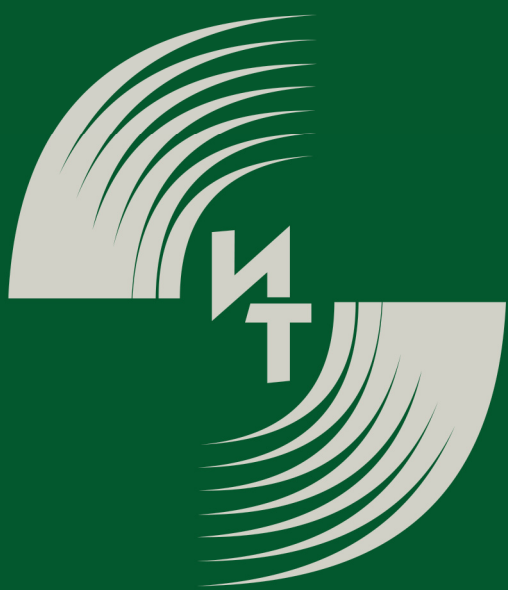




**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№7**



ВСЕМИРНЫЙ ДЕНЬ МЕТРОЛОГИИ

Измерения для глобальной торговли

РСТ

ВНИИМС



Bureau
International des
Poids et
Mesures



20 мая 2020
www.worldmetrologyday.org

© 2020 BIPM, OIML

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 7 ^{июль}

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

- Л. Ф. Витушкин, Ф. Ф. Карпешин, Е. П. Кривцов, П. П. Кролицкий, В. В. Наливаев,
О. А. Орлов, М. М. Халеев. Государственный первичный специальный эталон
ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019 3

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- М. С. Алейников, В. Н. Барышев, И. Ю. Блинов, Д. С. Купалов, Г. В. Осипенко.
Перспективы разработки чувствительного атомного интерферометра
на холодных атомах рубидия 9
- С. Ф. Левин. Неадекватность математических моделей объектов измерений и
расчёты риска согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 13
- А. В. Лапко, В. А. Лапко. Оценивание интеграла от квадрата плотности веро-
ятности одномерной случайной величины 22

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. Точность лидарных измерений концентрации
молекул гидрофторида в атмосферном пограничном слое 29

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- И. А. Архаров, И. Д. Какорин. Методика расчёта расхода криогенных двухфазных
потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства 34
- А. С. Комшин, К. Г. Потапов, В. И. Пронякин, А. Б. Сырицкий. Эффективность
применения фазохронометрического метода и нейродиагностики для контроля
деградации подшипников качения в процессе эксплуатации 43

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. В. Филатов, К. А. Сердюков, А. А. Новикова. Перспективы использования
модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками
сопротивления 51

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. В. Неёлов, С. Е. Шалдаев. Влияние точности оценивания частотных харак-
теристик радиолокационных целей на результаты идентификации геоме-
трической формы локальных отражателей 56

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. М. Генералов, А. С. Сафатов, М. В. Кручинина, А. А. Громов, Г. А. Буряк,
К. В. Генералов, В. Н. Кручинин. Дизлектрические свойства эритроцита
человека 62
- В. Г. Никитаев, А. Н. Проничев, В. В. Дмитриева, Е. В. Поляков, А. Д. Самсонова,
Н. Н. Тупицын, В. Ю. Сельчук. Разработка и исследование метода разделения
клеток при сегментации лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга
в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов 68

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**

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

Сдано в набор: 19.06.2020.
Подписано в печать: 27.07.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,5. Тир. 250 экз. Зак. 20-53м.

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
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

L. F. Vitushkin, F. F. Karpeshin, E. P. Krivtsov, P. P. Krolitsky, V. V. Nalivaev, O. A. Orlov, M. M. Khaleev. State special primary acceleration measurement standard for gravimetry GET 190-20193

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

M. S. Aleynikov, V. N. Baryshev, I. Y. Blinov, D. S. Kupalov, G. V. Osipenko. Prospects of high sensitivity atomic interferometer development for current gravimetry.....9
S. F. Levin. Inadequacy for mathematical models of measurement objects and risk calculations according to ISO/IEC 17025-2019.....13
A. V. Lapko, V. A. Lapko. Estimating the integral of the square of the probability density of a one-dimensional random variable22

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

V. E. Privalov, V. G. Shemanin. Lidar measurements accuracy of the hydrofluoride molecules concentration in the atmospheric boundary layer.....29

MECHANICAL MEASUREMENTS

I. A. Arkharov, I. D. Kakorin. Technique for flowrate calculation of cryogenic two-phase flows in Venturi flowmeters without separation.....34
A. S. Komshin, K. G. Potapov, V. I. Pronyakin, A. B. Syritskii. Efficiency of application of the phase-chronometric method and neurodiagnostics for monitoring the degradation of rolling bearings during operation43

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

A. V. Filatov, K. A. Serdyukov, A. A. Novicova. Prospects for the use of a modified zero method for measuring temperature with resistance sensors.....51

RADIO MEASUREMENTS

V. V. Neelov, S. E. Shaldaev. Influence of accuracy estimation of frequency characteristics of radar targets on the results of identifying the geometric shape of local reflectors.....56

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

V. M. Generalov, A. S. Safatov, M. V. Kruchinina, A. A. Gromov, G. A. Buryak, K. V. Generalov, V. N. Kruchinin. Dielectric properties of the human red blood cell62
V. G. Nikitaev, A. N. Pronichev, V. V. Dmitrieva, E. V. Polyakov, A. D. Samsonova, N. N. Tupitsyn, V. Yu. Selchuk. Development and study of a method for cell separation during white blood cell segmentation on images of bone marrow preparations in information and measurement systems for diagnostics of acute leukemia.....68

Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019

Л. Ф. Витушкин, Ф. Ф. Карпешин, Е. П. Кривцов, П. П. Кролицкий,
В. В. Наливаев, О. А. Орлов, М. М. Халеев

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: eluar@mail.ru, fkarpeshin@gmail.com, e.p.krivtsov@vniim.ru, pash1434@yandex.ru, nvlad2@yandex.ru, oorl@mail.ru, mmhal@mail.ru

Приведены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики Государственного первичного специального эталона ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019. Эталон является верхним звеном эталонной базы для измерений ускорения свободного падения. Точность и надёжность ГЭТ 190-2019 повышены в результате оптимизации методик юстировки измерительных систем и включения в его состав усовершенствованных систем, узлов и современной элементной базы. Особое внимание уделено уточнению вводимых в результаты измерений поправок, обусловленных методическими, физическими и техническими ограничениями. Применённые методы исследований позволили подтвердить диапазон ГЭТ 190-2019, а также определить вклады основных источников и суммарное значение погрешности. Метрологические характеристики ГЭТ 190-2019 подтверждены результатами измерений абсолютного значения ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» и их сравнением с данными, полученными в различное время с помощью высокоточных зарубежных и отечественных гравиметров.

Актуальность работ определяют требования прикладных задач, для решения которых необходимы данные о параметрах гравитационного поля Земли. Геофизика и навигация являются основными областями применения высокоточных измерений в этой области.

