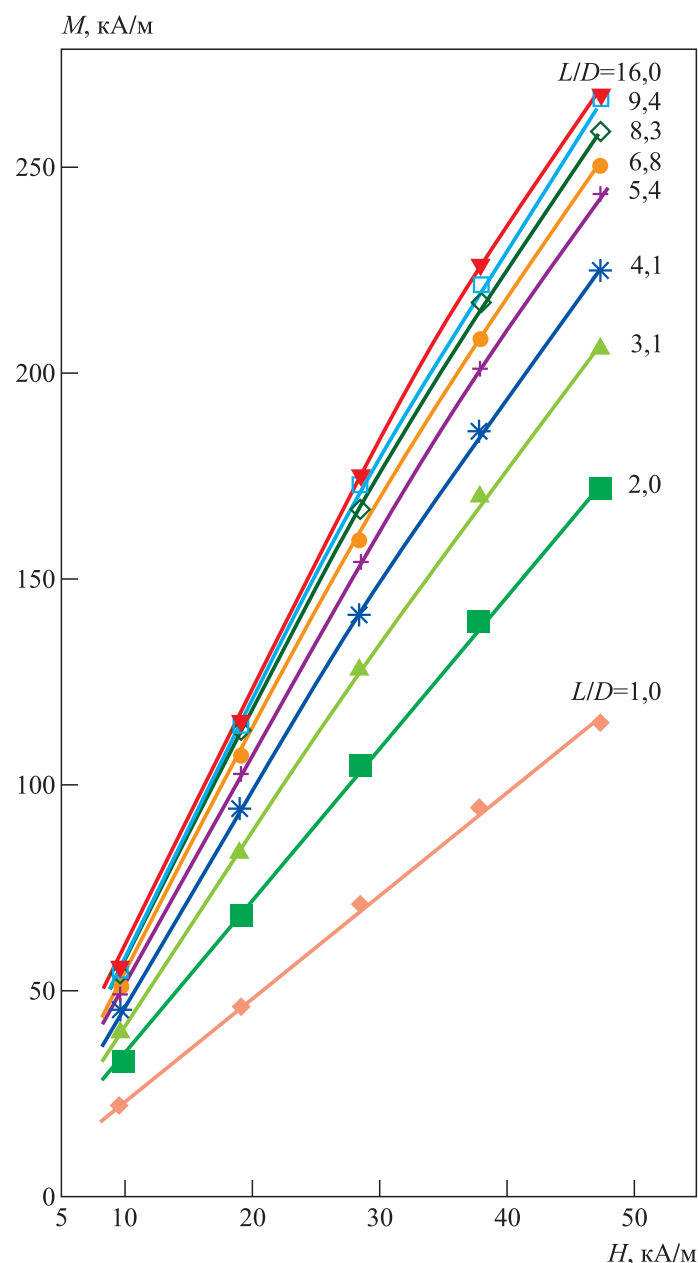


Рис. 4. Намагниченность цилиндрических полишаровых образцов, рассчитанная по формуле (4) с учётом приведённых на рис. 3 данных о магнитной восприимчивости

Fig. 4. Intensity of magnetization of a cylindrical specimens of balls taking into account formula (4) and data on Fig. 3

и анализа работоспособности ферро- и ферритмагнитных гранулированных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания в сфере науки (проект № 0706-2020-0024), РФФИ и Лондонского Королевского Общества в рамках научного проекта № 20-52-10006; гранта Президента РФ для господдержки молодых ученых (проект МК-807.2020.8).

Список литературы

1. Bjork R., Zhou Z., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.01.005
2. Diguët G., Beaugnon E., Cavaillé J. Y., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, pp. 3337–3341. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.020
3. Ильин Н. А., Климов А. А., Tiercelin N., Pernod P., Мишина Е. Д., Гапонов М. С., Брехов К. А., Сигов А. С., Преображенский В. Л. Динамика намагниченности в многослойных структурах TbCo/FeCo под действием фемтосекундного оптического возбуждения // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58
4. Eskandarpour A., Iwai K., Asai S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 19 (2), no. 4799183, pp. 84–95. DOI: 10.1109/TASC.2009.2014567
5. Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 18 (2), no. 4520245, pp. 824–827. DOI: 10.1109/TASC.2008.920830
6. Сандуляк А. А., Ершова В. А., Сандуляк А. В. Металло- и энергоемкость модельного ряда магнитных соленоидных фильтров // Тяжелое машиностроение. 2007. № 4. С. 17–22.
7. Сандуляк А. А., Свистунов Д. И., Полисмакова М. Н., Сандуляк А. В., Ершова В. А., Ершов Д. В., Сандуляк Д. А. «Экстраполируемая цепочка» магнитных тест-фильтров как средство контроля ферропримесей // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 3. С. 35–40.
8. Mattei J. L., Minot O., Le Floc'h M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, vol. 140–144 (3), pp. 2189–2190. DOI: 10.1016/0304-8853(94)00624-5
9. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Pamme N., Ngmason B., Iles A., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027
10. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak D. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 2, pp. 329–335. DOI 10.1007/s10891-017-1571-4
11. Сандуляк Д. А., Сандуляк А. А., Киселев Д. О., Сандуляк А. В., Полисмакова М. Н., Кононов М. А., Ершова В. А. Определение магнитной восприимчивости феррочастиц по данным восприимчивости их дисперсных образцов // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 48–52. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-9-48-52
12. Anhalt M., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 320, pp. e366–e369. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.02.072
13. Яшин М. М., Мирзокулов Х. Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокмпозитов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 92–100. DOI/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100
14. Chen D. X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 449, pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.069
15. Yaglidere I., Gunes E. O., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 400–411. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2765624

16. Im S. H., Park G. S., *Proceeding of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 7–10 October 2018, Jeju, South Korea, 2018, pp. 2629–2632. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548969
17. Wang M., Feng J., Shi Y., Shen M., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 1842–1851. DOI: 10.1109/TIE.2018.2840485
18. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers B. W. M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 456, pp. 423–432. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.003
19. Marinica O. M., *Journal of Nanomaterials*, 2017, 9 p. DOI: 10.1155/2017/5407679
20. Périgo E. A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J., *Applied Physics Review*, 2018, vol. 5, p. 031301. DOI: 10.1063/1.5027045
21. Сандуляк А. В., Сандуляк Д. А., Ершова В. А., Ткаченко Р. Ю., Сандуляк А. А., Полисмакова М. Н. Магнитные характеристики «короткого» пористого магнетика: на примере засыпки шаров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 3 (335). С. 121–133.

References

1. Bjork R., Zhou Z., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 476, pp. 417–422. DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.01.005
2. Diguët G., Beaugnon E., Cavaillé J. Y., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, vol. 322, pp. 3337–3341. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.020
3. Ilyin N. A., Klimov A. A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E. D., Gaponov M. S., Brekhov K. A., Sigov A. S., Preobrazhensky V. L., *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 50–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-50-58
4. Eskandarpour A., Iwai K., Asai S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 19 (2), no. 4799183, pp. 84–95. DOI: 10.1109/TASC.2009.2014567
5. Mishima F., Terada T., Akiyama Y., Izumi Y., Okazaki H., Nishijima S., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, vol. 18 (2), no. 4520245, pp. 824–827. DOI: 10.1109/TASC.2008.920830
6. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak A. V., *Tyazheloje mashinostroyeniye*, 2007, no. 4, pp. 17–22 (in Russian).
7. Sandulyak A. A., Svistunov D. I., Polismakova M. N., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Ershov D. V., Sandulyak D. A., *Zakonodatelnaja i prikladnaya metrologiya*, 2010, no. 3, pp. 35–40 (in Russian).
8. Mattei J. L., Minot O., Le Floc'h M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, vol. 140–144 (3), pp. 2189–2190. DOI: 10.1016/0304-8853(94)00624-5
9. Sandulyak A. A., Sandulyak A. V., Ershova V. A., Pamme N., Ngmason B., Iles A., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 441, pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.06.027
10. Sandulyak A. A., Ershova V. A., Sandulyak D. A., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 2, pp. 329–335. DOI 10.1007/s10891-017-1571-4

11. Sandulyak D. A., Sandulyak A. A., Kiselev D. O., Sandulyak A. V., Polismakova M. N., Kononov M. A., Ershova V. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 928–933. DOI: 10.1007/s11018-017-1295-z
12. Anhalt M., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 320, pp. e366–e369. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.02.072
13. Yashin M. M., Mirzokulov H. B., *Russian Technological Journal*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 92–100. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100
14. Chen D. X., Pardo E., Zhu Y.-H., Xiang L.-X., Ding J.-Q., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 449, pp. 447–454. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.069
15. Yaglidere I., Gunes E. O., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 400–411. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2765624
16. Im S. H., Park G. S., *Proceeding of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 7–10 October 2018, Jeju, South Korea, 2018, pp. 2629–2632. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8548969
17. Wang M., Feng J., Shi Y., Shen M., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 3, pp. 1842–1851. DOI: 10.1109/TIE.2018.2840485
18. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers B. W. M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 456, pp. 423–432. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.02.003
19. Marinica O. M., *Journal of Nanomaterials*, 2017, 9 p. DOI: 10.1155/2017/5407679
20. Périgo E. A., Weidenfeller B., Kollár P., Füzér J., *Applied Physics Review*, 2018, vol. 5, p. 031301. DOI: 10.1063/1.5027045
21. Sandulyak A. V., Sandulyak D. A., Ershova V. A., Tkachenko R. Y., Sandulyak A. A., Polismakova M. N., *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2019, vol. 3 (335), pp. 121–133.

Дата поступления: 19.12.2019.

Дата принятия: 26.02.2020.

## Analysis of dependence between magnetic properties of granulated ferromagnetic specimens and relation of its length to diameter

Alexander V. Sandulyak<sup>1</sup>, Roman Y. Tkachenko<sup>1</sup>, Darya A. Sandulyak<sup>1</sup>, Maria N. Polismakova<sup>1</sup>, Anna A. Sandulyak<sup>1</sup>, Vera A. Ershova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian technological university, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.sandulyak@mail.ru, separator-mami@mail.ru, d.sandulyak@mail.ru, m.polismakova@mail.ru

<sup>2</sup>Moscow polytechnical university, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.separator@mail.ru, v.ershova@mail.ru

Paper studies the problems about experimental determining magnetic parameters of nonuniform granular magnetics. It has been noted that the existing shortage of direct and (or) indirect experimental data on the magnetic properties of granular ferromagnetic specimens with different values of a relative length, in particular, has a negative impact on the validity of the requirements and decisions to create and ensure the performance of relevant functional elements, movable operating elements of various equipments and devices. By the example of cylindrical specimens of balls with the range of relative length 1–16 within the framework of effective medium macromodel the dependences of induction, magnetic permeability, susceptibility, magnetization and field intensity have been obtained. It has been shown that in the range of field intensity 9–47 kA/m values of induction and magnetization of investigating specimens increase, that indicates the absence of magnetic saturation of such granular (as opposed to solid) magnetics. And this is the case at almost stable values of magnetic susceptibility and permeability. Obtained results are useful in designing movable operating elements of various equipments and devices.

**Key words:** specimen of balls with cylindrical form, relative length, field dependencies of magnetic induction, permeability, susceptibility, intensity of magnetization.

## Синтез помехоустойчивого пространственно-временного фильтра для высокоточных измерений навигационных параметров по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем

С. Н. Карутин<sup>1</sup>, В. Н. Харисов<sup>2</sup>, В. С. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт микроприборов-К», Москва, Российская Федерация, e-mail: karutin-sn@inav.space

<sup>2</sup>ОАО «ВНИИР-Прогресс», Чебоксары, Российская Федерация, e-mail: vhar@list.ru, vapavlov@abselectro.com

Рассмотрены проблемы работоспособности современных высокоточных терминалов глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия маскирующих и имитационных помех. Решением проблемы низкой помехоустойчивости является применение цифровых антенных решёток с алгоритмами пространственно-временной обработки сигналов. Описаны известные, наиболее проработанные и применяемые, алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов. Приведены причины, не позволяющие применять известные алгоритмы в высокоточных терминалах глобальных навигационных спутниковых систем.

Предложен алгоритм пространственно-временной обработки сигналов на основе пространственно-временного фильтра конечной длины с теоретически обоснованным требованием к эрмитовой симметрии матричной импульсной характеристики. Предложенный алгоритм гарантирует отсутствие сигнальных искажений в любой сигнально-помеховой обстановке. При этом импульсная характеристика пространственно-временного фильтра рассчитывается по критерию оптимального подавления помех. Исследованы характеристики предложенного пространственно-временного фильтра, а также других алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов. Для этого применён метод математического моделирования со случайным перебором многочисленных параметров сигнально-помеховой обстановки (направления на сигналы, на многочисленные помехи и их отражения, дальность отражателей помех, фазы отражений, уровни помех и отражений и т. д.). Результаты моделирования представлены в виде функций распределения отношений сигнал-шум на выходе алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов и функций распределения смещений фазы и сигнального времени. Полученные зависимости подтверждают несмещённость фазы и сигнального времени в пространственно-временном фильтре в абсолютно любой сигнально-помеховой обстановке с помеховой многолучёвостью. Показано, что пространственно-временной фильтр обеспечивает большую помехоустойчивость, чем компенсаторные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), помехоустойчивость, точность, пространственно-временная обработка, цифровая антенная решётка, несмещённость сигнального времени и фазы.

**Введение.** Широкомасштабное использование терминалов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для решения различных практических и прикладных задач в сфере транспорта, энергетики, связи, сельского хозяйства сделали ГНСС элементом критически важной инфраструктуры для обеспечения устойчивого экономического развития государств и комфортной жизни населения. Широкое распространение технологий транспортной телематики на основе ГНСС обусловило активное развитие средств индивидуального радиопротиводействия искусственному радионавигационному полю ГНСС. В результате использования постановщиков помех мощностью до 10 Вт, именно в регионах с высокой экономической активностью,

потребители услуг ГНСС столкнулись с ситуацией, когда навигационные определения невозможны из-за непосредственной близости множества средств постановки не только маскирующих, но и имитационных помех [1].

В настоящее время потребители используют четыре типа навигационных услуг ГНСС, из которых базовую услугу предоставляет космический комплекс, а три остальные (повышенную точность и надёжность, относительную навигацию и высокую точность) потребители получают с использованием информации функциональных дополнений [2]. Используя типовую модель жизненного цикла отрасли [3] для описания рынка терминалов ГНСС, можно выделить три важных этапа эволюции навигационных услуг (рис. 1).

На первом этапе, начавшемся одновременно с развертыванием систем ГЛОНАСС и GPS, стартовало внедрение терминалов базовой услуги в сфере транспорта. Фаза основного роста терминалов для транспортной телематики пришлась на 2005–2010 гг. В настоящее время это зрелый рынок, на котором существует очень острая конкуренция за потребителя. С задержкой около 7 лет начали развиваться терминалы функциональных дополнений, которые позволяют потребителям определять трёхмерные координаты со среднеквадратической погрешностью менее 0,1 м в реальном времени в результате дифференциальных измерений текущих навигационных параметров по несущим и огибающим колебаниям сигналов космических аппаратов ГНСС. В настоящее время данный рынок можно считать устоявшимся, высокоточные терминалы активно внедряются во все секторы экономики, по всему миру уже функционируют сети функциональных дополнений из тысяч станций.

В условиях воздействия маскирующих и имитационных помех массово используемые в настоящее время терминалы окажутся не способными оказывать требуемые потребителям услуги, поэтому можно однозначно утверждать о начале становления рынка помехоустойчивых терминалов как базовых, так и высокоточных услуг.

К настоящему времени для помехозащиты терминалов базовых услуг, обеспечивающих метровую точность определения координат, разработаны и освоены в производстве цифровые антенные решётки, которые функционально являются антенными компенсаторами помех (АКП) с алгоритмами на основе многоотводных линий задержек (МЛЗ) [4]. Однако цифровые антенные решётки типа АКП непригодны для использования в составе перспективных высокоточных терминалов ГНСС. Основным недостатком АКП является искажение фазы сигналов [5] и, соответственно, неприменимость высокоточных фазовых методов измерений текущих навигационных параметров. Другим недостатком современных и эффективных компенсаторов являются искажения сигнального времени, которые происходят из-за МЛЗ.