Ключевые слова: гравиметрия, ускорение свободного падения, геоид, гравиметрический пункт, абсолютный баллистический гравиметр.

Введение. Результаты высокоточных измерений параметров гравитационного поля Земли и его изменений находят широкое применение как при фундаментальных исследованиях (уточнение модели геоида, изучение внутреннего строения Земли), так и для решения прикладных задач (разведка полезных ископаемых, глобальное позиционирование и навигация, прогноз геодинамической активности) [1].

Государственный первичный специальный эталон единицы ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019 – основа метрологического обеспечения этой области в Российской Федерации.

Первые измерения ускорения свободного падения (УСП) с помощью абсолютного баллистического гравиметра (АБГ) на гравиметрическом пункте ВНИИМ выполнены в 2004 г. в рамках научно-технического сотрудничества с Европейским центром геодинамики и сейсмологии (Люксембург). В этих исследованиях применяли участвовавший в международных сличениях баллистический гравиметр FG5 Европейского центра. Гравиметрический пункт ВНИИМ находится в Ломоносовском отделении института в пригородной зоне Санкт-Петербурга в специализированном здании с виброизолирующим фундаментом массой около 4 000 т. Площадь пункта составляет более 60 м²,

на которых находятся 7 гравиметрических станций. Это позволяет размещать оборудование для сличений нескольких гравиметров.

До 2010 г. проводились предварительная проработка основных систем АБГ, а также оснащение и исследование гравиметрического пункта. Определённым этапом работ стало утверждение Государственного первичного специального эталона единицы ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2011, который включал гравиметрический пункт и АБГ, разработанный на основе оригинальных технических решений [2].

В 2019 г. проведены работы по совершенствованию ГЭТ 190-2011, которые в первую очередь были связаны с модернизацией входящего в его состав АБГ.

Актуальность совершенствования ГЭТ 190-2011 обусловили следующие факторы:

необходимость опережающего развития эталонной базы в связи с развитием средств измерений (СИ) и методов их калибровки: появились новые высокоточные СИ параметров гравитационного поля, в измерительную практику вошли абсолютные гравиметры, продолжается разработка абсолютных гравиметров на основе новых физических принципов (атомных гравиметров) [3], постоянно улучшаются характеристики дрейфа относительных гравиметров;

формирование круга прикладных задач, требующих дальнейшего повышения точности измерений, в отдельных случаях на уровне первичного эталона [4];

развитие инструментального парка гравиметрии изменило соотношение объёмов абсолютной и относительной гравиметрии [5] и сделало экономически целесообразным комплексное использование этих методов;

актуальность международной интеграции, условием которой является уровень метрологического обеспечения;

моральное и физическое старение отдельных узлов и систем ГЭТ 190-2011;

повышение уровня внешних сейсмогравитационных техногенных помех в месте расположения ГЭТ 190-2011.

В результате исследований, проводимых в рамках постоянных метрологических работ с момента утверждения ГЭТ 190-2011, подтверждена возможность повышения точности эталона и показаны пути решения поставленных задач.

Состав ГЭТ 190-2019. Основные направления работ по совершенствованию АБГ:

оптимизация работы механических узлов и систем, в первую очередь электромеханической системы, в части улучшения качества броска пробного тела;

применение элементов, обеспечивающих более высокие технические и метрологические характеристики: замена опорного лазера на модель с функцией перезахвата частоты излучения [6], использование фотоприёмного устройства с расширенным частотным диапазоном;

исследования по уточнению вводимых в результаты измерений поправок для исключения систематических составляющих;

совершенствование системы виброизоляции входящего в состав АБГ лазерного интерферометра;

оптимизация методик юстировки измерительных систем, обновление программного обеспечения, а также повышение надёжности и увеличение ресурса механических узлов.

В 2019 г. после завершения указанных работ и проведения необходимых исследований ГЭТ 190-2011 был переутверждён как Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019.

Метрологические характеристики ГЭТ 190-2019	
Диапазон воспроизведения УСП.....	9,77–9,85 м·с ⁻²
Номинальное значение воспроизведения УСП.....	9,82 м·с ⁻²
СКО результата измерений при воспроизведении единицы	
(не менее 20 серий по 100 независимых измерений в каждой).....	
НСП.....	не более 2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2 мкГал)
НСП.....	не более 1,8·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (1,8 мкГал)
Стандартная неопределённость	
по типу А U _A	2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2 мкГал)
по типу В U _B	0,8·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (0,8 мкГал)
суммарная.....	2,1·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2,1 мкГал)
Расширенная неопределённость	
(при k=2).....	4,2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (4,2 мкГал)
Межаттестационный интервал	1 год

Состав ГЭТ 190-2019:

АБГ АБГ-ВНИИМ-2, обеспечивающий воспроизведение единицы ускорения;

гравиметрический пункт «Ломоносов-1» для хранения и передачи единицы ускорения;

вспомогательное оборудование для обеспечения и контроля необходимого вакуума в измерительной камере гравиметра и контроля параметров окружающей среды.

Анализ результатов. Воспроизведение единицы ускорения с помощью ГЭТ 190-2019 основано на методе измерения УСП по параметрам движения пробного тела в вакууме. Современная реализация этого метода измерений предусматривает использование уравнения, определяющего высоты z_i и соответствующие моменты времени t_i точек траектории пробного тела, падающего в гравитационном поле $g(z)=g_0+\gamma z$ с учётом вертикального градиента γ :

$$z_i = z_0 + V_0 t_i + \frac{g_0 t_i^2}{2} + \gamma \left(\frac{V_0 t_i^3}{6} + \frac{g_0 t_i^4}{24} \right), \quad (1)$$

где g_0 – ускорение свободного падения в начальной точке траектории пробного тела; z_0 , V_0 – соответственно высота и скорость пробного тела в начальный момент времени t_0 .

Уравнение (1) используется для аппроксимации результатов измерений (массива данных $t_i(z_i)$ для каждого броска пробного тела) и вычисления УСП в месте проведения измерений с учётом поправок, обусловленных геофизическими факторами, условиями проведения измерений, физическими и техническими ограничениями.

Значения, полученные в соответствии с (1), включают как постоянное УСП, так и переменные составляющие, обусловленные природными процессами. Для определения УСП переменные составляющие должны быть исключены. Явления глобального масштаба (лунно-солнечные приливы, океаническая нагрузка и прецессия полюсов Земли) учитываются по данным соответствующих международных геофизических служб, являются общепризнанными в гравиметрии и не учитываются как источники неисключённой систематической погрешности (НСП).

К числу переменных составляющих ускорения, регистрируемых АБГ, относятся неприливные вариации, основным источником которых является изменение уровня грунтовых вод в месте расположения гравиметрического пункта. Диапазон периодов таких вариаций составляет от нескольких часов до месяцев, и при измерениях с применением АБГ вариации интерпретируются как изменение постоянного значения УСП на пункте измерения. Контроль уровня грунтовых вод с помощью гидрологических скважин не позволяет рассчитать поправки на уровне точности порядка 1 мкГал, но вариации УСП, вызываемые этим источником и другими причинами, регистрируются относительными гравиметрами, имеющими необходимую точность и характеристики дрейфа. Практически единственным типом таких приборов в настоящее время можно считать криогенные относительные гравиметры [7]. Неприливные вариации обусловлены природными явлениями и характеризуют

способность гравиметрического пункта сохранять опорное значение УСП, но не являются источником погрешности измерений УСП баллистическим гравиметром. Естественно, при калибровке и поверке гравиметрической аппаратуры с использованием опорного значения УСП гравиметрического пункта неприливые вариации необходимо учитывать как погрешность передачи единицы. Эта погрешность уменьшается при уточнении опорного значения с использованием эталонного АБГ или криогенного относительного гравиметра.

Локальные баровариации учитываются с использованием барометрического фактора (0,3 мкГал/гПа), вызывающего изменения атмосферного давления и УСП. При этом измеренное значение УСП приводится к нормальному атмосферному давлению на заданной высоте и погрешность измерения атмосферного давления в месте расположения АБГ рассматривается как источник составляющей НСП. Использование на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» прецизионного цифрового барометра БОП-1М позволило уменьшить эту составляющую до 0,1 мкГал.

НСП ГЭТ 190-2019 на основе АБГ формируется как результат составляющих, обусловленных принципом действия АБГ, и погрешностями входящих в (1) измеряемых величин, ограничениями и приближениями, а также погрешностями учёта вводимых поправок. В процессе создания ГЭТ 190-2019 были решены задачи минимизации составляющих НСП и подтверждения полученных значений расчётно-экспериментальным путём.

При использовании в составе АБГ стабилизированного по насыщенному поглощению в йоде лазера и рубидиевого стандарта частоты погрешности измерений перемещений пробного тела и соответствующих интервалов времени, формирующих исходные массивы данных $t_i(z_i)$, могут быть исключены из числа значимых.

Погрешность вертикального градиента в (1) можно оценить разными способами. Для измерений в произвольном месте в гравиметрической практике принято использование нормального вертикального градиента УСП $3,086 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ (3,086 мкГал/см) [8]. Такое допущение, естественно, увеличивает вклад соответствующей составляющей. Пространственное распределение УСП, измеренное на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1», позволило получить для ГЭТ 190-2019 конкретное значение градиента и также сделать вклад этого параметра пренебрежимым.

Из числа входящих в (1) величин доминирующий вклад в НСП вносит погрешность измерения референтной высоты – высоты, к которой относится измеренное значение УСП [9]. Детальный учёт конструктивных элементов гравиметра и постамент, относительно которого определяется высота, позволил уменьшить эту составляющую НСП до 0,3 мкГал.

Наряду с измеряемыми величинами и параметрами, входящими в уравнение измерений, источниками НСП являются физические ограничения, к которым в первую очередь относится конечная скорость света. Вследствие этого

необходимо введение поправки из-за задержки распространения светового сигнала от падающего пробного тела [10]:

$$\Delta g_c = \frac{3}{c} g_0 \left(V_0 + \frac{4}{7} g_0 t \right),$$

где V_0 – начальная скорость падения пробного тела, при которой начинается отсчёт интервалов пути и времени; t – полное время счёта интерференционных полос; c – скорость света.

Для АБГ-ВНИИМ-2 время счёта интерференционных полос составляет 0,1 с, а экспериментально определённый разброс начальных скоростей не превышает 0,1 м/с, составляющая НСП в этом случае не более 0,2 мкГал.

Также к физическим ограничениям можно отнести дифракционные ограничения в интерферометре гравиметра, обусловленные гауссовой структурой лазерного излучения [11]. При диаметре луча эталонного гравиметра 2,8 мм и учёте погрешности измерителя профиля лазерного излучения WinCam-D НСП составляет 0,3 мкГал.

Составляющими НСП также являются погрешности поправок, источниками которых служат технические ограничения и связанные с ними дополнительные воздействия на пробное тело в процессе броска.

Остаточный газ в вакуумной камере при падении пробного тела приводит к его торможению $\Delta g_{o,r}$, которое определяется параметрами гравиметра:

$$\Delta g_{o,r} = SVMP / (4kT),$$

где S – сечение пробного тела; V, M – средняя скорость и масса молекул газа; P – давление газа; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Применение в составе ГЭТ 190-2019 системы вакуумирования позволило уменьшить давление остаточного газа до 10^{-5} Па. С учётом погрешности системы контроля остаточного давления это позволило оценить соответствующую составляющую НСП значением 0,4 мкГал.

Вертикальный градиент магнитной индукции в вакуумной камере гравиметра также приводит к дополнительному ускорению пробного тела:

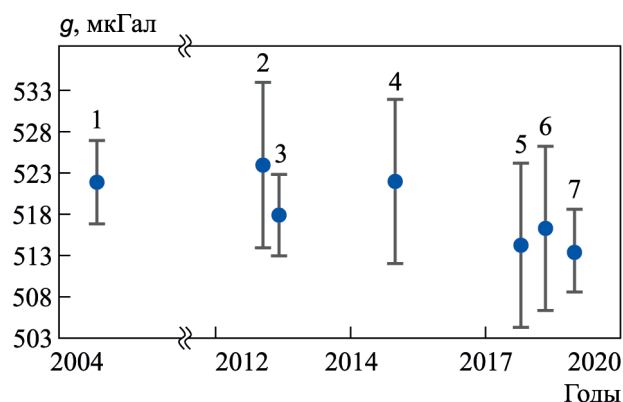
$$\Delta g = \frac{1}{m_0} \left(\mathbf{m} \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial z} \right),$$

где $\mathbf{B}_z$ – вертикальная составляющая вектора магнитной индукции; $\mathbf{m}$ – наведённый магнитный момент пробного тела; m_0 – масса пробного тела.

Неоднородности магнитного поля определяли на основе результатов исследований магнитных полей узлов АБГ: ионного насоса, электродвигателя привода каретки, а также параметров локального лабораторного поля. По результатам экспериментальных данных изменена компоновка узлов, минимизирующая вертикальный градиент индукции. В результате с учётом характеристик точности применённого магнитометра МТ4 вклад магнитных явлений в НСП гравиметра не превысил 0,2 мкГал.