Помехозащита высокоточных терминалов ГНСС является открытой научной задачей, несмотря на то, что в литературе детально описан и исследован алгоритм адаптивного

формирователя лучей (АФЛ), которой не искажает полезные сигналы за счёт фокусировки на полезные сигналы [6]. Проблема состоит в том, что этот алгоритм не обладает требуемой помехоустойчивостью в условиях помеховой многолучёвости ввиду отсутствия МЛЗ.

За рубежом вопрос помехозащиты высокоточных приёмников ГНСС также не решён [7–10]. В обзоре [7] описан и экспериментально исследован неискажающий алгоритм пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), сочетающий фокусировку на сигналы и подавление помех с использованием МЛЗ. Однако, во-первых, данный алгоритм не является оптимальным, что оговорено авторами выше. Во-вторых, алгоритм имеет низкую вычислительную эффективность, так как для каждого направления полезного сигнала проводится независимая компенсация одних и тех же помех.

В данной статье представлен синтез оптимального неискажающего пространственно-временного фильтра (ПВФ), на базе которого можно создать цифровые антенные решётки для решения проблемы помехозащиты перспективных

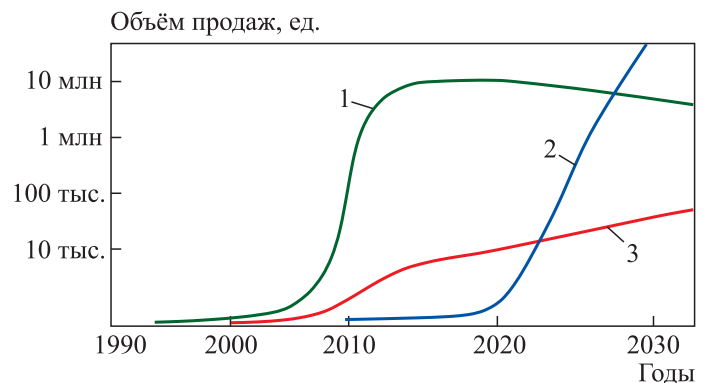


Рис. 1. Жизненные циклы эволюции терминалов ГНСС:  
1 – терминалы базовой услуги; 2 – терминалы функциональных дополнений; 3 – помехоустойчивые терминалы всех услуг

Fig. 1. GNSS terminals life cycles evolution:  
1 – base service terminals; 2 – augmentations terminals; 3 – interference resistant terminal for all services

Таблица 1

Характеристики алгоритмов обеспечения помехоустойчивости терминалов ГНСС

| Характеристика                                                        | Пространственный АКП | АФЛ     | АКП с МЛЗ | ПВФ           |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|---------|-----------|---------------|
| Выигрыш в помехоустойчивости относительно существующих терминалов, дБ | 20                   | 25      | 60        | 60            |
| Искажение фазы                                                        | Да                   | Нет     | Да        | Нет           |
| Искажение сигнального времени                                         | Нет                  | Нет     | Да        | Нет           |
| Предельная погрешность измерений текущих навигационных параметров, м  | 1                    | 0,1     | 10        | 0,1           |
| Сложность реализации                                                  | Простая              | Средняя | Высокая   | Очень высокая |

высокоточных терминалов ГНСС. В табл. 1 приведены параметры ПВФ в сравнении с ранее известными алгоритмами для адаптивных антенных решёток.

**Структура оптимальной обработки.** В 2016 г. синтезирован и опубликован оптимальный неискажающий алгоритм ПВОС для условий многолучёвости [11]. Оптимальное решение получено в классе фильтров с бесконечной импульсной характеристикой и практически нереализуемо. Однако практическая ценность работы [11], по мнению авторов, заключается в определении оптимальной структуры обработки, представленной на рис. 2, а также обобщения математического аппарата временных фильтров для включения пространственной обработки.

По результатам работы [11] и с учётом практических ограничений длины линии задержки интервалом  $\tau \in [-L, L]$  (общая длина МЛЗ равна  $2L+1$ , где  $L$  – количество секций МЛЗ в одном направлении) оптимальный алгоритм ПВОС для условий помеховой многолучёвости описывается выражениями:

$$\hat{\lambda} = \max_{\lambda}^{-1} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{t=1}^T \eta_t s_t^*(\lambda) \right\}; \quad (1)$$

$$\eta_t = \hat{\mathbf{H}}^* \zeta_t;$$

$$\zeta_t = \sum_{\tau=-L}^L Q_{\tau}^* \xi_{t-\tau},$$

где  $\lambda$  – информационный параметр сигнала  $s_t(\lambda)$ ;  $\eta_t$  – результат фокусировки на сигнал с использованием оценки вектора фокусировки  $\hat{\mathbf{H}}$ ;  $\zeta_t$  – векторный выход пространственно-временного компенсатора помех с матричной импульсной характеристикой  $Q_{\tau}$ ;  $\xi_t$  – вектор наблюдений выходов антенной решётки; символ  $*$  обозначает Эрмитово сопряжение.

В [5–6, 11–12] неоднократно отмечалось, что разделение обработки на компенсирующую и фокусирующую составляющие имеет преимущество, связанное с необходимостью

одновременного приёма множества сигналов ГНСС. Приём нескольких полезных сигналов с различных направлений требует только размножения блоков фокусировки, тогда как первый, наиболее сложный, блок многоканальной компенсации помех оказывается общим для всех сигналов.

Способ получения импульсной характеристики  $Q_{\tau}$  на основе эмпирически оцениваемой корреляционной функции  $K_{\tau}$  на ограниченном интервале  $\tau \in [-L, L]$  в [11] не представлен и является предметом исследований данной статьи. Задача заключается в поиске такого значения  $Q_{\tau}$ , при котором обеспечивается эффективное подавление помех и не смещаются оценки информационных параметров сигнала.

**Условия несмещённости фазы и сигнального времени.** Проблема смещения фазы и сигнального времени полезных сигналов ГНСС в алгоритмах ПВОС для высокоточных терминалов имеет особую важность и теоретическую самостоятельность и рассмотрена в работе [12].

В рамках описанной выше структуры оптимальной обработки преобразование полезного сигнала имеет следующий вид:

$$\tilde{s}_t = \sum_{\tau=-L}^L [\hat{\mathbf{H}}^* Q_{\tau}^* \mathbf{H}] s_{t-\tau} = \sum_{\tau=-L}^L h_{\tau} s_{t-\tau}, \quad (2)$$

где  $h_{\tau}$  – импульсная характеристика «сигнального» фильтра.

Для классических фильтров во временной области требования несмещённости состоят в эрмитовой симметричности импульсной характеристики фильтра. В работе [9] показано, что при условии точной фокусировки на полезный сигнал  $\hat{\mathbf{H}} \equiv \mathbf{H}$ , эрмитова симметричность «сигнального» фильтра обеспечивается эрмитовой симметрией матричной импульсной характеристики:

$$Q(\tau) = Q^*(-\tau).$$

Также отметим, что следствием приведённого условия несмещённости является необходимость компенсации помехи на среднем (по задержке) выходе МЛЗ, что обеспечивается рассмотрением симметричного интервала МЛЗ  $\tau \in [-L, L]$ .

**Традиционное винеровское решение задачи.** Для получения импульсной характеристики  $Q_{\tau}$  естественно воспользоваться широко известными результатами теории классических фильтров Винера (или Винера–Хопфа), оптимальных по критерию минимума дисперсии погрешности.

Совокупность наблюдений  $\xi_t$  и импульсной характеристики  $Q_{\tau}$

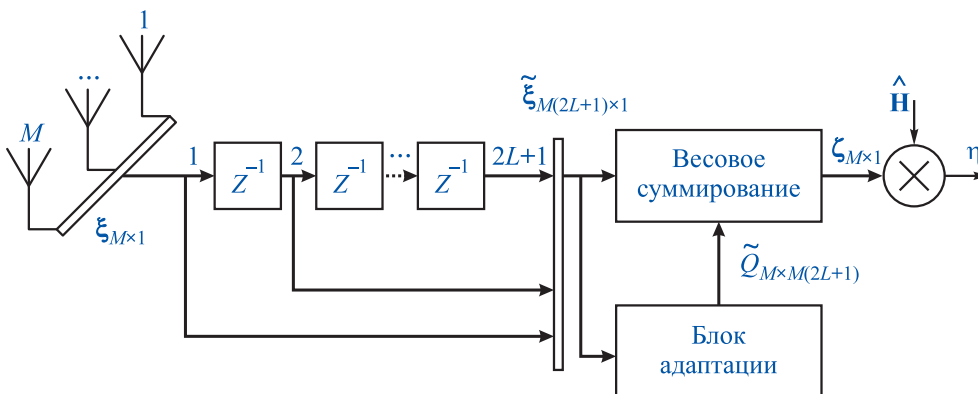


Рис. 2. Структура оптимального пространственно-временного фильтра с фокусировкой:  
 $Z^{-1}$  – дискретная задержка на один период частоты дискретизации

Fig. 2. Structure of the optimal spatiotemporal filter with focusing:  
 $Z^{-1}$  – discrete delay of one period of the sampling frequency

удобно записать в блочно-векторном виде. Блочный вектор с блоками размерности  $M \times 1$  и  $M \times M$  соответственно:

$$\tilde{\xi}_t = [\xi_{t+L} \dots \xi_{t+1} \xi_t \xi_{t-1} \dots \xi_{t-L}]^T - (2L+1) \times 1;$$

$$\tilde{Q}_t = [Q_{-L} \dots Q_0 \dots Q_L]^T - (2L+1) \times 1.$$

Отсюда выход фильтра подавления помех (2) запишем как

$$\zeta_t = \tilde{Q}^* \tilde{\xi}_t. \quad (3)$$

Задача подавления помех заключается в определении импульсной характеристики  $\tilde{Q}$ , которая обеспечивает минимум дисперсии помехи в каждом канале. В постановке задачи к синтезу можно было бы требовать минимизации следа корреляционной матрицы векторного процесса  $\zeta_t$ . Однако наиболее простое и общее решение задачи даёт принцип ортогональности [13], согласно которому выход оптимального фильтра-компенсатора должен быть ортогонален всем входам, кроме компенсируемого, и может быть описан выражением

$$M\{\zeta_t \tilde{\xi}_{t-\tau}^*\} = \begin{cases} 0_{M \times M}, & \tau \in [-L, -1] \cup [1, L]; \\ I_{M \times M}, & \tau = 0, \end{cases} \quad (4)$$

которое в блочно-матричной форме имеет вид:

$$M\{\zeta_t \tilde{\xi}_t^*\} = (0_{M \times LM} I_{M \times M} 0_{M \times LM}). \quad (5)$$

Путём подстановки (4) в (5) можно получить выражение для матричной импульсной характеристики  $\tilde{Q}$ , оптимальной по критерию минимизации дисперсии помехи (по максимальному уровню подавления):

$$M\{\tilde{Q}^* \tilde{\xi}_t \tilde{\xi}_t^*\} = \tilde{Q}^* R = (0_{M \times LM} I_{M \times M} 0_{M \times LM}),$$

$$\tilde{Q} = (0_{M \times LM} I_{M \times M} 0_{M \times LM}) R^{-1} = (R^{-1})_{(L)}. \quad (6)$$

Выражение (5) показывает, что импульсная характеристика ПФ оптимального подавления помехи равна средней блочной строке матрицы  $(L$ -й из  $2L+1$ ), обратной корреляционной матрице  $R = M\{\tilde{\xi}_t \tilde{\xi}_t^*\}$ .

Для исследования точности оценки информационных параметров полезного сигнала при использовании ПФ с импульсной характеристикой (5) проведено статистическое моделирование, в котором параметры сигнально-помеховой обстановки являются случайными величинами. Основные результаты моделирования в виде функций распределения оценок фазы, задержки и отношения сигнал-шум (ОСШ) будут представлены далее. Здесь ограничимся рассмотрением вида характеристики группового времени запаздывания сигнального фильтра (2) для нескольких помеховых обстановок. В высокоточных приёмниках ГНСС неравномерность группового времени запаздывания всегда является строго контролируемой величиной.

На рис. 3 представлены кривые частотной зависимости группового времени запаздывания для четырёх случайных сигнально-помеховых обстановок, статистические параметры которых будут приведены далее. Для понимания условий моделирования в табл. 2 даны параметры сигнально-помеховой обстановки № 4:  $J/N$  – отношение мощности помехи  $J$  к мощности шума  $N$ ;  $\varphi$ ,  $\theta$  – соответственно азимут и угол места направления приёма (для полезного сигнала  $\varphi = 19,9^\circ$ ,  $\theta = 88,8^\circ$ ).

Анализ рис. 3 показывает, что сигнальный фильтр (3) имеет случайные характеристики группового времени запаздывания, зависящие от параметров сигнально-помеховой обстановки. При этом смещение информационных параметров сигнала будет происходить не только в результате изменения сигнально-помеховой обстановки, но и при значительной неравномерности группового времени запаздывания.

Главный вывод из этого исследования – определение импульсной характеристики ПФ оптимального подавления помех только по стандартному критерию минимизации дисперсии помехи непригодно для высокоточных приложений.

**Синтез алгоритма подавления помех без смещений радионавигационных параметров сигнала.** Проведём синтез ПФ, оптимального по критерию максимального подавления помехи, но ограничиваясь классом эрмитово-симметричных фильтров. Задача относится к винеровской фильтрации с ограничениями и формулируется следующим образом.

Таблица 2

Параметры сигнально-помеховой обстановки № 4

| Параметр                                                                       | Номер отражения |               |                |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|----------------|
|                                                                                | 1               | 2             | 3              |
| Помеха 1 ( $J/N = 45,2$ дБ, $\varphi = 272,5^\circ$ , $\theta = -16,0^\circ$ ) |                 |               |                |
| Задержка отражения, м                                                          | 4,4             | 1,3           | 4,4            |
| Уровень отражения, дБн                                                         | -5,8            | -11,5         | -5,4           |
| Направление отражения:<br>$\varphi, ^\circ$<br>$\theta, ^\circ$                | 244,2<br>-6,4   | 234,4<br>6,4  | 134,4<br>-28,0 |
| Помеха 2 ( $J/N = 45,2$ дБ, $\varphi = 147,1^\circ$ , $\theta = 14,5^\circ$ )  |                 |               |                |
| Задержка отражения, м                                                          | 13,4            | 10,6          | 10,2           |
| Уровень отражения, дБн                                                         | -7,6            | -10,9         | -15,5          |
| Направление отражения:<br>$\varphi, ^\circ$<br>$\theta, ^\circ$                | 134,4<br>-28,0  | 356,3<br>0,1  | 190,7<br>9,2   |
| Помеха 3 ( $J/N = 45,2$ дБ, $\varphi = 308,7^\circ$ , $\theta = -5,7^\circ$ )  |                 |               |                |
| Задержка отражения, м                                                          | 4,3             | 3,4           | 13,0           |
| Уровень отражения, дБн                                                         | -13,8           | -12,3         | -13,7          |
| Направление отражения:<br>$\varphi, ^\circ$<br>$\theta, ^\circ$                | 171,9<br>-20,7  | 147,6<br>-9,6 | 218,5<br>2,9   |