Составляющие НСП

Источник составляющей НСП	θ_i , мкГал
Поправка на атмосферное давление	0,10
Длина волны лазера	0,01
Частота опорного генератора	0,02
Референтная высота	0,30
Поправка на конечную скорость света	0,20
Дифракционная поправка	0,30
Поправка на торможение остаточным газом	0,40
Поправка на взаимодействие с магнитным полем	0,20
Поправка на собственное гравитационное притяжение	0,40
Юстировка вертикальности луча в измерительном плече интерферометра	0,60
Оптические элементы	0,30
Фазовые задержки электронных систем	0,40
Выбор начального и конечного интервала траектории ПТ	0,65
Границы НСП Θ	1,80



Результаты измерений ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1»:

1, 3 – гравиметры типа FG-5 (США), соответственно заводской номер 216 и 221; 2 – гравиметр типа FGL (США), заводской номер 105; 4, 5 – гравиметр типа FGL (США), заводской номер 106; 6 – гравиметр типа ГАБЛ-М (РФ); 7 – гравиметр типа АБГ-ВНИИМ-2 (РФ)

Results of measurements of the free fall acceleration at gravimetry site "Lomonosov-1":

1, 3 – FG-5 type gravimeter (USA), serial number 216 and 221; 2 – FGL type gravimeter (USA), serial number 105; 4, 5 – FGL type gravimeter (USA), serial number 106; 6 – GABL-M type gravimeter (RF); 7 – ABG-VNIIM-2 type gravimeter (RF)

Собственное гравитационное поле АБГ создаёт дополнительное ускорение пробного тела; значение ускорения определяется законом всемирного тяготения и распределением в пространстве массы деталей, узлов и блоков гравиметра. С учётом конструкции АБГ-ВНИИМ-2, входящего в состав ГЭТ 190-2019, а также рассмотренных допущений, погрешность поправки на гравитационное взаимодействие в качестве составляющей НСП составляет 0,4 мкГал.

К техническим ограничениям относится погрешность юстировки вертикальности луча в измерительном плече интерферометра. При использовании интерференционного контроля по жидкому зеркалу погрешность не превышает 8", что соответствует составляющей НСП 0,6 мкГал.

Погрешности оптических элементов интерферометра также являются техническим ограничением. Основные оптические элементы интерферометра были изготовлены с плоскостностью $\lambda/10$ (λ – длина волны) и параллельностью на уровне 3". Это может вносить в результат измерений погрешность на уровне 0,3 мкГал.

Наряду с оптическими элементами источником НСП являются электронные компоненты в системе детектирования и счёта интерференционных полос. Фазовая задержка, вносимая системой, определяется при тестировании с использованием программно сформированного сигнала, соответствующего фиксированному значению УСП. При этом погрешность определения задержки является составляющей НСП и для АБГ-ВНИИМ-2 не превышает 0,4 мкГал.

К систематическим составляющим также относится погрешность, связанная с зависимостью УСП при каждом броске пробного тела от выбора начального и конечного значений траектории, параметры которой (координата и время) использовались при обработке. Составляющая имеет сложную зависимость от окончательной юстировки электромеханической системы броска, определяющей компоненты дополнительных начальных ускорений пробного тела, и лазерно-интерференционной системы, формирующей пространственное распределение мод излучения. По результатам экспериментального исследования в пределах траектории броска, реализуемой баллистическим блоком, установлено, что для АБГ-ВНИИМ-2 эта составляющая НСП не превышает 0,65 мкГал.

Границы НСП Θ для ГЭТ 190-2019 рассчитаны как результат действия указанных составляющих θ_i в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011. «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения»:

$$\Theta = \pm 1,4 \left(\sum_{i=1}^n \theta_i^2 \right)^{1/2}.$$

Границы НСП, а также вклады перечисленных составляющих приведены в таблице.

Случайную погрешность ГЭТ 190-2019 определяли по результатам серий длительных измерений УСП с использованием АБГ, установленного на гравиметрическом пункте. При этом уменьшения погрешности удалось добиться за счёт введения активной ступени в систему виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра гравиметра.

В условиях внешних сейсмогравитационных техногенных помех, уровень которых в месте расположения ГЭТ 190-2019 за последние годы существенно вырос, эта мера оказалась наиболее эффективной. Уменьшению случайной погрешности также способствовало уменьшение угловых составляющих движения пробного тела, которые непосредственно зависят от качества броска и определяются выбором режима электромеханической системы и качеством юстировки узла захвата пробного тела. Применение лазера с функцией перезахвата частоты позволило уменьшить случайную погрешность, связанную с влиянием сильных внешних возмущений. Расширение частотного диапазона фотоприёмного устройства обеспечило уменьшение искажений интерференционного сигнала, которые также являются источниками случайной погрешности. Наряду с указанными мерами, направленными на повышение точности ГЭТ 190-2019, универсальным способом уменьшения случайной погрешности является увеличение объёма измерительной информации. Это стало возможным в результате увеличения количества бросков при измерениях в АБГ-ВНИИМ-2 при увеличении его надёжности и ресурса.

Единица воспроизводится при значении УСП в месте расположения гравиметрического пункта ГЭТ 190-2019. При этом диапазон измерения ускорения свободного падения с помощью АБГ соответствует реальным ускорениям на поверхности Земли, изменяющимся от максимальных значений на полюсах до минимальных на экваторе. Проверка диапазона проводилась с использованием тестовых сигналов, параметры которых (длительность, амплитуда и частота) соответствуют интерференционному сигналу гравиметра при бросках пробного тела в условиях действия УСП с заданными значениями. Тестовые сигналы, сформированные для заданных значений УСП, соответствующих граничным и среднему значениям диапазона (9,77; 9,85; 9,81 м/с²), поступали на вход измерительной системы АБГ. Результаты обработки в сериях по 100 бросков подтвердили соответствие заданным значениям УСП в пределах случайной погрешности, для которой максимальное значение среднего квадратического отклонения (СКО) в серии не превышало 0,45 мкГал. Полученные результаты, в том числе случайная составляющая, не значимая по сравнению со случайной погрешностью АБГ, подтверждают заданный диапазон АБГ из состава ГЭТ 190-2019.

На рисунке представлены результаты измерений абсолютного значения УСП, выполненные с помощью АБГ-ВНИИМ-2 из состава ГЭТ 190-2019 на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» и полученные в разное время с помощью других зарубежных FG-5, FGL (США) и отечественных ГАБЛ-М высокоточных гравиметров. Полученные результаты подтверждают точностные характеристики АБГ-ВНИИМ-2 из состава ГЭТ 190-2019.

Заключение. ГЭТ 190-2019 позволяет успешно реализовать все функции, связанные с поддержанием единства измерений в гравиметрии в Российской Федерации: поверку и калибровку эталонов и СИ, испытания с целью утверждения типа СИ, участие в сличениях. По основным метрологическим

и техническим характеристикам ГЭТ 190-2019 соответствует лучшим зарубежным аналогам.

В перспективе планируется проведение исследований с целью введения в состав ГЭТ 190-2019 криогенного относительного гравиметра, а также разработанного и находящегося в опытной эксплуатации транспортируемого АБГ. Это позволит существенно расширить функциональные возможности ГЭТ 190-2019 при передаче единицы и повысить уровень метрологического обеспечения находящейся в эксплуатации гравиметрической аппаратуры.

Список литературы

1. Vitushkin L. F. (2014) *Absolute Gravity Measurements*. In: Grafarend E. (eds) *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_25-1
2. Пат. № 2475786 РФ / Л. Ф. Витушкин, О. А. Орлов // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 5.
3. M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli, G. Saccorotti, F. Sorrentino, and G. M. Tino, *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 2, 022001 (16 pp). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>
4. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, (2016) vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
5. Torge W. (1998) *The changing role of gravity reference networks*. In: Forsberg R., Feissel M., Dietrich R. (eds) *Geodesy on the Move*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 119. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_1
6. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5856, pp. 281–286. <https://doi.org/10.1117/12.611883>
7. Goodkind J. M., *Rev. Sci. Instruments*, 1999, vol. 70, no. 11, pp. 4131–4152. <https://doi.org/10.1063/1.1150092>
8. Torge W. (1989) *Gravimetry*. De Gruyter GmbH, Berlin, New York. 482 p.
9. Pálinkáš V., Liard J., Jiang Z., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 4, pp 552–559. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/4/552>
10. Nagorny V. D., Zanimoskiy Y. M., Zanimoskiy Y. Y., *Metrologia*, 2011, v. 48, no. 3, pp. 101–113. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/C01>
11. Robertsson L., *Metrologia*, 2007, vol. 44, no. 1, pp. 35–39. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1/005>

References

1. Vitushkin L. F. (2014) *Absolute Gravity Measurements*. In: Grafarend E. (eds) *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_25-1
2. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Absolute ballistic gravimeter*, RF Patent no. 2475786 (06 May 2013).
3. M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli, G. Saccorotti, F. Sorrentino, and G. M. Tino, *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 2, 022001 (16 pp). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>
4. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, (2016) vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>

5. Torge W. (1998) *The changing role of gravity reference networks*. In: Forsberg R., Feissel M., Dietrich R. (eds) *Geodesy on the Move*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 119. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_1
6. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5856, pp. 281–286. <https://doi.org/10.1117/12.611883>
7. Goodkind J. M., *Rev. Sci. Instruments*, 1999, vol. 70, no. 11, pp. 4131–4152. <https://doi.org/10.1063/1.1150092>
8. Torge W. (1989) *Gravimetry*. De Gruyter GmbH, Berlin, New York. 482 p.
9. Pálinkáš V., Liard J., Jiang Z., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 4, pp 552–559.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/4/552>
10. Nagornyi V. D., Zanimonskiy Y. M., Zanimoskiy Y. Y., *Metrologia*, 2011, v. 48, no. 3, pp. 101–113.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/C01>
11. Robertsson L., *Metrologia*, 2007, vol. 44, no. 1, pp. 35–39.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1/005>

Дата поступления: 08.04.2020.

Дата принятия: 14.05.2020.

State special primary acceleration measurement standard for gravimetry GET 190-2019

Leonid F. Vitushkin, Fedor F. Karpeshin, Evgeny P. Krivtsov, Pavel P. Krolitsky,
Vladimir V. Nalivaev, Oleg A. Orlov, Mihail M. Khaleev

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: eluar@mail.ru, fkarpehin@gmail.com, e.p.krivtsov@vniim.ru, pash1434@yandex.ru, nvlad2@yandex.ru, oorl@mail.ru, mmhal@mail.ru

The State special primary acceleration measurement standard for gravimetry (GET 190-2019), its composition, principle of operation and basic metrological characteristics are presented. This standard is on the upper level of reference for free-fall acceleration measurements. Its accuracy and reliability were improved as a result of optimisation of the adjustment procedures for measurement systems and its integration within the upgraded systems, units and modern hardware components.

A special attention was given to adjusting the corrections applied to measurement results with respect to procedural, physical and technical limitations. The used investigation methods made it possible to confirm the measurement range of GET 190-2019 and to determine the contributions of main sources of errors and the total value of these errors. The measurement characteristics and GET 90-2019 were confirmed by the results obtained from measurements of the absolute value of the free fall acceleration at the gravimetric site "Lomonosov-1" and by their collation with the data of different dates obtained from measurements by high-precision foreign and domestic gravimeters.

Topicality of such measurements ensues from the requirements to handle the applied problems that need data on parameters of the Earth gravitational field, to be adequately faced. Geophysics and navigation are the main fields of application for high-precision measurements in this field.

Key words: gravimetry, free fall acceleration, geoid, gravimetry site, absolute ballistic gravimeter.

Перспективы разработки чувствительного атомного интерферометра на холодных атомах рубидия

М. С. Алейников, В. Н. Барышев, И. Ю. Блинов, Д. С. Купалов, Г. В. Осипенко

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: alejnikov@vniiftri.ru

Представлен обзор результатов исследований, полученных во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений при создании часов фонтанного типа. Проанализирована возможность применения полученных результатов для разработки чувствительного атомного интерферометра (гравиметра) на холодных атомах рубидия. Актуальность исследования заключается в оценке перспективы создания интерферометра (гравиметра) на холодных атомах рубидия для абсолютных измерений локального значения ускорения свободного падения. Описаны физические принципы работы атомного гравиметра. Проведено сравнение атомного гравиметра и стандарта частоты фонтанного типа на холодных атомах. Предложены технические решения, необходимые для создания атомного гравиметра с заданными значениями чувствительности измерения ускорения свободного падения. Для достижения чувствительности гравиметра порядка $1 \text{ мкГал/Гц}^{1/2}$ оценены фазовый шум лазерного излучения, давление остаточных газов в вакуумной системе и параметры системы магнитных экранов.

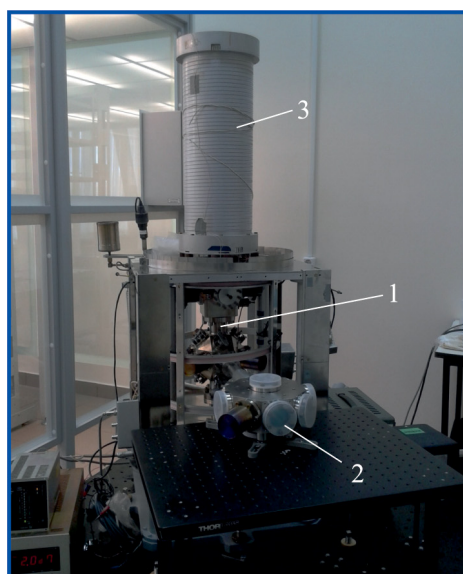
Ключевые слова: атомная интерферометрия, атомный гравиметр, стандарт частоты фонтанного типа.

Введение. Ускорение свободного падения g является ключевым параметром гравитации и в общем случае зависит от времени и координат. Наземные гравитационные измерения проводятся уже более двухсот лет с помощью различной техники [1]. Точные измерения параметра g представляют интерес в широкой области приложений геофизики и гравитационных исследований [2–5], фундаментальных исследований [6], изучения естественных природных ресурсов [7] и других научных областях [8]. В связи с активным развитием атомной интерферометрии её принципы используют при создании инерциальных сенсоров нового поколения, которые сегодня могут конкурировать с самыми точными классическими приборами подобного рода. Число приложений таких сенсоров быстро растёт: от измерений g , гравитационной постоянной G и параметров вращения Земли до разработки возимых компактных приборов – атомных гравиметров и градиентометров.