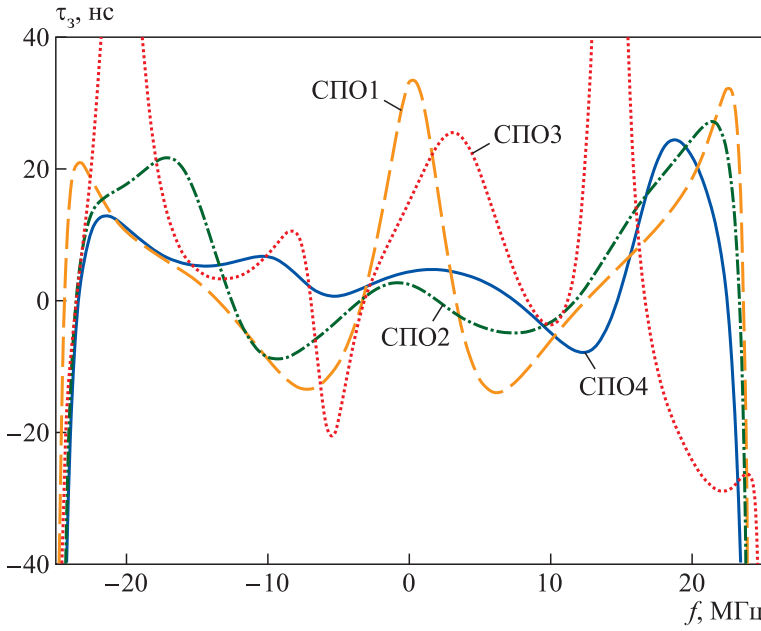


Рис. 3. Частотная зависимость группового времени  $\tau_g$  запаздывания ПФФ для четырёх случайных сигнально-помеховых обстановок – СПО1, СПО2, СПО3, СПО4

Fig. 3. Spatiotemporal filter group delay  $\tau_g$  frequency dependence for four different signal-jamming scenarios (SGS) – SGS1, SGS2, SGS3, SGS4

Требуется найти эрмитово-симметричную блочную  $(2L+1) \times 1$  импульсную характеристику  $\tilde{Q} = \{Q_\tau, \tau = -L:L\}$ , элементами которой являются  $M \times M$ -матрицы, минимизирующую дисперсию помехи на выходе  $(2L+1) \times 1$  матричного фильтра:

$$\hat{\tilde{Q}} = \min_{\tilde{Q}}^{-1} \text{tr} \{ \tilde{\xi}_t \tilde{\xi}_t^* \} = \min_{\tilde{Q}}^{-1} \sum_{k=-L}^L \sum_{p=-L}^L \text{tr} \{ Q_k^* \tilde{\xi}_{t-k}^* \tilde{\xi}_{t-p} Q_p \}. \quad (7)$$

Для гарантии эрмитовой симметричности представим  $Q_\tau$  суммой вещественной  $X_\tau = \text{Re}\{Q_\tau\}$  и мнимой  $Y_\tau = \text{Im}\{Q_\tau\}$  частей, причём заданных только для положительных значений  $\tau$  в диапазоне  $0:L$  (для отводов фильтра с неотрицательными номерами). При этом

$$\left. \begin{aligned} Q_\tau &= X_\tau + jY_\tau; \\ Q_{-\tau} &= X_\tau^T - jY_\tau^T. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Такое представление позволяет выразить  $(2L+1)M^2$  комплексных параметров, задающих  $\tilde{Q}$ , через  $(2L+1)M^2$  вещественных параметров, т. е. примерно вдвое уменьшить размерность задачи.

Технической тонкостью, существенно усложняющей выкладки, является невозможность связать матрицы  $X_\tau^T$  и  $Y_\tau^T$ , представляющие  $\tilde{Q}$  при отрицательных  $\tau$ , с матрицами  $X_\tau$  и  $Y_\tau$  с помощью линейного преобразования в  $M$ -мерном пространстве, несмотря на очевидную связь элементов матриц при транспонировании. В то же время, если

ввести  $M^2 \times 1$ -вектор  $\text{vec}\{X_\tau\}$ , составленный из столбцов матрицы  $X_\tau$ , то  $\text{vec}\{X_\tau\}$  и соответствующий вектор  $\text{vec}\{X_\tau^T\}$  связаны известной  $M^2 \times M^2$ -матрицей перестановок  $T$ , все элементы которой равны нулю, кроме одного элемента в каждой строке, равного единице:

$$\text{vec}\{X_\tau^T\} = T \cdot \text{vec}\{X_\tau\}.$$

Аналогично можно записать  $Y_\tau$ .

Используя указанный приём векторизации запишем

$$\text{vec}\{Q_\tau\} = A_\tau Z_\tau, \quad (9)$$

где  $A_\tau$ ,  $Z_\tau$  – матрица и вектор соответственно размерностью  $M^2 \times 2M^2$  и  $2M^2 \times 1$ , определяемые как

$$A_\tau = \begin{cases} (I \ jI), & \tau \in [0, L], \\ (T \ -jT), & \tau \in [-L, -1], \end{cases}$$

$$Z_\tau = \begin{pmatrix} \text{vec}\{X_\tau\} \\ \text{vec}\{Y_\tau\} \end{pmatrix}, \quad \tau \in [0, L], \quad Z_{-\tau} = Z_\tau. \quad (10)$$

Кроме того, из известных в математике соотношений следует, что элементы суммы в (10) можно представить в виде

$$\text{tr} \{ Q_k^* \tilde{\xi}_{t-k}^* \tilde{\xi}_{t-p} Q_p \} = \text{vec}\{Q_k^*\}^T (I \otimes R_{p-k}) \text{vec}\{Q_p\}, \quad (11)$$

где  $I \otimes R_{p-k}$  – кронекерово произведение матрицы;  $I$  – единичная матрица  $M \times M$ .

Подстановка (9) в (11) даёт результирующее представление слагаемых (7):

$$\text{tr} \{ Q_k^* \tilde{\xi}_{t-k}^* \tilde{\xi}_{t-p} Q_p \} = Z_k^T A_k^* (I \otimes R_{p-k}) A_p Z_p = Z_k^T N_{k,p} Z_p,$$

где

$$N_{k,p} = A_k^* (I \otimes R_{p-k}) A_p \quad (12)$$

является матрицей  $2M^2 \times 2M^2$ .

Выражение (7) в целом имеет вид:

$$\{\hat{Z}_\tau, \tau = -L:L\} = \min_{\{Z_\tau\}}^{-1} \left\{ \sum_{k=-L}^L \sum_{p=-L}^L Z_k^T N_{k,p} Z_p \right\}. \quad (13)$$

Двойную сумму в (13) удобно привести к канонической векторно-матричной форме, для чего требуется представить  $Z_\tau$  единым блочным вектором  $(2L+1) \times 1$ , а  $N_{k,p}$  – блочной матрицей  $(2L+1) \times (2L+1)$ . При этом для дополнительного уменьшения размерности задачи воспользуемся зеркальной зависимостью  $Z_\tau$  от  $\tau$ , т. е.  $Z_\tau = Z_{-\tau}$ .

Объединим  $\mathbf{Z}_\tau$ ,  $\tau \in [1, L]$ , в вектор

$$\tilde{\mathbf{Z}} = [\mathbf{Z}_1^T \dots \mathbf{Z}_L^T]^T, \quad (14)$$

а зеркальную зависимость учтём с помощью матрицы отражения:

$$[\mathbf{Z}_{-L}^T \dots \mathbf{Z}_{-1}^T]^T = E \tilde{\mathbf{Z}},$$

где  $E$  –  $L \times L$ -блочная матрица отражения с блоками размером  $2M^2 \times 2M^2$ , у которой блоки на кросс-диагонали равны единичным матрицам, а остальные блоки нулевые. Тогда векторная запись  $\{\mathbf{Z}_\tau, \tau = -L:L\}$  имеет вид

$$\{\mathbf{Z}_\tau, \tau = -L:L\} = \begin{bmatrix} E \tilde{\mathbf{Z}} \\ \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{L2M^2 \times 2M^2} & E_{L2M^2 \times L2M^2} \\ I_{2M^2 \times 2M^2} & 0_{2M^2 \times L2M^2} \\ 0_{L2M^2 \times 2M^2} & I_{L2M^2 \times L2M^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix},$$

а задача (7) в канонической форме –

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_0 \\ \hat{\tilde{\mathbf{Z}}} \end{bmatrix} = \min_{\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix}}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0^T & \tilde{\mathbf{Z}}^T \end{bmatrix} (B^T \tilde{N} B) \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} \right\}, \quad (15)$$

где  $\tilde{N} = \{N_{k,p}, k, p \in [-L:L]\}$  – это  $(2L+1) \times (2L+1)$ -блочная матрица с блоками  $2M^2 \times 2M^2$  или  $(2L+1)2M^2 \times (2L+1)2M^2$ -матрица.

Исходная квадратичная форма – действительная, а не комплексная величина. Это позволяет записать (15) в виде

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Z}}_0 \\ \hat{\tilde{\mathbf{Z}}} \end{bmatrix} = \min_{\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix}}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0^T & \tilde{\mathbf{Z}}^T \end{bmatrix} (B^T \text{Re}\{\tilde{N}\} B) \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} \right\}. \quad (16)$$

Используем полученное решение (6) для минимизации квадратичной формы (16):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_0 \\ \tilde{\mathbf{Z}} \end{bmatrix} = [B^T \text{Re}\{\tilde{N}\} B]_{(1)}^{-1}, \quad (17)$$

т. е. первый столбец обратной матрицы, которому в результате замены переменных соответствует средний выход МЛЗ.

Результирующий алгоритм определения импульсной характеристики неискажающего ПВФ следует из (17) путём преобразования корреляционной матрицы  $R$  в матрицу  $N$  (12) и преобразования  $\tilde{\mathbf{Z}}$  в  $\mathbf{Q}_\tau$  с помощью (14), (10) и (8).

**Характеристики точности и помехоустойчивости алгоритмов ПВОС.** Исследование стабильности фазы сигнала и сигнального времени, а также ОСШ выполнено для следующих алгоритмов ПВОС:

пространственно-временной АКП, определяемый выражениями (1), (2), (5), при условии использования вектора фокусировки вида  $\hat{\mathbf{H}} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ ;

оптимальный по Винеру ПВФ, определяемый выражениями (1), (2), (5), при условии точной фокусировки на полезный сигнал  $\hat{\mathbf{H}} \equiv \mathbf{H}$ ;

неискажающий симметричный ПВФ, определяемый выражениями (1), (2), (16), при условии точной фокусировки на полезный сигнал  $\hat{\mathbf{H}} \equiv \mathbf{H}$ .

Характеристики приёма сигналов ГНСС зависят не только от выбранного алгоритма обработки, но и от случайных параметров сигнально-помеховой обстановки, которыми являются направления на космические аппараты, на источники помех, положения и интенсивность блестящих точек отражателей помех. В целом это составляет десятки параметров, так что исследование зависимости характеристик приёма как функций от этих параметров практически невозможно, да и нецелесообразно. Единственным практически приемлемым в этом случае методом исследования становится математическое моделирование с перебором случайных сигнально-помеховых обстановок и статистическая обработка результатов.

**Условия моделирования.** Для моделирования используем четырёхэлементную антенную решётку с расположением элементов по углам квадрата со стороной  $\lambda/2$ . Элементы антенной решётки лежат в горизонтальной плоскости. Задаём зависимость коэффициента усиления антенных элементов от угла места в виде кардиоиды  $(1 + \sin\theta)/\sqrt{2}$ , что примерно соответствует диаграммам направленности популярных микрополосковых антенн. Соответственно, коэффициент усиления в зенитном направлении составляет 3 дБи, в горизонте равен –3 дБи, при угле места  $-30^\circ$  составляет –9 дБи.

Направления на помехи и переотражения выбираются случайными с равномерным распределением из сектора  $-30^\circ \dots +15^\circ$  по углу места. Сигналы принимаются из верхней полусферы в области  $10^\circ \dots 90^\circ$ .

Максимальное число помех выбрано равным 3, что является пределом работоспособности для четырёхэлементной антенной решётки. Помехи имеют прямоугольный спектр шириной 50 МГц и являются равномошными, их суммарная мощность в точке приёма на 50 дБ выше уровня внутреннего шума.

Каждый источник помехи порождает по три случайных переотражения. Отражения имеют случайную фазу, случайную задержку относительно прямого луча помехи (разность хода) в диапазоне 0...15 м, случайный уровень в диапазоне –5...–20 дБи.

При  $L = 4$  соответственно МЛЗ имеет 9 отводов. Расстояние между отводами линии задержки равно шагу дискретизации. Частота дискретизации задана равной 50 МГц, что для комплексного представления процессов обеспечивает полосу анализа 50 МГц.

Оценка фазы и сигнального времени осуществляется для полезного сигнала с корреляционной функцией сигнала ГЛОНАСС с открытым доступом. В полосе анализа сигнал располагается на нулевой частоте.

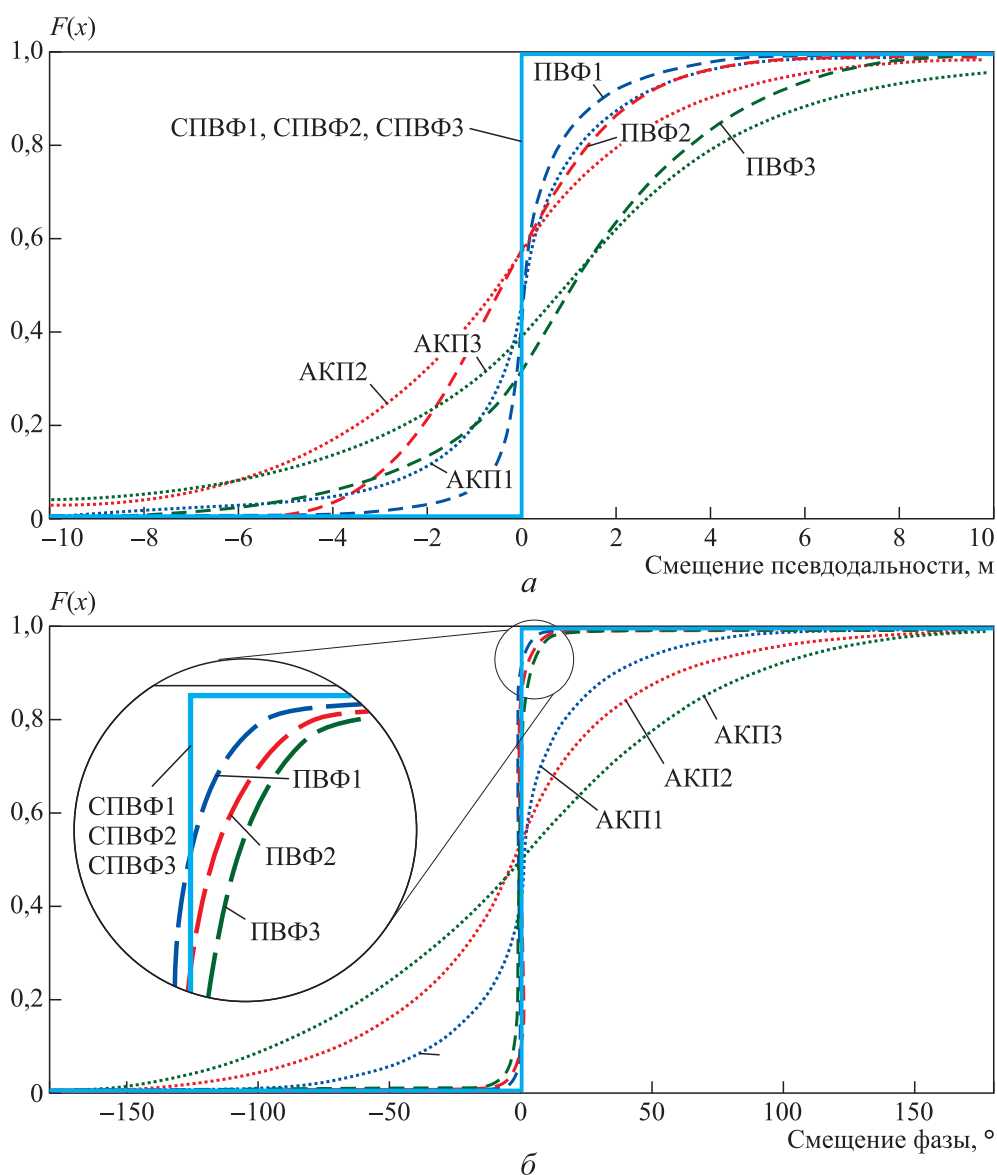


Рис. 4. Функции распределения  $F(x)$  смещений псевдодальности (а) и фазы (б): ПВФ1, ПВФ2, ПВФ3 – пространственно-временной фильтр; СПВФ1, СПВФ2, СПВФ3 – симметричный пространственно-временной фильтр; АКП1, АКП2, АКП3 – антенные компенсаторы помех; цифры обозначают количество воздействующих помех

Fig. 4. The distribution function of the pseudo range offsets (a) and phase shift (b): SPF1, SPF2, SPF3 – spatiotemporal filter; SSPF1, SSPF2, SSPF3 – symmetric spatiotemporal filter; AJC1, AJC2, AJC3 – antenna jammers compensator; digit means number of jammers

Расчёт пространственно-временной корреляционной матрицы  $R$  на основе геометрически заданных параметров помеховой обстановки с многолучевостью и конфигурации антенной решётки проводится согласно методу, представленному в работе Харисова В. Н., Павлова В. С. (Харисов В. Н., Павлов В. С. Преимущества пространственно-временного компенсатора помех ГНСС в условиях помеховой многолучевости [сайт]. URL: <http://www.gk-nap.ru/images/stories/Foto/14-19.09.2015/14.pdf>).

Результаты статистического исследования смещений оценки сигнального времени (псевдодальности) и фазы

представлены на рис. 4 в виде семейства функций распределения смещений псевдодальности и фазы в случайных сигнально-помеховых обстановках при фиксированном числе помех.

Основной результат моделирования заключается в том, что функции распределения погрешностей псевдодальности и смещений фазы в симметричном ПВФ при любой сигнально-помеховой обстановке имеют ступенчатый вид, что свидетельствует о полном отсутствии искажений. При этом АКП и оптимальный по Винеру ПВФ смещают оценки псевдодальности, а также демонстрируют закономерное увеличение искажений при усложнении сигнально-помеховой обстановки (увеличении числа помех).

Следует обратить внимание, что смещение оценки фазы в оптимальном по Винеру ПВФ незначительно, что достигается за счёт точной фокусировки на сигналы ГНСС. Однако практическая польза этого эффекта для улучшения точности определения координат отсутствует из-за сильных смещений сигнального времени.

На рис. 5 представлены функции распределения ОСШ. На графиках уровень ОСШ 0 дБ соответствует приёму навигационного сигнала на один антенный элемент без помех. Критическое ОСШ определяется запасом собственной помехоустойчивости приёмника ГНСС (запасом приёмника по чувствительности). Например, запас помехоустойчивости в 10...15 дБ, имеющийся у большинства современных приёмников ГНСС, соответствует уровню -15...-10 дБ на кривых распределения ОСШ.

В первую очередь на рис. 5 следует отметить, что кривые для оптимального по Винеру ПВФ и симметричного ПВФ практически сливаются. Это означает, что требования к симметрии ПВФ практически не ухудшают помехоустойчивость.

При отсутствии помех (см. рис. 5) распределение обусловлено оговорённой ранее амплитудной диаграммой направленности элементов антенной решётки. Диапазон значений ОСШ для АКП составляет -4,6...0 дБ, а для

обоих ПВФ за счёт фокусировки на 6 дБ выше – в интервале 1,4...6 дБ.

С увеличением числа помех диапазон возможных значений ОСШ радикально увеличивается за счёт нескольких эффектов:

глубоко отрицательные значения ОСШ получаются, когда помеха не может быть полностью подавлена и когда в направлении полезного сигнала сформировался ложный ноль диаграммы направленности;

положительные значения ОСШ формируются при полном подавлении помех и удачной фокусировке диаграммы направленности.

Также анализ кривых показывает, что при отсутствии помех или при их малом числе ПВФ имеет преимущество над АКП за счёт фокусировки, однако при критическом числе помех их характеристики практически идентичны.

**Закключение.** Проведённые исследования позволили получить новый алгоритм ПВОС для реализации в цифровых антенных решётках высокоточных терминалов ГНСС, который гарантирует несмещённости фазы и сигнального времени в абсолютно любой сигнально-помеховой обстановке, включая наиболее сложные обстановки с помеховой многолучёвостью. Новый алгоритм практически не уступает в помехоустойчивости классическим алгоритмам винеровской фильтрации, которые являются оптимальными по критерию наилучшего подавления помехи.

Несмещенность фазы и сигнального времени обеспечивает сохранение точности определения абсолютных и относительных координат потребителей при использовании услуг функционального дополнения ГЛОНАСС.

#### Список литературы

1. Coffed J., *The Threat of GPS Jamming. The Risk to an Information Utility*, Harris Corporation, 2013, 13 p.
2. Карутин С. Н. Система ГЛОНАСС – текущее состояние и перспективы развития // Тезисы докладов научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение», 14–15 февраля 2017 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. С. 5–7.
3. Портер М. Конкурентная стратегия: Методика анализа отраслей и конкурентов / Пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2017. 453 с.
4. Ефименко В. С., Харисов В. Н., Медведев П. В. Влияние многолучевого распространения помех на качество их подавления // Радиотехника. 2005. № 7. С. 62–67.
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

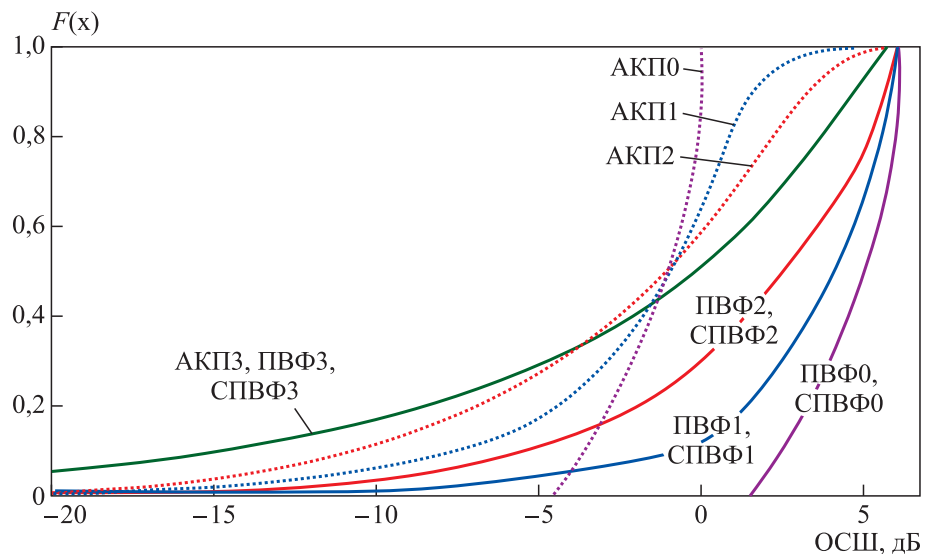


Рис. 5. Функции распределения  $F(x)$  ОСШ:

ПВФ0, ПВФ1, ПВФ2, ПВФ3 – пространственно-временной фильтр; СПВФ0, СПВФ1, СПВФ2, СПВФ3 – симметричный пространственно-временной фильтр; АКП0, АКП1, АКП2, АКП3 – антенные компенсаторы помех; цифры обозначают количество воздействующих помех

Fig. 5. Signal-to-noise ratio distribution functions  $F(x)$ :

SPF0, SPF1, SPF2, SPF3 – spatiotemporal filter; SSPF0, SSPF1, SSPF2, SSPF3 – symmetric spatiotemporal filter; AJC0, AJC1, AJC2, AJC3 – antenna jammers compensator; digit means number of jammers

6. Ефименко В. С., Харисов В. Н. Адаптивные формирователи лучей для повышения помехоустойчивости приёмников СРНС // Радиотехника. 2008. № 7. С. 45–50.

7. Daneshmand S., Jahromi A., Broumandan A., Lachapelle G. GNSS space-time interference mitigation and attitude determination in the presence of interference signals, Proceedings of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011), 20–23 September 2011, Portland, OR, pp. 1183–1192. DOI: 10.3390/s150612180

8. Psiaki M., O'Hanlon B. W., Powell S. P., Bhatti Jahshan, Wesson K. D., Humphreys T. E., Schofield A., GNSS spoofing detection using two-antenna differential carrier phase, Proceedings of the 27th international technical meeting of the satellite division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2014), 8–12 September 2014, Tampa, Florida, pp. 2776–2800. DOI: 10.15781/T24M91T03

9. Xu H., Cui X., Shen J., Lu M., A Two-Step Beam-Forming Method Based on Carrier Phases for GNSS Adaptive Array Anti-Jamming, Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, January 2016, pp. 793–804. DOI: 10.33012/2016.13488

10. Dimc F., Bažec M., Borio D., Gioia C., Baldini G., and Basso M., *Journal of Institute of Navigation*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 93–109. DOI: 10.1002/navi.184

11. Ефименко В. С., Харисов В. Н., Павлов В. С. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов и их характеристики // Радиотехника. 2016. № 7. С. 113–120.

12. Карутин С. Н., Харисов В. Н., Павлов В. С. Оптимальные алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов для высокоточных приложений // Радиотехника. 2018. № 9. С. 1–8. DOI: 10.18127/j00338486-201809-23

13. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 396 с.

#### References

1. Coffed J., *The Threat of GPS Jamming. The Risk to an Information Utility*, Harris Corporation, 2013, 13 p.

2. Karutin S. N., *Abstracts of scientific and technical conference "Navigation through the Earth's gravitational field and its metrological support"*, 14–15 february 2017, Mendeleevo, FSUE "VNIIFTRI" Publ., 2017, pp. 5–7.

3. Michael E. Porter, *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*, The free press, 1998.

4. Efimenko V. S., Kharisov V. N., Medvedev P. V., *Radio-engineering*, 2005, no. 7, pp. 62–67.

5. GLONASS. *Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya*, ed. A. I. Perova, V. N. Kharisova, Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (in Russian).

6. Efimenko V. S., Kharisov V. N., *Radioengineering*, 2008, no. 7, pp. 45–50.

7. Daneshmand S., Jahromi A., Broumandan A., Lachapelle G. *GNSS space-time interference mitigation and attitude determination in the presence of interference signals*, Proceedings

of the 24th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2011), 20–23 September 2011, Portland, OR, pp. 1183–1192. DOI: 10.3390/s150612180

8. Psiaki M., O'Hanlon B. W., Powell S. P., Bhatti Jahshan, Wesson K. D., Humphreys T. E., Schofield A., *GNSS spoofing detection using two-antenna differential carrier phase*, Proceedings of the 27th international technical meeting of the satellite division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2014), 8–12 September 2014, Tampa, Florida, pp. 2776–2800. DOI: 10.15781/T24M91T03

9. Xu H., Cui X., Shen J., Lu M., *A Two-Step Beam-Forming Method Based on Carrier Phases for GNSS Adaptive Array Anti-Jamming*, Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, January 2016, pp. 793–804. DOI: 10.33012/2016.13488

10. Dimc F., Bažec M., Borio D., Gioia C., Baldini G., and Basso M., *Journal of Institute of Navigation*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 93–109. DOI: 10.1002/navi.184

11. Efimenko V. S., Kharisov V. N., Pavlov V. S., *Radioengineering*, 2016, no. 7, pp. 113–120.

12. Karutin S. N., Kharisov V. N., Pavlov V. S., *Radioengineering*, 2018, no. 9, pp. 131–139. DOI: 10.18127/j00338486-201809-23

13. Tikhonov V. I., Kharisov V. N., *Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i system*, Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2014, 396 p. (in Russian).

Дата поступления: 30.03.2020.

Дата принятия: 08.04.2020.

## Synthesis of interference resistant spatiotemporal filter for navigation parameters high precision measurements using global navigation satellite systems

Sergey N. Karutin<sup>1</sup>, Vladimir N. Kharisov<sup>2</sup>, Vasily S. Pavlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Research and Development Institute of Micro Devices-K, Moscow, Russian Federation, e-mail: karutin-sn@inav.space

<sup>2</sup>JSC VNIIR-Progress, Cheboksary, Russian Federation, e-mail: vhar@list.ru, vapavlov@abselectro.com

The article considers problems of modern global navigation satellite systems high-precision user terminals performance in jamming and spoofing environment. The solution to the low interference resistance problem is the use of digital antenna arrays with spatiotemporal signal processing algorithms. The well-known, most studied and brought to practice algorithms for the spatiotemporal signal processing are described, reasons that do not allow the use of these algorithms in global navigation satellite systems high-precision user terminals are given.

This article proposes a spatiotemporal signal processing algorithm based on a spatiotemporal filter of finite length with a special, theoretically justified requirement for the Hermitian symmetry of the matrix impulse response, which guarantees the absence of signal distortion in any interference environment. In this case, the spatiotemporal filter impulse response is calculated by the criterion of optimal interference suppression. The proposed spatiotemporal filter characteristics, as well as other spatiotemporal signal processing algorithms characteristics, were studied by mathematical simulation with random enumeration of interference environment parameters (directions to signals, to numerous interferences and their reflections, range of interference reflectors, reflection phases, interference and reflections levels, etc.). Simulation results are presented in the form of distribution functions of signal-to-noise ratios at the output of spatiotemporal signal processing algorithms and distribution functions of phase and signal time biases. The obtained dependencies confirm the absence of phase and signal time biases in the spatiotemporal filter in absolutely any interference environment with interfering multipath, while the spatiotemporal filter provides greater interference resistance than compensating spatiotemporal signal processing algorithms.

**Key words:** global navigation satellite systems (GNSS), interference resistance, accuracy, spatiotemporal processing, digital antenna array, absence of signal time and phase bias.

## Эталонная установка для передачи единицы звукового давления в ультразвуковом диапазоне частот

А. Е. Исаев, А. М. Поликарпов, С. В. Сильвестров, Н. Г. Щерблюк

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,  
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: isaev@vniiftri.ru, a\_polycarpov@vniiftri.ru,  
ssilv@vniiftri.ru, shcherbluck@mail.ru

Приведены сведения об эталонной установке для калибровки гидрофонов на частотах 0,1–3,0 МГц, созданной в целях расширения частотного диапазона Государственного первичного эталона ГЭТ 55-2017 в область высокочастотного ультразвука. Обоснована актуальность создания установки, кратко рассмотрены принципы её работы и возможности измерений. Обсуждаются требования к характеристикам преобразователей ультразвукового диапазона. При отборе эталонных преобразователей приоритет отдан их временной стабильности, поскольку при передаче единицы с использованием тонального сигнала равномерность частотной характеристики чувствительности преобразователя не имеет принципиального значения. Для уменьшения влияния направленности применена прецизионная четырёхкоординатная система позиционирования преобразователей, включающая контроль их взаимного расположения по лучу лазера. Уделено внимание проблемам, связанным с освоением более высоких частот.

**Ключевые слова:** гидроакустика, высокочастотный ультразвук, эталон, калибровка, гидрофон.

**Введение.** Закономерным результатом развития гидроакустических технологий является использование в практических целях всё более высоких частот. В мегагерцовом диапазоне длина звуковой волны в воде меньше миллиметра, что позволяет излучать короткий импульс с крутыми фронтами, сформировать узкий звуковой пучок, повысить производительность систем передачи информации за счёт использования широкополосных сигналов. В автомобильных парктрониках используют ультразвук для точного определения расстояния до препятствия, аналогичным образом ультразвук применяют при прокладке подводных трубопроводов. Требования к диаграмме направленности для этих целей не столь важны, как, например, для эхолотатора (сонара).

Сонар для рыбной ловли должен не только обнаружить наличие рыбы, но и указать место, где она находится, т. е. — обладать приемлемой диаграммой направленности. Более жёстким требованиям должен удовлетворять излучатель звуковизора, принципиальным отличием которого является высокое пространственное разрешение (до  $1^\circ$  по углу и нескольких сантиметров по расстоянию), позволяющее выделить не только отметку в направлении объекта, но и его форму. Рабочая частота отечественного звуковизора с угловым разрешением  $0,9 \times 0,9^\circ$  составляет 1 МГц [1, 2].

Для улучшения характеристик сонаров применяют всё более и более сложные сигналы, при этом ужесточаются требования к контролю формы излучённого акустического сигнала. Для построения объёмного изображения в голографической системе звуковидения требуется знать как амплитуду, так и фазу звуковой волны. Чтобы сформировать матрицу приёмно-излучающих

преобразователей необходимы не только амплитудно-, но и фазочастотные характеристики каждого элемента.