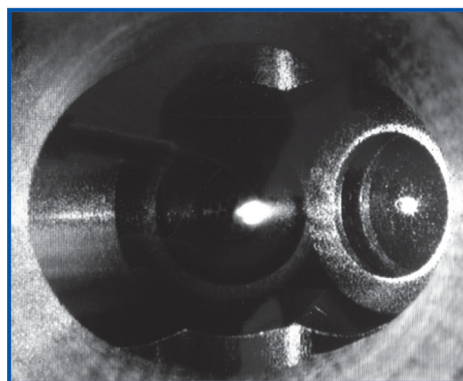
За два последних десятилетия атомная интерферометрия материальных волн привела к развитию техники измерений инерциальных сил, применяемой как в фундаментальной физике, так и в прикладных исследованиях. С появлением и развитием во ВНИИФТРИ лазерных фонтанных технологий охлаждения и управления движением атомов создание атомных интерференционных гравиметров с точностными характеристиками, сравнимыми с характеристиками классических оптических гравиметров

на свободно падающем уголкового отражателе, стало решаемой и реально осуществимой задачей. В настоящее время атомные гравиметры превосходят классические по кратковременной стабильности измерения ускорения свободного падения [9, 10]. Отсутствие механического трения в атомных гравиметрах позволяет выполнять абсолютные гравиметрические измерения в течение длительных интервалов времени, что открывает перспективы создания базовой площадки с абсолютным гравитационным стандартом. Чувствительность современных приборов такого типа достигла уровня нескольких единиц микрогал/Герц^{1/2}, кроме того, имеется весомый потенциал её дальнейшего повышения [10].

Принцип работы атомного гравиметра. В атомном гравиметре атомы рабочего вещества, например изотопа ^{87}Rb , охлаждаются в магнитооптической ловушке до температуры в несколько единиц микрокельвинов и запускаются лазерным излучением вертикально вверх, таким образом формируется атомный фонтан (рис. 1). Импульсы, возбуждающие двухфотонный вынужденный рамановский переход, используются как расщепитель и отражатель пучка. Волновой пакет разделяется в вертикальном направлении посредством $\pi/2$ -импульса, затем отражается π -импульсом и далее обратно совмещается завершающим $\pi/2$ -импульсом. Интерференционная картина наблюдается при измерении населённости внутренних состояний атомов.



а



б

Рис. 1. Атомный фонтан в процессе сборки (а) и флюоресценция облака охлаждённых атомов при температуре 3 мК (б):

1, 2 – вспомогательная и основная ловушки соответственно; 3 – пролётная область

Fig. 1. Atomic fountain in the process of assembling (а) and fluorescence of the cooled atomic cloud at the temperature of 3 μ K (б):

1, 2 – additional and main traps correspondently; 3 – flight area

При этом гравитация вызывает фазовый сдвиг интерферометра $\Delta\varphi$, который определяется по интерференционной картине:

$$\Delta\varphi = k_{\text{эфф}} g T^2,$$

где $k_{\text{эфф}} = |\mathbf{k}_{\text{эфф}}| = |\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2|$ – относительный волновой вектор двух рамановских лазеров; g – локальное значение ускорения свободного падения; T – время между оптическими рамановскими импульсами.

Интерференционная картина в атомном гравиметре имеет ту же физическую природу, что и в стандартах частоты фонтанного типа [11–13], однако возникновение интерференционной картины обусловлено взаимодействием атомов с оптическими рамановскими лучами (рис. 2).

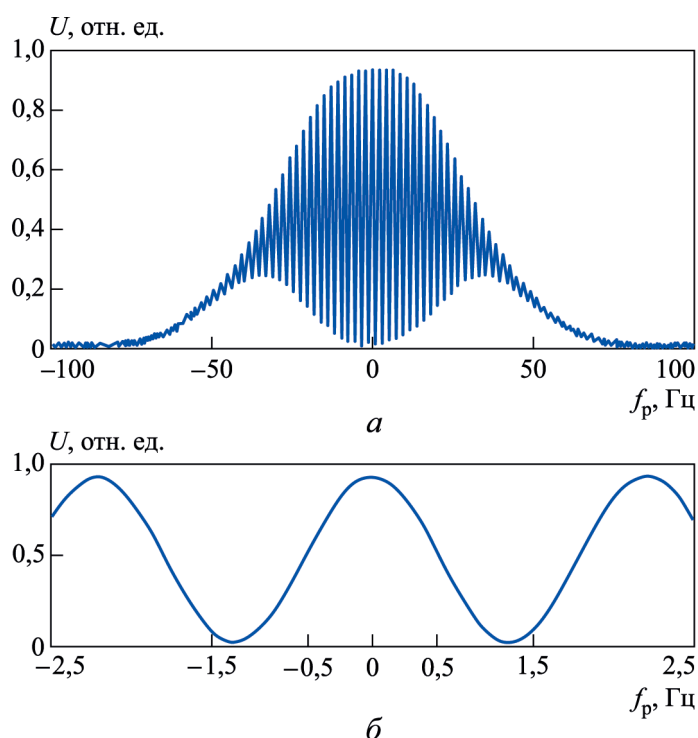


Рис. 2. Интерференция внутренних состояний холодных атомов ^{87}Rb , полученная по схеме возбуждения Рэмси в стандарте частоты фонтанного типа. Ширина центрального пика детектируемого сигнала U составляет около 1 Гц; $f_p = f - 6834682611$ Гц – отстройка частоты f опросного генератора от частоты резонанса основного состояния ^{87}Rb в диапазоне $-100 \dots 100$ Гц (а) и $-2,5 \dots 2,5$ Гц (б)

Fig. 2. Interference pattern of internal states of ^{87}Rb cooled atoms achieved by Ramsey interrogation scheme in atomic fountain quantum frequency standard. The width of the detection signals U central peak is around 1 Hz; $f_p = f - 6834682611$ Hz – frequency offset of interrogation generators frequency f from the frequency of the main state resonance of ^{87}Rb in the interval from -100 Hz to 100 Hz (а); from $-2,5$ Hz to $2,5$ Hz (б)

Оценка шумов лазерного излучения и технических требований к составным частям гравиметра. В интерферометре возникают различные виды технического шума, например фазовый шум рамановских лазеров, вибрационный шум рамановского зеркала. В общем случае эти шумы приводят к возмущению вероятности атомного перехода δP и, следовательно, фазы интерферометра $\Delta\varphi$. Другими словами, в атомном гравиметре существует ряд технических шумов, которые ограничивают чувствительность и точность прибора. Опишем произвольные возмущения фазы интерферометра, опираясь на формализм функции чувствительности $g_s(t)$. Пусть имеется возмущение фазы оптического излучения $\delta\varphi$ в момент времени t , тогда

$$g_s(t) = 2 \lim_{\delta\varphi \rightarrow 0} \frac{\delta P(\delta\varphi, t)}{\delta\varphi}.$$

Согласно введённому определению можно показать, что функция чувствительности в конфигурации импульсов $\pi/2-\pi-\pi/2$ имеет следующий вид:

$$g_s(t) = \begin{cases} 0 & -T_c/2 < t < -T; \\ \sin(\Omega(t+T)) & -T \leq t < -T+\tau; \\ 1 & -T+\tau \leq t < -\tau; \\ -\sin(\Omega t) & -\tau \leq t < \tau; \\ -1 & \tau \leq t \leq T-\tau; \\ \sin(\Omega(t-T)) & T-\tau \leq t < T; \\ 0 & T \leq t < T_c/2, \end{cases} \quad (1)$$

где T_c – время одного цикла работы атомного гравиметра (около 1 с); Ω – эффективная частота Раби, связывающая два подуровня сверхтонкого расщепления основного состояния; $\tau = \pi/(2\Omega)$ – длительность $\pi/2$ -импульса.