В медицинских целях давно применяют методы исследований с помощью ультразвукового излучения (УЗИ). Глубина изображения, получаемого с использованием УЗИ-сканера, не превышает десятков сантиметров (НПО «Сканер». Российский производитель УЗ-сканеров. Каталог [сайт]. URL: <https://www.medscanner.ru/catalog>). Дальность действия упомянутого выше звуковизора составляет 30–100 м. Такая разница объясняется как различием затухания звука в среде распространения, так и различием рабочих частот, которые для УЗИ составляют несколько мегагерц. На таких высоких частотах измерять звуковое давление в точке пространства чрезвычайно сложно, поэтому в качестве характеристики акустического пучка УЗИ-сканера вынужденно используют мощность.

Упомянутые устройства не являются средствами измерений (СИ), тем более СИ звукового давления. Однако изготовление излучателей и приёмников этих устройств невозможно без контроля электроакустических характеристик, включающих, как минимум, амплитудно- и фазочастотную характеристики чувствительности, а также диаграммы направленности. Таким образом, при производстве излучателя выстраивается следующая цепочка: ультразвуковой излучатель → методика измерения давления и фазы создаваемых излучателем колебаний → ультразвуковой измерительный приёмник → калибровка приёмника.

Очевидно, что калибровку измерительного преобразователя невозможно осуществить без эталона. Необходимость использования эталона в процессе разработки методики

измерений не столь очевидна, однако точную апробацию методики измерений можно выполнить только с помощью эталона.

**Краткие сведения об эталонной установке для калибровки гидрофонов на частотах от 100 кГц до 3 МГц.** Поворотную схему в области измерений звукового давления в водной среде возглавляет Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде ГЭТ 55-2017. С целью расширения частотного диапазона ГЭТ 55-2017 в область высокочастотного ультразвука разработана установка Э-5 для воспроизведения и передачи единицы звукового давления в диапазоне 0,1–3,0 МГц. Установка позволяет определять частотную характеристику чувствительности и диаграммы направленности ультразвукового преобразователя.

В основу работы установки положена калибровка гидрофонов по полю в незаглушённом гидроакустическом бассейне размерами 1,5×1×1 м. Калибровка производится стандартным методом взаимности в соответствии с МЭК 60565-2006 «Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц». Кроме того, используя установку Э-5, откалиброванный методом взаимности гидрофон-переносчик можно использовать для передачи единицы методом сличения.

#### Метрологические характеристики установки Э-5

|                                                                                          |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Рабочий диапазон частот.....                                                             | 0,1–3,0 МГц |
| Диапазон воспроизводимых<br>звуковых давлений.....                                       | 50–1000 Па  |
| Неисключённая систематическая погрешность<br>измерения, не более, в диапазоне частот:    |             |
| 0,1–1,0 МГц.....                                                                         | 4 %         |
| 1,0–3,0 МГц.....                                                                         | 10 %        |
| Среднее квадратическое отклонение результата<br>измерения, не более, в диапазоне частот: |             |
| 0,1–1,0 МГц.....                                                                         | 1 %         |
| 1,0–3,0 МГц.....                                                                         | 2 %         |

Установка Э-5 имеет следующие особенности:

существует возможность выполнять измерения на тональных импульсах и получать частотные характеристики с высокой степенью подробности по частоте при излучении продолжительных непрерывных сигналов с распределённой по частоте мощностью;

#### Технические характеристики ультразвуковых измерительных преобразователей

| Преобразователь | Рабочий частотный диапазон, МГц | Активный элемент                                        |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|
| ГИ59            | 0,10–0,63                       | Пьезокерамическая сфера диаметром 5 мм                  |
| ГИ60            | 0,1–1,0                         | Пьезокерамический цилиндр диаметром 2 мм и высотой 5 мм |
| ГИ61            | 0,5–3,0                         | Пьезокерамический диск диаметром 2 мм и высотой 0,2 мм  |

при излучении тонального импульса условия свободного поля обеспечивают методом временной селекции согласно МЭК 60565-2006, при излучении непрерывных сигналов – методом скользящего комплексного взвешенного усреднения [3];

для уменьшения шумовой помехи используют автономное аккумуляторное питание входных электрических цепей установки;

малошумящие предварительные усилители входят в приёмно-измерительный тракт установки и встроены в корпуса гидрофонов-переносчиков;

необходимое отношение сигнал–шум достигается когерентным накоплением принимаемых сигналов;

прецизионная трёхкоординатная система автоматизированного позиционирования позволяет перемещать преобразователи в гидроакустическом бассейне с минимальным шагом 15 мкм, а поворотная платформа – вращать гидрофон на 360° с минимальным шагом 0,1°.

**Измерительные преобразователи.** В 1990-е гг. не развивались либо бесследно утрачены технологии изготовления ультразвуковых преобразователей. Во ВНИИФТРИ такие технологии сохранились на лабораторном уровне. Это позволило в рамках работ по созданию эталонной установки Э-5 изготовить преобразователи типов ГИ59, ГИ60, ГИ61 в двух исполнениях: гидрофон-переносчик; излучатель и обратимый преобразователь. Частотный диапазон установки разделён на три поддиапазона, в каждом поддиапазоне применяют свой комплект из трёх однотипных ультразвуковых измерительных преобразователей ГИ59, ГИ60, ГИ61. Преобразователи в виде гидрофона-переносчика снабжены встроенным малошумящим предусилителем. В преобразователе в виде излучателя и обратимого преобразователя встроенный предусилитель отсутствует.

На частотах 0,5–3,0 МГц длина звуковой волны варьируется от 3 до 0,5 мм. Технологические проблемы не позволили создать преобразователь со сферическим активным элементом для частот более 630 кГц. Поэтому на частотах 0,1–1,0 МГц использованы преобразователи с цилиндрическим пьезокерамическим элементом, симметричным относительно оси преобразователя. Активные элементы преобразователей для работы в диапазоне частот 0,5–3,0 МГц выполнены в виде пьезокерамического диска, ось симметрии которого перпендикулярна оси преобразователя.

При создании эталонных высокочастотных преобразователей звукового давления необходимо обеспечить малое рассеяние звука корпусом преобразователя на активный элемент. Эту проблему частично решает «акустически обтекаемая» форма – плавное увеличение размера поперечного сечения преобразователя по мере его удаления от активного элемента. Технические характеристики преобразователей приведены в таблице.

Характеристики направленности преобразователей ГИ59 и ГИ60 с симметричными относительно оси гидрофона активными элементами близки к круговым даже на верхних частотах рабочих диапазонов. Характеристика направленности преобразователя ГИ61 на частотах выше 1 МГц резко отличается от круговой, как следует из диаграммы в угловом секторе  $\pm 120^\circ$ , показанной на рис. 1.

Рассмотрим подробнее вопрос стабильности характеристик преобразователей во времени. Для гидрофона-переносчика стабильность имеет решающее значение. К нему в полной мере применим основополагающий метрологический принцип «нет стабильности – нет СИ». Необходимость стабильности характеристик излучателя и обратимого преобразователя не столь очевидна – в результате измерений по методу взаимности определяют чувствительности всех трёх преобразователей. Одна из ключевых задач хранения и поддержания любого эталона – контроль стабильности его метрологических характеристик. По мере эксплуатации эталона формируется база данных калибровок. Если характеристики входящих в состав эталонной установки Э-5 (которая является частью ГЭТ 55-2017) обратимого преобразователя и излучателя достаточно стабильны, то по данным этой базы можно судить о стабильности характеристик эталона в целом, либо выявлять причины нарушения стабильности.

Было изготовлено несколько экземпляров преобразователей каждого типа, из которых были отобраны преобразователи, обладающие большей временной стабильностью во всём рабочем диапазоне частот, в том числе в ущерб другим характеристикам. По этой причине характеристики направленности отобранных преобразователей ГИ61 оказались далеки от желаемых. Чтобы компенсировать этот недостаток в установке Э-5 применена прецизионная система подводного позиционирования.

**Частотная характеристика.** Частотные характеристики чувствительности гидрофонов-переносчиков представлены на рис. 2. Понятие «эталонный» обычно воспринимают как синоним слова «лучший». Если эталонная установка более высокого ранга может быть «лучше», то применение этого подхода к гидрофону дало нежелательный результат. В нормативных документах на гидрофоны заложен принцип: все характеристики гидрофона более высокого класса должны быть лучше. Если применительно к эталонной установке лучше – означает точнее, то с измерительным преобразователем ситуация не столь очевидна. Лучшим преобразователем является тот, который лучше выполняет возложенную на него измерительную задачу. До тех пор, пока передача единицы звукового давления в области высокого ультразвука происходит с использованием гармонических сигналов, неравномерность частотной характеристики гидрофона принципиального значения не имеет. Поэтому требование идеально плоской частотной характеристики для эталонного гидрофона явно избыточно. Более того, изготовить эталонный преобразователь с предписанными характеристиками технически невозможно. В то же время рабочий измерительный гидрофон, который получает единицу звукового давления с применением редкой сетки частот, в реальных условиях эксплуатации предназначен для приёма негармонических сигналов и для него требование малой неравномерности частотной характеристики более чем оправдано. Искажения звукового поля на 0,5 дБ рассеянием звука на корпусе эталонного гидрофона недопустимо, а для рабочего гидрофона – приемлемо, хотя это и сказывается при его калибровке. Таким образом, нерационально предъявлять требования к характеристикам

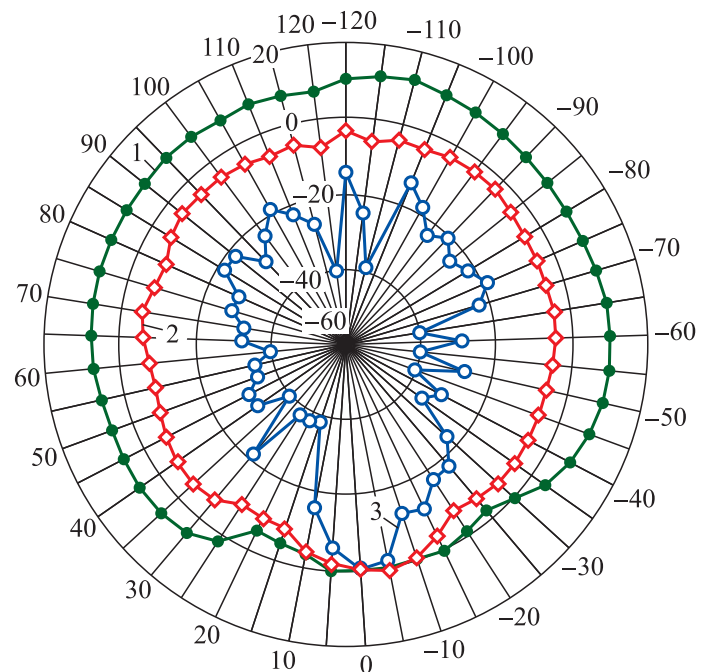


Рис. 1. Характеристика направленности преобразователя ГИ61 при  $f=500, 1000, 3000$  кГц – соответственно кривые 1–3; деления на круговой диаграмме указаны в градусах

Fig. 1. The direction characteristic of GI61 transducer at  $f=500, 1000, 3000$  kHz – respectively curves 1–3; divisions on the pie chart are indicated in degrees

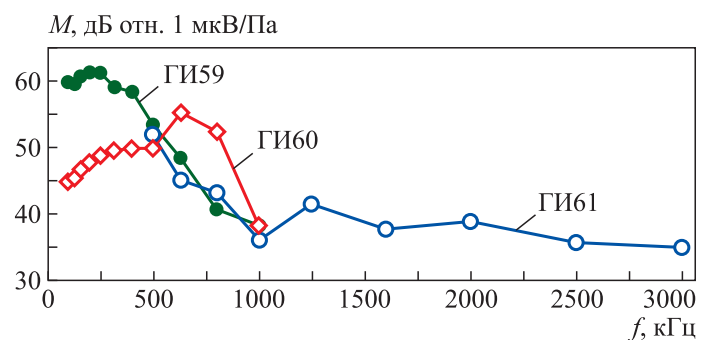


Рис. 2. Частотные характеристики чувствительности гидрофонов-переносчиков

Fig. 2. Frequency-sensitivity responses of reference hydrophones

гидрофона без учёта различных аспектов его применения. Например, если целью сличений эталонов является выявление источников их погрешностей, то в качестве возможного эталона применяют гидрофон со значительной неравномерностью частотной характеристики [4].

В воздушной акустике ситуация аналогична. Несомненно, плоская частотная характеристика – достоинство электроакустического преобразователя, поскольку обеспечивает неискажённую передачу спектра сигнала. У рабочих микрофонов резонанс мембраны компенсируют двумя резонаторами

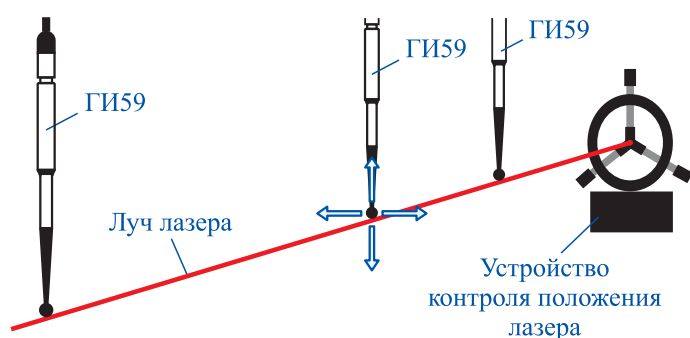


Рис. 3. Устройство контроля положения преобразователей по лучу лазера

Fig. 3. The device of transducers position control by laser beam

Гельмгольца, образуемыми мембраной и сеткой микрофона. В эталонных микрофонах резонанс мембраны не компенсируют и требований к неравномерности частотной характеристики не предъявляют.

Если в эталоне будут применяться негармонические сигналы, изменятся и требования к частотным характеристикам преобразователей. При использовании широкополосных сигналов (коротких импульсов, шумоподобных, частотно модулированных) важными станут отсутствие у эталонного гидрофона выраженного резонанса, равномерность его частотной характеристики в широком диапазоне частот. Например, если частотная характеристика гидрофона имеет острый резонансный пик, то при изменении температуры воды сдвинется частота резонанса, что значительно осложнит сличения результатов калибровок, как это произошло на сличениях [5].

**Система позиционирования преобразователей.** Принятые компромиссные решения по использованию преобразователей с выраженной характеристикой направленности потребовали применения трёхкоординатной прецизионной системы позиционирования, дополненной устройством контроля положения по лучу лазера (рис. 3). Для обеспечения возможности функционирования этой системы стенки гидроакустического бассейна в эталонной установке Э-5 выполнены оптически прозрачными.

В расчётные формулы метода взаимности входят значения расстояний между акустическими центрами активных элементов преобразователей. Система позиционирования позволяет с высокой точностью поместить в заданную точку пространства некоторую опорную точку преобразователя, например геометрический центр его активного элемента. Поскольку активный элемент – физическое тело определённых размеров и формы, то положения его акустического и геометрического центров могут не совпадать. Такое несоответствие будет слабо сказываться на точности измерений амплитудно-частотной характеристики, но приводить к неприемлемым погрешностям измерений фазы. Смещение на 0,1 мм акустического центра относительно опорной точки на частоте 1 МГц приводит к погрешности измерения фазы  $0,13\pi$  (примерно  $24^\circ$ ). В разработанном во ВНИИФТРИ методе фазовой калибровки дополнительно используют значение

временной задержки короткого импульсного сигнала [6, 7]. Преобразователи размещают по схеме Люкера–Ван Бюррена, при которой важно, чтобы были одинаковыми расстояния между акустическими центрами излучателя и приёмника и между акустическими центрами обратимого преобразователя и приёмника [8]. В установке Э-5 такое равенство расстояний обеспечивают, добиваясь одинаковых временных задержек короткого импульсного сигнала. При малом шаге перемещения и контроле положения преобразователя по лучу лазера можно определять смещение акустического центра относительно опорной точки калибруемого гидрофона [6].

**Заключение.** Отечественной промышленностью разработана и запущена в производство широкая номенклатура изделий, работа которых основана на применении ультразвука для различных приложений: гидролокация, медицина, звуковидение и др. Отсутствие средств метрологического контроля снижало конкурентоспособность этой высокотехнологичной продукции и ограничивало возможности импортозамещения. Созданная установка позволяет решить задачу калибровки СИ звукового давления на частотах 0,1–3,0 МГц, как было установлено в техническом задании. Очевидное направление работ по дальнейшему развитию метрологии этого вида измерений – освоение более высоких частот.

В Национальной физической лаборатории Великобритании при калибровке миниатюрных гидрофонов получают амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики чувствительности на частотах не менее 40 МГц [9]. Существует ряд публикаций по калибровке гидрофонов при верхней границе частотного диапазона 100 МГц [10]. На таких высоких частотах вместо пьезокерамических гидрофонов используют многослойные оптические гидрофоны и игольчатые гидрофоны с активным элементом на основе пьезополимерных плёнок – поливинилиденфторида (PVDF), поливинилиденфторида-трифторэтилена (P(VDF-TrFE)) (Precision Acoustics. Needle Hydrophones. URL: <https://www.acoustics.co.uk/product-category/pressure-measurement/needle-hydrophones> (date of issues: 19.12.2019)), Toray Industries. Product and Services. Ultrasonic sensors. Hydrophone. URL: [https://www.toray-eng.com/products/measuring/mea\\_032.html](https://www.toray-eng.com/products/measuring/mea_032.html) (дата обращения: 19.12.2019)). Для первичной калибровки плёночного гидрофона методами лазерной интерферометрии измеряют колебательную скорость мембраны гидрофона, а для первичной калибровки многослойного оптического гидрофона – изменение толщины слоёв, которые используют как интерферометр, «встроенный» в оптический гидрофон.

При расширении ультразвукового диапазона ГЭТ 55-2017 прежде всего необходимо определить, до каких частот необходимо измерять амплитуду и фазу чувствительности ультразвукового гидрофона, чтобы удовлетворить современные запросы промышленности и науки. Должны быть решены такие сложные научно-технические задачи, как изготовление эталонных плёночных и многослойных оптических гидрофонов, использование в эталоне методов лазерной интерферометрии, разработка методик калибровки, согласованных с методами измерений.

## Список литературы

1. Лекомцев В. Н., Торгунаков А. В., Титаренко Д. В., Смирнов В. К. Технология изготовления 3D-звуковизора для съемки вертикальных стенок в мутной воде с применением электронно-механического сканирования с дистанции до 100 метров // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2017. № 3-3. С. 72–76.
2. Лекомцев В. Н., Титаренко Д. В. Современные средства подводного звуковидения // *Современные технологии автоматизации*. 2011. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/441553.pdf> (дата обращения: 19.12.2019).
3. Исаев А. Е., Матвеев А. Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберационном бассейне // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55. № 6. С. 727–736.
4. Stephen P. Robinson, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 120, no. 3, pp. 1366–1373. DOI: 10.1121/1.2228790
5. Маларкоди А., Лата Г., Атмананд М. А., Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Щерблюк Н. Г., Манн Ф., Янсен С., Милкерт Д. Межлабораторные сличения эталонов в области гидроакустических измерений в частотном диапазоне 3–500 кГц // *Измерительная техника*. 2016. № 1. С. 69–72.
6. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Поликарпов А. М., Щерблюк Н. Г. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // *Измерительная техника*. 2013. № 6. С. 56–59.
7. Щерблюк Н. Г. Модернизация эталонной установки ГЭТ 55-2011 в части фазовой калибровки гидрофонов // *Технические проблемы освоения мирового океана*. 2015. Т. 6. С. 246–250.
8. Hayman G., Robinson S., *Proceeding of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444.
9. Ultrasound Hydrophone calibration, available at: <https://www.npl.co.uk/products-services/ultrasound/hydrophone-calibration> (accessed: 19.12.2019).

10. Radulescu E. G., Lewin P. A., Wójcik J., Nowicki A., *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, no. 4, pp. 247–254. DOI: 10.1016/S0041-624X(03)00123-9

## References

1. Lekomtsev V. N., Torgunakov A. V., Titarenko D. V., Smirnov V. K., *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii*, 2017, no. 3-3. pp. 72–76 (in Russian).
2. Lekomtsev V. N., Titarenko D. V., *Contemporary Technologies in Automation*, 2011, available at: <https://www.cta.ru/cms/f/441553.pdf> (accessed: 19.12.2019).
3. Isaev A. E., Matveev A. N., *Akusticheskii zhurnal*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 727–736 (in Russian).
4. Stephen P. Robinson, *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, vol. 120, no. 3, pp. 1366–1373. DOI: 10.1121/1.2228790
5. Malarkodi A., Latha G., Atmanand M. A., Isaev A. E., Matveev A. N., Shcherbliuk N. G., Mann F., Jansen C., Milkert D., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 99–103. DOI: 10.1007/s11018-016-0924-2
6. Isaev A. E., Matveev A. N., Polikarpov A. M., Shcherbliuk N. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 706–711. DOI: 10.1007/s11018-013-0269-z
7. Shcherbliuk N. G., *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana*, 2015, vol. 6, pp. 246–250 (in Russian).
8. Hayman G., Robinson S., *Proceeding of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*, Edinburgh, 2012, pp. 1437–1444.
9. Ultrasound Hydrophone calibration, available at: <https://www.npl.co.uk/products-services/ultrasound/hydrophone-calibration> (accessed: 19.12.2019).
10. Radulescu E. G., Lewin P. A., Wójcik J., Nowicki A., *Ultrasonics*, 2003, vol. 41, no. 4, pp. 247–254. DOI: 10.1016/S0041-624X(03)00123-9

Дата поступления: 14.01.2020.

Дата принятия: 14.02.2020.

## The standard facility for the transmission the unit of sound pressure at ultrasonic frequencies

Alexander E. Isaev, Alexander M. Polikarpov, Stanislav V. Sil'vestrov, Nikolai G. Shcherbliuk

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: [isaev@vniiftri.ru](mailto:isaev@vniiftri.ru), [a\\_polycarpov@vniiftri.ru](mailto:a_polycarpov@vniiftri.ru), [ssilv@vniiftri.ru](mailto:ssilv@vniiftri.ru), [shcherbliuk@mail.ru](mailto:shcherbliuk@mail.ru)

Information is provided on a standard facility for calibrating hydrophones at frequencies from 100 kHz to 3 MHz, which created to expand the frequency range of the State primary standard GET 55-2017 to the area of high-frequency ultrasound. The actuality of the standard facility creation is justified. The possibilities of measurements and operation principles of the facility are briefly reviewed. The requirements to the characteristics of ultrasonic transducers are discussed. When selecting standard transducers, priority was given to their temporal stability, since the unevenness of the transducer frequency response is not of fundamental importance when calibrating using a tone signal. To reduce the influence of directivity, a precision four-coordinate positioning system of transducers applies, which including the control of transducers mutual position using laser beam. Attention is paid to the problems related with the mastering of higher frequencies.

**Key words:** underwater acoustic, high-frequency ultrasound, standard facility, calibration, hydrophone.

## **Разработка стандартных образцов состава растворов пропиловых спиртов**

**И. А. Питерских<sup>1</sup>, С. В. Вихрова<sup>1</sup>, Н. Г. Ковалева<sup>2</sup>, Т. О. Баринская<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Российская Федерация, e-mail: piterskikh@vniims.ru, svikhrova@vniims.ru

<sup>2</sup>ООО «ЭКРОСХИМ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kovaleva@ecohim.ru

<sup>3</sup>Московский научно-практический центр наркологии Департамента здравоохранения Москвы, Москва, Российская Федерация, e-mail: barto1605@yahoo.com

*Стандартные образцы состава растворов пропанола-1 (ГСО 11383-2019) и пропанола-2 (ГСО 11384-2019) разработаны для оценки и контроля показателей качества референтной методики измерений массовой концентрации токсикантов (спиртов) в биологических объектах (моче, крови) и воде. Изучены два способа установления значения аттестуемой характеристики стандартного образца – массовой концентрации соответственно пропанола-1 или пропанола-2. Результаты, полученные по расчётно-экспериментальной процедуре приготовления и методом сравнения с эталоном, совпали в пределах погрешности.*

**Ключевые слова:** стандартные образцы, пропанол-1, пропанол-2, аттестованное значение, прослеживаемость, процедура приготовления, эталон сравнения.

**Введение.** Ключевая роль стандартных образцов (СО) состава веществ и материалов в обеспечении единства и достоверности физико-химических измерений является несомненной. Вопросами, связанными с разработкой и применением СО, занимаются более 25 международных организаций на всех континентах [1]. В России интенсивная разработка СО началась с 1980-х гг. [2–5]. В настоящее время в Государственном реестре числятся около девяти тысяч действующих типов СО, однако среди них только около 220 типов СО состава растворов органических веществ, при этом две трети из них разработаны до 2000 г. Это катастрофически маленькая номенклатура и печальная тенденция с учетом того, что СО состава чистых веществ и СО состава растворов являются наиболее универсальными по применению, а число токсичных органических веществ, содержащихся в продуктах питания и окружающей среде, в сотни раз больше, чем неорганических. Одной из многих причин сложившейся ситуации является, конечно, сложность разработки и изготовления таких СО [3–7].

Вопрос о разработке СО состава водных растворов пропанола-1 и пропанола-2 (СО-1, СО-2) возник при разработке референтной методики измерений массовой концентрации токсикантов (спиртов) в биологических объектах [8, 9]. Такие СО, необходимые для градуировки хроматографов, аттестации методики измерений и контроля погрешности результатов измерений, в Российской Федерации на момент разработки методики не выпускались.

**Постановка задачи.** Аттестуемой характеристикой указанных СО является массовая концентрация определяемого компонента, в данном случае пропилового и изопропилового

спиртов. Относительная погрешность результатов измерения массовой концентрации этих спиртов в воде, моче и крови в основном диапазоне измерений методики не превышает 6 % (Свидетельство об аттестации референтной методики измерений № 205-12/RA.RU.311787/2019), следовательно, относительная погрешность аттестованных значений не должна превышать 2 %. В лабораторных условиях достаточно трудно приготовить небольшие объёмы растворов с такой погрешностью даже из СО состава чистых веществ, учитывая их высокую летучесть и фазовое состояние. Таким образом, возникла необходимость разработать СО состава водных растворов пропиловых спиртов со следующими метрологическими характеристиками: аттестуемая характеристика – массовая концентрация пропанола-1 или пропанола-2; интервал допускаемых аттестованных значений 3,5–4,5 г/дм<sup>3</sup>; границы допускаемого значения относительной погрешности аттестованного значения СО  $\pm 1$  % (при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ).

Основной задачей при установлении аттестованного значения является соблюдение условий прослеживаемости, т. е. соотнесение значения аттестуемой характеристики СО с принятыми реперами и оценивание вклада от неопределённостей этих реперов в неопределённость, обусловленную характеристикой материала СО, согласно МИ 3174-2009 «ГСИ. Стандартные образцы материалов (веществ). Установление прослеживаемости аттестованных значений».

Цели настоящей работы:

разработка и изготовление первых партий вышеуказанных СО с метрологическими характеристиками, соответствующими нормированным значениям;

сравнение двух методов установления аттестованных значений СО: расчётно-экспериментального метода по процедуре приготовления и метода передачи единиц измерений от эталонов сравнения.

**Определение метрологических характеристик СО по процедуре приготовления.** Метрологические характеристики растворов органических веществ из-за отсутствия эталонов сравнения чаще всего устанавливают именно расчётно-экспериментальным методом по процедуре приготовления [10]. Прослеживаемость аттестованных значений в этом случае обеспечивается использованием поверенных средств измерений (СИ), мер вместимости и исходного вещества с установленными метрологическими характеристиками. Метрологические характеристики исходного вещества (при их отсутствии) следует устанавливать в соответствии с РМГ 55-2003 «ГСИ. Стандартные образцы состава органических веществ. Методы аттестации. Основные положения». Этот документ распространяется на СО состава чистых органических веществ (за исключением полимеров и сложных природных соединений некоторых классов), находящихся в конденсированном состоянии и содержащих не менее 98 % основного компонента. В РМГ 55-2003 наряду с прямым методом (непосредственные измерения содержания основного вещества) рекомендовано использовать косвенный метод, основанный на измерениях содержания примесей и последующем вычислении содержания основного компонента.

Для реализации первого метода была разработана и аттестована методика измерений массовой доли каждой примеси легколетучих спиртов и кетонов в метаноле, этаноле, пропанол-1, пропанол-2, бутаноле-2, ацетоне и метилэтилкетоне газохроматографическим методом ЭК 045-2019 (Свидетельство об аттестации методики измерений № 205-13/RA.RU.311787/2019, выдано ВНИИМС), порядковый номер регистрации в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений ФР.1.31.2019.34921. Массовые доли примесей в метаноле, этаноле, пропанол-1, пропанол-2, бутаноле-2, ацетоне и метилэтилкетоне (МЭК) измеряют на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором (ПИД) методом внутреннего стандарта. В качестве внутреннего стандарта может быть использовано любое вещество из перечисленных выше, кроме веществ-примесей. При обработке результатов измерений учитывают экспериментально установленные коэффициенты чувствительности ПИД к различным примесям (спиртам и кетонам) по отношению к внутреннему стандарту. Примесные компоненты идентифицируют по относительным временам удерживания и данным хромато-масс-спектрометрического анализа.

Для определения градуировочных коэффициентов приготовили две градуировочные смеси приблизительно одинакового состава. На рис. 1 приведена хроматограмма градуировочной смеси семи веществ (ацетона, метанола, МЭК, пропанол-1, пропанол-2, этанола, бутанола-2). В табл. 1

Таблица 1

Характеристики градуировочных смесей

| Вещество   | $m$ , г | $Q_{mk}$ , % | Пропанол-1  |                                  | Пропанол-2  |                                  |
|------------|---------|--------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|
|            |         |              | $\bar{K}_m$ | $S_{\bar{K}_m}^{\text{отн}}$ , % | $\bar{K}_m$ | $S_{\bar{K}_m}^{\text{отн}}$ , % |
| Ацетон     | 4,4234  | 14,650       | 0,68        | 0,8                              | 0,85        | 0,4                              |
| Метанол    | 4,3721  | 14,480       | 1,45        | 0,6                              | 1,79        | 0,3                              |
| МЭК        | 4,3326  | 14,349       | 0,64        | 0,4                              | 0,80        | 0,9                              |
| Пропанол-2 | 4,2304  | 14,011       | 0,81        | 0,9                              | 1,00        | -                                |
| Этанол     | 4,1592  | 13,775       | 1,24        | 0,4                              | 1,54        | 0,2                              |
| Бутанол-2  | 4,3772  | 14,497       | 0,80        | 0,4                              | 1,00        | 1,4                              |
| Пропанол-1 | 4,2986  | 14,237       | 1,00        | -                                | 1,25        | 0,5                              |
| Смесь      | 30,1935 | 100,000      | -           | -                                | -           | -                                |

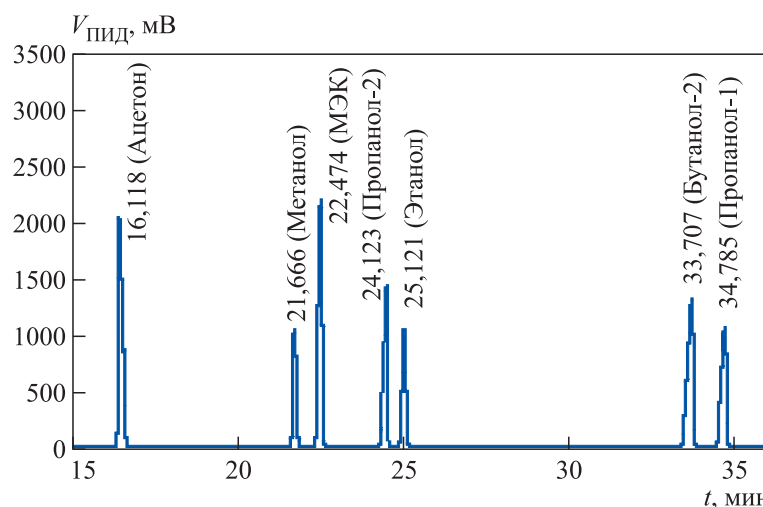


Рис. 1. Хроматограмма градуировочной смеси ацетона, метанола, МЭК, пропанол-1, пропанол-2, этанола, бутанола-2

Fig. 1. Chromatogram of the calibration mixture of acetone, methanol, MEK, propanol-1, propanol-2, ethanol, butanol-2

указаны состав градуировочной смеси и результаты определения относительных градуировочных коэффициентов  $\bar{K}_m$ .