Выразим вариацию Аллана $\sigma_\phi^2(\bar{\tau})$ флуктуации фазы интерферометра через спектральную плотность мощности S_ϕ фазового шума оптического излучения:

$$\sigma_\phi^2(\bar{\tau}) = \frac{1}{\bar{\tau}} \sum_{n=1}^{\infty} \left| H\left(\frac{2\pi n}{T_c}\right) \right|^2 S_\phi\left(\frac{2\pi n}{T_c}\right), \quad (2)$$

где $H(f) = \omega G(f)$, ω – частота фурье-анализа, $G(f)$ – фурье-образ $g_s(t)$.

Таким образом, технический фазовый шум ограничивает чувствительность атомного гравиметра и является одним из принципиально важных вопросов при создании такого рода приборов. Из (1), (2) следует, что для достижения чувствительности гравиметра порядка 1 мкГал/Гц^{1/2}, обусловленной техническими шумами лазерного излучения и вибраций, необходимо иметь среднеквадратичное отклонение относительной фазы двух рамановских лазеров не более 1 мрад.

Помимо проблемы подавления указанных технических шумов, использование атомной интерферометрии накладывает ряд жёстких требований к различным физическим системам, входящим в состав гравиметра. Во-первых, давление остаточных газов p в вакуумной системе атомного интерферометра должно быть на уровне единиц 10^{-7} Па (10^{-9} мбар). Во-вторых, полная система магнитных экранов, состоящая из нескольких слоёв, должна иметь коэффициент затухания μ порядка 70 дБ, а вариации формируемого магнитного поля ΔB на оси пролётного пространства атомов не должны превышать 50 мкТл. Наконец, используемые лазеры должны быть предварительно стабилизированы по частоте относительно атомного перехода изотопа ^{87}Rb и надёжно работать в таком режиме на продолжительных интервалах времени.

Обзор состояния разработки атомных гравиметров.

В настоящее время большое количество научных групп вовлечено в разработку атомных гравиметров [9–10, 14–16]. Первый гравиметр на интерферометрии холодных атомов был разработан группой учёных во главе с доктором Стивенном Чу в 1991 г. [14]. По прошествии нескольких лет совершенствования чувствительность этого гравиметра составила 8 мкГал/Гц^{1/2}, а точность – несколько микрогал [9]. Чувствительность атомного гравиметра в группе обсерватории LNE-SYRTE

достигает 6 мкГал/Гц^{1/2} [10]. Транспортируемый гравиметр на основе рубидиевого фонтана в университете им. Гумбольдта имеет чувствительность на уровне 20 мкГал/Гц^{1/2} [15]. Кроме того, с 2009 г. атомные гравиметры принимают активное участие в международных сличениях абсолютных гравиметров, уровень точностных характеристик атомных гравиметров сравним с лучшими образцами классических гравиметров. Таким образом, в Российской Федерации задача разработки и исследования атомного гравиметра на охлаждённых атомах является чрезвычайно актуальной на сегодняшний день.

Выводы. На сегодняшний день создание интерферометра (гравиметра) на холодных атомах рубидия является решаемой задачей и имеет большое прикладное значение. Решение поставленной задачи – важный этап научно-технологического развития Российской Федерации, в частности, в сфере оборонных интересов.

Список литературы

1. Marson I., and Faller J. E., *Journal of physics E: Scientific Instruments*, 1986, vol. 19, pp. 22–32. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/19/1/002>
2. Novak P., *Surv. Geophys.*, 2010, vol. 31, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9077-z>
3. Hinderer J., Florsch N., Makinen J., Legros H., and Faller J. E., *Geophysical Journal International*, 1991, vol. 106, pp. 491–497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03907.x>
4. Paik H. J., *Classical and Quantum Gravity*, 1994, vol. 11A, pp. 133–144. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/010>
5. Boedecker G., *Metrologia*, 2002, vol. 39, pp. 429–433. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/5/4>
6. Schwarz J. P., Robertson D. S., Niebauer T. M., Faller J. E., *Science*, 1998, vol. 282, pp. 2230–2234. <https://doi.org/10.1126/science.282.5397.2230>
7. Savage J. C., *Journal of Geophysical Research*, 1984, vol. 89, pp. 1945–1952. <https://doi.org/10.1029/JB089iB03p01945>
8. Forward R. L., *The Moon and the Planets*, 1980, vol. 22, pp. 419–433. <https://doi.org/10.1007/BF00897287>
9. Peters A., Chung K. Y., and Chu S., *Metrologia*, 2001, vol. 38, pp. 25–61. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/1/4>
10. Le Gouet J., Mehlstaubler T., Kim J., Merlet S., Clairon A., Landragin A., and Pereira Dos Santos F., *Applied Physics B*, 2008, vol. 92, pp. 133–144. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3088-1>
11. Домнин Ю. С., Ёлкин Г. А., Новосёлов А. В., Барышев В. Н., Копылов Л. Н., Малышев Ю. М., Пальчиков В. Г. Применение холодных атомов цезия в квантовых стандартах частоты // Квантовая электроника. 2004. Вып. 34. № 12. С. 1084–1095.
12. Домнин Ю. С., Барышев В. Н., Бойко А. И., Ёлкин Г. А., Новосёлов А. В., Копылов Л. Н., Купалов Д. С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 26–30.
13. Домнин Ю. С., Барышев В. Н., Бойко А. И., Ёлкин Г. А., Новосёлов А. В., Копылов Л. Н., Купалов Д. С. Цезиевые реперы частоты фонтанного типа МЦР-Ф1 и МЦР-Ф2 // Мир измерений. 2012. Вып. 134. № 4. С. 30–34.

14. Kasevich M., and Chu S., *Phys. Rev. Lett.*, 1991, vol. 67, pp. 181–184. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.181>
15. Schmidt M., Senger A., Hauth M., Freier C., Schkolnik V., and Peters A., *Gyroscopy and Navigations*, 2011, vol. 2, pp. 170–177. <https://doi.org/10.1134/S2075108711030102>
16. Zhou L., Xiong Z. Y., Yang W., Tang B., Peng W. C., Hao K., Li R. B., Liu M., Wang J., and Zhan M. S., *General Relativity and Gravitation*, 2011, vol. 43, pp. 1931–1942. <https://doi.org/10.1007/s10714-011-1167-9>