Хроматограммы обработаны с помощью автоматизированной системы по следующему алгоритму:

вычисляют результат единичного определения коэффициента чувствительности ПИД для каждого определяемого вещества по отношению к внутреннему стандарту:

$$K_{mkn} = (Q_{mk}/Q_{\text{ст } k})(A_{\text{ст } kn}/A_{mkn}), \quad (1)$$

где  $Q_{mk}$  — массовая доля  $m$ -го вещества в  $k$ -й градуировочной смеси;  $Q_{\text{ст } k}$  — массовая доля внутреннего стандарта (пропанол-1 или пропанол-2) в  $k$ -й градуировочной смеси;

$A_{mkn}$ ,  $A_{ст kn}$  – площади пиков соответственно определяемого вещества и внутреннего стандарта на  $n$ -й хроматограмме в  $k$ -й градуировочной смеси;

рассчитывают среднее значение из пяти ( $N=5$ ) относительного коэффициента чувствительности для каждого определяемого вещества в каждой градуировочной смеси:

$$\bar{K}_{mk} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 K_{mkn}; \quad (2)$$

вычисляют среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего результата измерений  $\bar{K}_{mk}$  для каждой  $k$ -й градуировочной смеси:

$$S_{K_{mk}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^5 (K_{mkn} - \bar{K}_{mk})^2}{(N-1)}}; \quad (3)$$

проверяют гипотезу о равнорасеянности полученных групп результатов измерений (однородности дисперсий) по критерию Фишера:

$$F = S_1^2 / S_2^2. \quad (4)$$

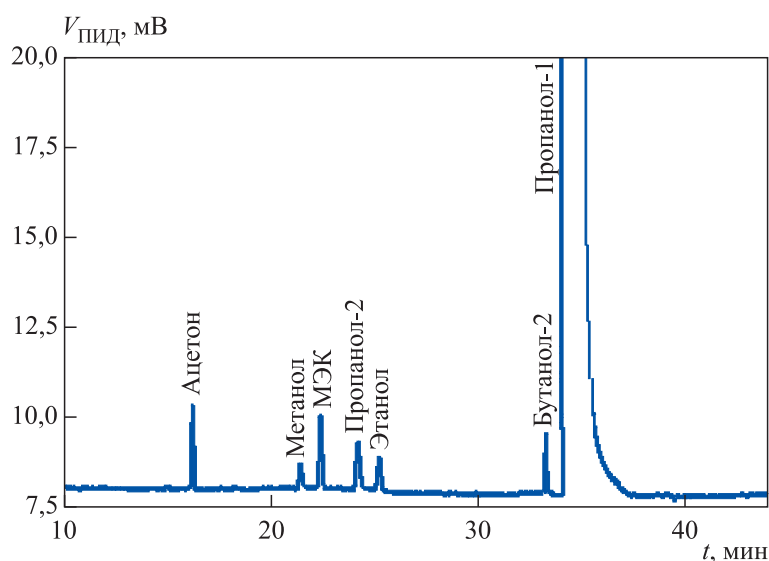


Рис. 2. Хроматограмма искусственной смеси пропанола-1 с массовой долей каждой примеси 0,01 %

Fig. 2. Chromatogram of an artificial mixture of propanol-1 with a mass fraction of each impurity 0,01 %

Таблица 2

Метрологические характеристики методики ЭК 045-2019

| Диапазон измерений $Q_{mk}$ , % | $\pm \delta$ , %, ( $P=0,95$ ) | $\sigma_r^{\text{отн}}$ , % | $S^{\text{отн}}$ , % | $CR_{0,95}(10)$ , % |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|
| От 0,01 до 0,10 включ.          | 30                             | 5                           | 1,6                  | 22                  |
| Св. 0,10 до 0,30 включ.         | 20                             | 3                           | 0,9                  | 13                  |
| Св. 0,30 до 0,50 включ.         | 10                             | 3                           | 0,9                  | 13                  |

При  $n_1=n_2=5$  табличное значение критерия Фишера  $F_m=6,39$  [11]. Если результаты измерений признаны равнорасеянными, т. е.  $F \leq F_T$ , то среднее значение коэффициента чувствительности, СКО и относительное СКО рассчитывают по формулам соответственно:

$$\bar{K}_m = \sum_{k=1}^2 K_{km} / 2; \quad (5)$$

$$S_{\bar{K}_m} = \sum_{k=1}^2 S_{km} / 2; \quad (6)$$

$$S_{\bar{K}_m}^{\text{отн}} = S_{\bar{K}_m} / \bar{K}_m \cdot 100. \quad (7)$$

Условия хроматографирования:

колонок хроматографическая кварцевая капиллярная CP-WAX 52 CB длиной 60 м, диаметром 0,32 мм, толщиной слоя 1,2 мкм;

газ-носитель – азот, расход через колонку 1 мл/мин, сброс 50 мл/мин, поддув в детектор 30 мл/мин; водород 30 мл/мин; воздух 300 мл/мин; температура термостата колонок поддерживается равной 60 °С в течение 25 мин; подъём температуры до 150 °С со скоростью 5 °С/мин, температура испарителя 140 °С, температура детектора 150 °С;

объём вводимой пробы 1,0 мкл.

Для установления показателей качества разработанной методики в соответствии с РМГ 61-2010 «ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки» был приготовлен набор образцов для оценки (ОО), состоящий из пяти искусственных смесей пропанола-1 и пропанола-2 с другими примесными компонентами во всём диапазоне измерений (массовая доля каждой примеси 0,01–0,50 %). Для приготовления смесей использовали высокочистые вещества (Merk, Германия). На рис. 2 представлена хроматограмма одной искусственной смеси пропанола-1 со спиртами и кетонами. Как и предполагалось, максимальные относительные погрешности соответствуют самым летучим из использованных веществ: ацетону и метанолу. Эти значения погрешностей и их составляющих были распространены на результаты измерений содержания всех остальных компонентов. Метрологические характеристики методики представлены в табл. 2, где  $\pm \delta$  – границы относительной погрешности результатов измерений при доверительной вероятности 0,95;  $\sigma_r^{\text{отн}}$  – показатель (относительное СКО) повторяемости;  $S^{\text{отн}}$  – относительное СКО среднего значения;  $CR_{0,95}(10)$  – критический диапазон (относительное значение допускаемого расхождения между максимальным и минимальным значением результатов измерений); диапазоны измерений массовой доли относятся ко всем примесным компонентам смеси.

Затем для определения массовой доли примесей в пропанол-1 и пропанол-2 приготавливали смеси пропанола-1 и пропанола-2 с внутренним стандартом, в качестве которого в первом случае использовали пропанол-2, а во втором – пропанол-1. Приготовленные смеси проанализировали в соответствии с методикой измерений ЭК 045-2019 в тех же условиях. На хроматограмме пропанола-1 (рис. 3, а) обнаружено две примеси: бутанола-2 и неидентифицированного вещества, а на хроматограмме пропанола-2 обнаружена только одна неидентифицированная примесь. Пример хроматограммы пропанола-1 с внутренним стандартом приведен на рис. 3, б.

Результат единичного измерения массовой доли ( $X_{mn}$ , %)  $m$ -го примесного компонента на  $n$ -й хроматограмме рассчитывали по формуле

$$X_{mn} = A_{mn} \bar{K}_{m1} C_{ст} / A_{ст n}, \quad (8)$$

где  $A_{mn}$ ,  $A_{ст n}$  – площади хроматографических пиков соответственно примесного  $m$ -го компонента и внутреннего стандарта на  $n$ -й хроматограмме;  $\bar{K}_{m1}$  – среднее значение коэффициента чувствительности ПИД к соответствующему примесному  $m$ -му компоненту относительно внутреннего стандарта из табл. 1 (для не идентифицированных примесей приняли  $\bar{K}_{m1}=1$ );  $C_{ст}$  – массовая доля внутреннего стандарта.

Площади пиков внутреннего стандарта и примесей, а также рассчитанные значения массовой доли  $X_{mn}$  каждой примеси в пропанол-1 и пропанол-2 приведены в табл. 3, 4, где  $t_R$  – время удерживания;  $N_{xp}$  – номер хроматограммы.

Согласно табл. 3 содержание неидентифицированной примеси в пропанол-1 меньше нижней границы диапазона измерений методики ЭК 045-2019, массовая доля бутанола-2 в пропанол-1 составляет  $0,020 \pm 0,006$  % при  $P=0,95$ . В соответствии с РМГ 55-2003 массовая доля основного компонента составляет 99,9 %, а погрешность массовой доли основного компонента с вероятностью 0,95 не превышает  $\pm 0,1$  %. Согласно табл. 4 массовая доля неидентифицированной примеси в пропанол-2 менее нижней границы диапазона измерений методики ЭК 045-2019, в соответствии с РМГ 55-2003 содержание основного компонента (массовая доля) находится в диапазоне 99,9–100,0 %, а погрешность массовой доли основного компонента с вероятностью 0,95 составляет  $\pm 0,1$  %.

Для изготовления партий СО-1 и СО-2 из пропанола-1 и пропанола-2, соответственно, была разработана методика, которая регламентирует весь технологический процесс изготовления СО: требования к исходным веществам; подготовку исходных веществ; анализ, условия хранения, процедуру приготовления и аттестации СО; фасовку, упаковку, транспортирование и хранение СО.

Аттестуемая характеристика СО нормирована диапазоном значений массовой концентрации. Это связано с тем,

Таблица 3

Результаты анализа пропанола-1

| $N_{xp}$                                                                               | Пропанол-2<br>( $t_R = 25,4$ мин) | Бутанол-2<br>( $t_R = 34,37$ мин) |              | Неидентифицированное<br>вещество ( $t_R = 39,06$ мин) |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|
|                                                                                        | $A_{ст n}$                        | $A_{mn}$                          | $X_{mn}$ , % | $A_{mn}$                                              | $X_{mn}$ , % |
| 1                                                                                      | 109,359                           | 23,536                            | 0,0209       | 6,381                                                 | 0,0057       |
| 2                                                                                      | 119,118                           | 25,818                            | 0,0211       | 6,933                                                 | 0,0057       |
| 3                                                                                      | 112,888                           | 22,405                            | 0,0193       | 6,896                                                 | 0,0059       |
| 4                                                                                      | 126,258                           | 24,104                            | 0,0186       | 7,296                                                 | 0,0056       |
| 5                                                                                      | 112,640                           | 24,242                            | 0,0209       | 6,572                                                 | 0,0057       |
| 6                                                                                      | 117,927                           | 25,560                            | 0,0211       | 6,864                                                 | 0,0057       |
| 7                                                                                      | 117,404                           | 23,301                            | 0,0193       | 7,172                                                 | 0,0059       |
| 8                                                                                      | 123,733                           | 23,622                            | 0,0186       | 7,350                                                 | 0,0058       |
| 9                                                                                      | 115,544                           | 25,043                            | 0,0211       | 6,725                                                 | 0,0057       |
| 10                                                                                     | 113,733                           | 24,477                            | 0,0209       | 6,736                                                 | 0,0058       |
| Среднее значение $\bar{X}_{mn}$                                                        |                                   |                                   | 0,0200       | –                                                     | 0,0057       |
| Относительное расхождение $R$<br>максимального и минимального<br>результатов измерений |                                   |                                   | 13           | –                                                     | 5            |

Таблица 4

Результаты анализа пропанола-2

| $N_{xp}$                        | Пропанол-1<br>( $t_R = 34,39$ мин) | Неидентифицированное<br>вещество ( $t_R = 33,35$ мин) |              |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------|
|                                 | $A_{ст n}$                         | $A_{mn}$                                              | $X_{mn}$ , % |
| 1                               | 197,100                            | 15,893                                                | 0,0082       |
| 2                               | 254,956                            | 20,271                                                | 0,0080       |
| 3                               | 220,916                            | 17,477                                                | 0,0080       |
| 4                               | 196,013                            | 15,824                                                | 0,0082       |
| 5                               | 189,757                            | 15,194                                                | 0,0081       |
| 6                               | 234,560                            | 18,649                                                | 0,0080       |
| 7                               | 197,347                            | 15,802                                                | 0,0081       |
| 8                               | 203,013                            | 16,370                                                | 0,0082       |
| 9                               | 231,962                            | 18,351                                                | 0,0080       |
| 10                              | 215,795                            | 17,157                                                | 0,0080       |
| Среднее значение $\bar{X}_{mn}$ |                                    |                                                       | 0,0081       |

что в отличие от твёрдых веществ, сложно взять навеску определённой массы легколетучего жидкого вещества. Однако для градуировки крайне неудобно использовать растворы с массовой

концентрацией, значение которой является не целым числом, а выражается несколькими значащими цифрами. Поэтому при приготовлении СО-1, СО-2 с целью получения аттестованного значения, равного 4,0 г/дм<sup>3</sup>, применены дозаторы (ООО «ЭКРОСХИМ», Россия), которые позволяют дозировать жидкое вещество до нужной массы. Оптимальная процедура приготовления СО была выбрана по результатам анализа растворов, приготовленных тремя способами, путём варьирования навесок и объёмов мерных колб.

Массу  $m$  навески пропанола-1 или пропанола-2 рассчитывают по формуле

$$m = CV/A \cdot 100, \quad (9)$$

где  $C = 4$  г/дм<sup>3</sup> – массовая концентрация пропанола-1 или пропанола-2 в растворе;  $V$  – объём раствора;  $A = 99,9$  % – массовая доля основного вещества в пропаноле-1 или пропаноле-2.

Доверительные границы относительной погрешности  $\delta$  действительного значения массовой концентрации пропанола-1 (пропанола-2) в приготовленных растворах рассчитаны по формуле

$$\delta = 110 \sqrt{2(\Delta m/m)^2 + (\Delta A/A)^2 + (\beta/C)^2 + (\Delta V/V)^2}, \quad (10)$$

где  $\Delta m = 0,00025$  г – погрешность весов, используемых для взвешивания навески;  $m = 2,00200$  г – масса навески пропанола-1 (пропанола-2);  $\Delta A = 0,1$  % – погрешность массовой доли основного вещества в пропаноле-1 или пропаноле-2;  $\beta = 0,01$  г/дм<sup>3</sup> – предел обнаружения пропанола-1 или пропанола-2 в воде, рассчитанный, как  $3\sigma_R$  ( $\sigma_R$  – показатель воспроизводимости референтной методики);  $V = 500$  см<sup>3</sup> – объём мерной колбы;  $\Delta V = 0,5$  см<sup>3</sup> – погрешность мерной колбы.

Полученное значение относительной погрешности  $\delta = \pm 0,5$  % показывает, что при соблюдении всех регламентированных условий данная методика обеспечивает выпуск партий СО-1 и СО-2 с метрологическими характеристиками, действительные значения которых соответствуют значениям, нормированным в техническом задании.

#### Определение метрологических характеристик СО с помощью эталонов сравнения.

Для реализации второго метода использованы эталоны сравнения пропанола-1 (Хд 2.840.029-12/СЗН8О-1-2018 и пропанола-2 (Хд 2.840.029-13/СЗН8О-2-2018), изготовленные и аттестованные во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Метрологические характеристики эталонов сравнения (табл. 5, где расширенная неопределённость  $U$  аттестованного значения массовой доли  $A$  соответствует границам суммарной погрешности при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ) установлены методом косвенных измерений (в соответствии с РМГ 55-2003) с применением Государственного первичного эталона (ГЭТ 208-2014) единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации органических компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе жидкостной и газовой хромато-масс-спектрометрии с изотопным разбавлением и гравиметрии [12].

Прослеживаемость аттестованных значений СО-1 и СО-2 к ГЭТ 208-2014 была установлена в соответствии с МИ 3174-2009 с использованием метода градуировки по двум стандартным образцам с разными аттестованными значениями массовой доли. Для этого из эталонов сравнения были приготовлены растворы (ЭР) с массовой концентрацией пропанола-1 или пропанола-2 в воде 3 и 5 г/дм<sup>3</sup>, соответственно по процедуре приготовления, аналогичной процедуре приготовления СО-1 и СО-2. Метрологические характеристики вычислены по формулам (9), (10), относительная погрешность массовой концентрации растворов, приготовленных из эталонов сравнения (ЭР), не превышает  $\pm 0,2$  %.

Анализ ЭР и аттестуемых СО-1 и СО-2, приготовленных тремя способами, выполняли на газовом хроматографе

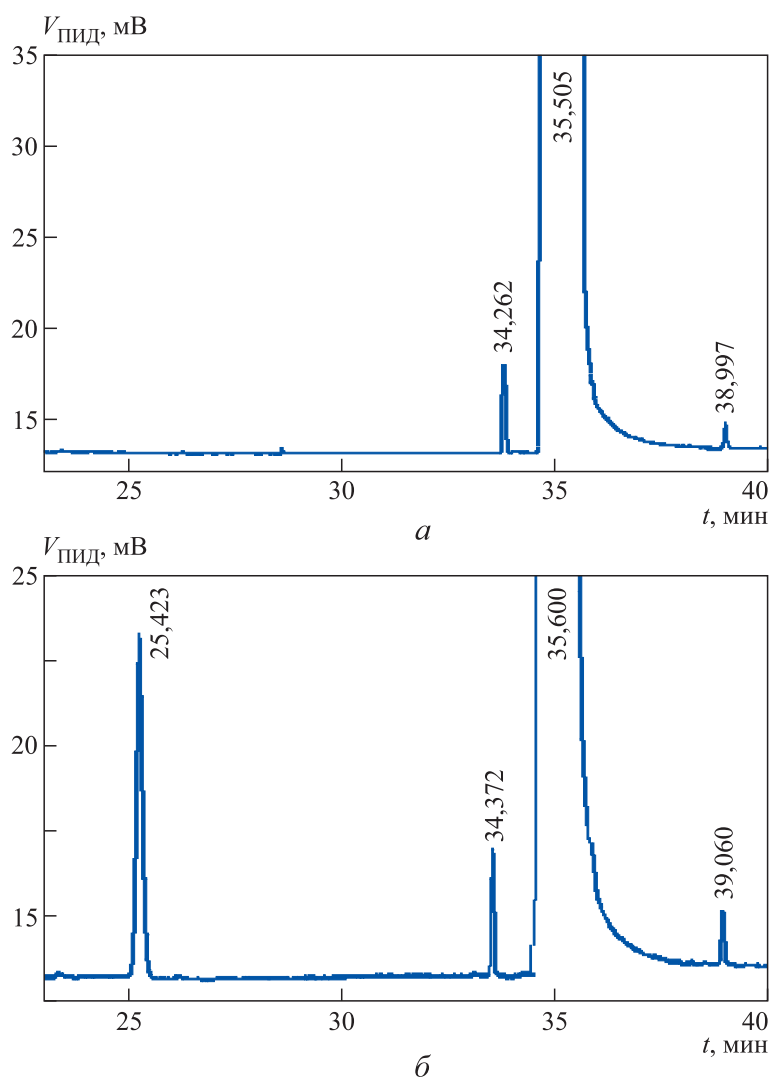


Рис. 3. Хроматограммы пропанола-1 без внутреннего стандарта (а) и с внутренним стандартом (б)

Fig. 3. Propanol-1 chromatograms without internal standard (a) and with internal standard (b)

Таблица 5

Метрологические характеристики эталонов сравнения

| Эталон сравнения             | Аттестованная характеристика | A, %   | U (k=2), % |
|------------------------------|------------------------------|--------|------------|
| Хд 2.840.029-12/СЗН8О-1-2018 | Массовая доля пропанола-1    | 99,72  | 0,02       |
| Хд 2.840.029-13/СЗН8О-2-2018 | Массовая доля пропанола-2    | 99,856 | 0,002      |

Таблица 6

Метрологические характеристики СО-1 и СО-2

| Колонка | СО   | СП | $S_{cp\ 9}, г/дм^3$ | $U_{prec}, г/дм^3$ | $U_{tr}, г/дм^3$ | $U_{c, char}, г/дм^3$ | $U_{c, char}, \%$ |
|---------|------|----|---------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|
| А       | СО-1 | 1  | 0,0177              | 0,0355             | 0,0078           | 0,0363                | 0,91              |
|         |      | 2  | 0,0141              | 0,0281             | 0,0078           | 0,0292                | 0,73              |
|         |      | 3  | 0,0117              | 0,0235             | 0,0078           | 0,0248                | 0,62              |
|         | СО-2 | 1  | 0,0137              | 0,0274             | 0,0077           | 0,0285                | 0,71              |
|         |      | 2  | 0,0125              | 0,0251             | 0,0077           | 0,0262                | 0,66              |
|         |      | 3  | 0,0164              | 0,0328             | 0,0078           | 0,0337                | 0,84              |
| В       | СО-1 | 1  | 0,0177              | 0,0355             | 0,0078           | 0,0363                | 0,91              |
|         |      | 2  | 0,0140              | 0,0280             | 0,0078           | 0,0291                | 0,73              |
|         |      | 3  | 0,0118              | 0,0236             | 0,0078           | 0,0248                | 0,62              |
|         | СО-2 | 1  | 0,0137              | 0,0273             | 0,0077           | 0,0284                | 0,71              |
|         |      | 2  | 0,0126              | 0,0251             | 0,0077           | 0,0263                | 0,66              |
|         |      | 3  | 0,0164              | 0,0328             | 0,0077           | 0,0337                | 0,84              |

с двумя ПИД и двумя хроматографическими капиллярными колонками, имеющими разную полярность жидкой фазы. Для ввода проб методом равновесной паровой фазы с термостатированием использовали автоматический парофазный пробоотборник. Условия анализа: объём вводимой газовой фазы (объём петли) 1 см<sup>3</sup>; температура инжектора 110 °С; температура термостата колонок 40 °С; температура детектора 250 °С; расход газа-носителя (азот) 6,6–6,7 см<sup>3</sup>/мин; время анализа 4 мин.

Каждый из растворов вводили попеременно в хроматограф по 10 раз при указанных условиях. Выходные сигналы (площади хроматографических пиков, рА·с) на хроматограммах ЭР и аттестуемых СО-1 и СО-2 обрабатывали в соответствии с алгоритмом 8.3 МИ 3174-2009. Полученные значения метрологических характеристик СО состава растворов пропанола-1 (СО-1) и пропанола-2 (СО-2) представлены в табл. 6, где СП – способ приготовления;  $S_{cp\ 9}$  – стандартное отклонение среднего отношения выходных сигналов;  $U_{prec}$ ,  $U_{tr}$  – стандартные неопределённости, обусловленные прецизионностью и используемыми реперами, соответственно;  $U_{c, char}$  – суммарная стандартная неопределённость от характеристики.

**Анализ результатов.** Значения аттестуемой характеристики СО, установленные по процедуре приготовления и сравнением с эталонами, практически совпали в пределах погрешности. Погрешность СО-2 несколько выше, чем погрешность СО-1, что может быть обусловлено более высокой летучестью пропанола-2 по сравнению с пропанолом-1 (температура кипения пропанола-2 составляет 82,4 °С, что на 15 °С ниже температуры кипения пропанола-1). Отметим, что при установлении аттестованных значений СО расчётно-экспериментальным методом по процедуре приготовления необходимо учитывать все свойства используемых веществ.

Однородность СО-1 и СО-2 как растворов является очевидной и не исследовалась. Стабильность не изучалась. Установлен минимальный срок годности 1 год, соответствующий срокам годности аналогичных СО состава растворов метанола и этанола.

**Заключение.** Разработанная методика приготовления обеспечивает изготовление СО с метрологическими характеристиками, соответствующими нормированным в техническом задании, что позволит выпускать следующие партии СО. Корректное использование расчётно-экспериментальной процедуры приготовления позволяет получить аттестованные значения СО с такой же точностью, как и при использовании эталонов сравнения. Разработанные СО-1 и СО-2 внесены в Государственный реестр утверждённых типов СО: СО состава раствора пропанола-1 № 11383-2019; СО состава раствора пропанола-2 № 11384-2019.

#### Список литературы

- Осинцева Е. В., Медведевских С. В., Кремлева О. Н., Студенок В. В., Анфилатова О. В., Баратова Н. С. Мировые тенденции в области стандартных образцов и концепция развития Государственной службы стандартных образцов (Часть I) // Стандартные образцы. 2014. № 1. С. 6–26.
- Питерских И. А. Обеспечение прослеживаемости при выборе средств поверки для СИ физико-химического состава и свойств // Главный метролог. 2007. № 5. С. 26–28.
- Питерских И. А. Методы аттестации СО органических токсикантов // Измерительная техника. 1998. № 11. С. 68–71.
- Питерских И. А., Добровинский И. Е. Нормативное обеспечение разработки стандартных образцов состава чистых органических веществ // Измерительная техника. 1999. № 11. С. 62–63.
- Питерских И. А., Кириченко В. Е., Первова М. Г., Кандакова В. В. Разработка государственного стандартного образца состава раствора совола // Заводская лаборатория. 2001. Т. 67. № 8. С. 63–66.
- Будко А. Г., Михеева А. Ю., Крылов А. И. Метрологическое обеспечение измерения содержания диоксинов. Стандартный образец массовой доли диоксинов в животном жире // Стандартные образцы. 2018. Т. 14. № 3–4. С. 17–32.

7. Шохина О. С., Медведевских М. Ю., Крашенинина М. П. и др. Разработка государственного вторичного эталона и стандартных образцов состава на основе газовой и жидкостной хроматографии // Стандартные образцы. 2017. Т. 13. № 1. С. 9–26.
8. Вихрова С. В., Рутенберг О. Л., Баринская Т. О. Разработка референтной методики измерений массовой концентрации токсикантов в биологических объектах // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «МЕТРОЛОГИЯ-2019», Минск, 27–28 марта 2019 г., Минск: БелГим, 2019. С. 265–269.
9. Вихрова С. В., Рутенберг О. Л., Баринская Т. О. Измерение содержания токсикантов в биологических объектах. Опыт проведения аттестации методик измерений в области токсикологии // Сборник материалов III Международной научно-технической конференции «Метрология физико-химических измерений», Менделеево, Московская область, 9–11 октября 2018, Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018.
10. Налобин Д. П., Осинцева Е. В. Стандартные образцы состава веществ: аттестация по процедуре приготовления // Стандартные образцы. 2006. № 2. С. 9–17.
11. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М: Изд-во стандартов, 1972. 306 с.
12. Крылов А. И., Михеева А. Ю., Ткаченко И. Ю. Контроль органических компонентов. Обеспечение прослеживаемости результатов измерений // Контроль качества продукции. 2017. № 11. С. 12–17.

#### References

1. Osintseva E. V., Medvedevskikh S. V., Kremleva O. N., Studenok V. V., Anfilatova O. V., Baratova N. S., *Reference materials*, 2014, no. 1, pp. 6–26.

2. Piteriskikh I. A., *Glavny Metrolog*, 2007, no. 5, pp. 26–28 (in Russian).
3. Piteriskikh I. A., *Measurement Techniques*, 1998, vol. 41, no. 11, pp. 1085–1088. DOI: 10.1007/BF02503879
4. Piteriskikh I. A., Dobrovinsky I. E., *Measurement Techniques*, 1999, vol. 42, no. 11, pp. 1094–1096. DOI: 10.1007/BF02504311
5. Piteriskikh I. A., Kirichenko V. E., Pervova M. G., Kandakova V. V., *Zavodskay laboratoriy*, 2001. vol. 67, no. 8, pp. 63–66 (in Russian).
6. Budko A. G., Mikheeva A. U., Krylov A. I., *Reference materials*, 2018, vol. 14, no. 3–4, pp. 17–32.
7. Shokhina O. S., Medvedevskikh M. U., Krasheninina M. P. & others, *Reference materials*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 9–26.
8. Vikhrova S. V., Rutenberg O. L., Barinskaya T. O., *Collection of reports of the International scientific and technical conference "METROLOGY-2019"*, Minsk, March 27–28, 2019, Minsk, Belarusian State Institute of Metrology Publ., 2019, pp. 265–269.
9. Vikhrova S. V., Rutenberg O. L., Barinskaya T. O., *Collection of materials of the III International scientific and technical conference "Metrology of physical and chemical measurements"*, Mendeleevo, Moscow region, October 9–11, 2018, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2018, pp. 194–197.
10. Nalobin D. P., Osintzeva E. V., *Reference materials*, 2006, no. 2, pp. 9–17.
11. Burdun G. D., Markov B. N., *Osnovy metrologii*, Moscow, Izdatelstvo standartov, 1972, 306 p. (in Russian).
12. Krylov A. I., Mikheeva A. U., Tkachenko I. U., *Kontrol kachestva produktziy*, 2017, vol. 11, pp. 12–17 (in Russian).

Дата поступления: 07.02.2020.

Дата принятия: 04.03.2020.

## Development of reference materials with the composition of propyl and isopropyl alcohol solutions

Irina A. Piteriskikh<sup>1</sup>, Svetlana V. Vikhrova<sup>1</sup>, Nina G. Kovaleva<sup>2</sup>, Tatyana O. Barynskaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russian Federation, e-mail: piteriskikh@vniims.ru, svikhrova@vniims.ru

<sup>2</sup>ECROSKHIM LTD, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: kovaleva@ekroschim.ru

<sup>3</sup>Moscow scientific practical centre of addictology, Moscow, Russian Federation, e-mail: barto1605@yahoo.com

Certified reference materials (CRM) composed of propyl (11383-2019) and isopropyl (11384-2019) alcohols solutions were created for validation of measurement procedures and control of measurement errors of measurement results of mass concentrations of toxic substances (alcohol) in biological objects (urine, blood) and water. Two ways of establishing the value of the certified characteristic – mass concentration of propanol-1 or propanol-2 have been studied. The results obtained by the preparation procedure and comparison with the standard are the same within the margin of error.

**Key words:** certified reference materials, propanol-1, propanol-2, certified characteristic, preparation procedure, traceability, comparison to standard.

# ВСЕМИРНЫЙ ДЕНЬ МЕТРОЛОГИИ

Измерения для глобальной торговли

РСТ

ВНИИМС



Bureau  
International des  
Poids et  
Mesures



20 мая 2020

[www.worldmetrologyday.org](http://www.worldmetrologyday.org)

© 2020 BIPM-OIML

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Продолжается подписка на журналы  
«Измерительная техника» и «Метрология» на 2020 г.

### **АО «Агентство «Роспечать»**

(подписка на полугодие или отдельные номера)

[www.rosp.ru](http://www.rosp.ru) +7 (495) 921-25-26

«Измерительная техника» – индекс 70391

«Метрология» – индекс 79377

### **АО «Агентство подписки и розницы»**

(по Объединённому каталогу «Пресса России»)

[www.apr.ru](http://www.apr.ru) +7 (495) 974-11-11

«Измерительная техника» – индекс 38168

«Метрология» – индекс 38169

### **ООО «Информнаука»**

[www.informnauka.com](http://www.informnauka.com) +7 (495) 787-38-73

### **ООО «УП «Урал-Пресс»**

[www.ural-press.ru](http://www.ural-press.ru) +7 (499) 700-05-07

### **ФГУП «ВНИИМС»**

[www.vniims.ru](http://www.vniims.ru) +7 (495) 430-28-02

### **Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU**

[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) +7 (495) 544-24-94

### **Электронно-библиотечная система РУКОНТ**

[www.rucont.ru](http://www.rucont.ru) +7 (495) 719-09-21

### **Адрес редакции:**

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

Тел.: +7 (495) 781-48-70

E-mail: [izmt@vniims.ru](mailto:izmt@vniims.ru)

[www.izmt.ru](http://www.izmt.ru)