References

1. Marson I., and Faller J. E., *Journal of physics E: Scientific Instruments*, 1986, vol. 19, pp. 22–32. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/19/1/002>
2. Novak P., *Surv. Geophys.*, 2010, vol. 31, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9077-z>
3. Hinderer J., Florsch N., Makinen J., Legros H., and Faller J. E., *Geophysical Journal International*, 1991, vol. 106, pp. 491–497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03907.x>
4. Paik H. J., *Classical and Quantum Gravity*, 1994, vol. 11A, pp. 133–144. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/010>
5. Boedecker G., *Metrologia*, 2002, vol. 39, pp. 429–433. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/5/4>
6. Schwarz J. P., Robertson D. S., Niebauer T. M., Faller J. E., *Science*, 1998, vol. 282, pp. 2230–2234. <https://doi.org/10.1126/science.282.5397.2230>
7. Savage J. C., *Journal of Geophysical Research*, 1984, vol. 89, pp. 1945–1952. <https://doi.org/10.1029/JB089iB03p01945>

8. Forward R. L., *The Moon and the Planets*, 1980, vol. 22, pp. 419–433. <https://doi.org/10.1007/BF00897287>
9. Peters A., Chung K. Y., and Chu S., *Metrologia*, 2001, vol. 38, pp. 25–61. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/1/4>
10. Le Gouet J., Mehlstaubler T., Kim J., Merlet S., Clairon A., Landragin A., and Pereira Dos Santos F., *Applied Physics B*, 2008, vol. 92, pp. 133–144. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3088-1>
11. Domnin Yu. S., Elkin G. A., Novoselov A. V., Baryshev V. N., Kopylov L. N., Malyshev Y. M., Pal'chikov V. G., *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 12, pp. 1084–1095. <https://doi.org/10.1070/QE2004v034n12ABEH002749>
12. Domnin Yu. S., Baryshev V. N., Boiko A. I., Elkin G. A., Novoselov A. V., Kopylov L. N., Kuplaov D. S., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, no. 10, pp. 1155–1162. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0102-0>
13. Domnin Y. S., Baryshev V. N., Boiko A. I., Elkin G. A., Novoselov A. V., Kopylov L. N., Kuplaov D. S., *Measurements World*, 2012, vol. 134, pp. 30–34.
14. Kasevich M., and Chu S., *Phys. Rev. Lett.*, 1991, vol. 67, pp. 181–184. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.67.181>
15. Schmidt M., Senger A., Hauth M., Freier C., Schkolnik V., and Peters A., *Gyroscopy and Navigations*, 2011, vol. 2, pp. 170–177. <https://doi.org/10.1134/S2075108711030102>
16. Zhou L., Xiong Z. Y., Yang W., Tang B., Peng W. C., Hao K., Li R. B., Liu M., Wang J., and Zhan M. S., *General Relativity and Gravitation*, 2011, vol. 43, pp. 1931–1942. <https://doi.org/10.1007/s10714-011-1167-9>

Дата поступления: 03.03.2020.

Дата принятия: 27.04.2020.

Prospects of high sensitivity atomic interferometer development for current gravimetry

Mikhail S. Aleynikov, Vyatcheslav. N. Baryshev, Igor Y. Blinov, Dmitri S. Kupalov, Georgii V. Osipenko

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering ("VNIIFTRI"),
Mendeleev, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: aleynikov@vniiftri.ru

A review of the experimental results achieved in the process of atomic fountain clocks construction at "VNIIFTRI" is presented. A possibility of the application of achieved results to the development of a sensitive interferometer (gravimeter) based on cold rubidium atoms is analyzed. The relevance of the study is in the estimation of perspective of interferometer (gravimeter) based on cold atoms for absolute measurements of local free-falling constant development. Physical fundamentals of atomic gravimeter's operation are described. A comparison between atomic gravimeter and atomic quantum frequency standard based on cold atoms is done. Engineering solutions, that are necessary for building atomic gravimeter with required sensitivity of free-falling acceleration measurement are suggested. In order to build a gravimeter with a sensitivity reaching $1 \mu\text{Gal}/\text{Hz}^{1/2}$ the estimations of laser phase noise, residual gas pressure in vacuum system and magnetic shielding system's parameters are made.

Key words: atomic interferometry, atomic gravimeter, fountain atomic clock.

Неадекватность математических моделей объектов измерений и расчёты риска согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019

С. Ф. Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Российская Федерация,
e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

Рассмотрена проблема неадекватности математических моделей объектов измерений в связи с проблемой «дефиниционной неопределённости измерения» и с необходимостью управления рисками согласно ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Описана предыстория проблемы от формирования моментного и композиционного подходов к оцениванию точности до введения специального термина – погрешности неадекватности математической модели объекта измерений. Отмечено негативное влияние безвыходности понятийно-терминологических преобразований в метрологии и критическое противоречие оценок применимости «статистических методов» ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» и Руководства по выражению неопределённости измерения. Показано, что учёт неадекватности вероятностных моделей в расчётах риска является необходимым условием достоверности результатов измерений.

Ключевые слова: математическая модель, дефиниционная неопределённость, моментный подход, композиционный подход, погрешность неадекватности модели.

С 1 сентября 2019 г. введён в действие ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». И теперь **риски статистических предположений, ложного принятия и ложного отклонения** решений о соответствии лаборатории должны оцениваться объективно, беспристрастно и постоянно. При этом отмечено, что международные или национальные стандарты и признанные технические требования, содержащие достаточную информацию о том, как осуществлять лабораторную деятельность, не требуются дополнять или переписывать в качестве внутренних процедур лаборатории.

«Риск-ориентированный подход» описан в ряде стандартов «международного происхождения»: ГОСТ Р ИСО 31000-2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство», ГОСТ Р 51901.7-2017/ISO/TR 31004:2013 «Менеджмент риска. Руководство по внедрению ИСО 31000» и ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» [в июне 2019 г. появилась новая версия – ISO/IEC 31010:2019 “Risk management – Risk assessment techniques”]. В этих стандартах **риск** определен как «влияние **неопределённости** на цели», а получение оценок предполагает процесс идентификации, анализа и оценивания риска.

Вместе с тем согласно Р 50.2.004-2000 «ГСИ. Определенные характеристики математических моделей зависимостей между физическими величинами. Основные положения» в общем случае **неопределённость в широком смысле** характеризует распределение вероятностей на множестве значений фактора риска, а **неопределённость в узком смысле** – параметр рассеяния этого же распределения [1].

Для лабораторий фактором риска в контрольных испытаниях является искомая величина, для которой установлена область несоответствия, в определительных испытаниях – показатели точности и (или) достоверности, а при калибровке – несоответствие диаграммы калибровки нормам доверительной вероятности.

В математической статистике **риск** характеризуют **вероятностями ошибок** 1-го и 2-го рода, а **риск** вообще – **вероятностью** наступления **нежелательного события**.

Перечень методов оценивания риска ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011, кроме FMEA (Failure Mode Effect Analysis) процесса, системы и программного обеспечения «для идентификации отказа компонентов, систем или процессов, которые могут привести к невыполнению их функции», содержит «вероятностно-статистические методы» – Марковский анализ, метод Монте-Карло, байесовский анализ и сети Байеса. Эти методы регламентированы ГОСТ Р 51901.12-2007 «Менеджмент риска. Метод анализа вида и последствий отказов» (FMEA), ГОСТ Р 50901.15-2005 «Менеджмент риска. Применение Марковских методов» и ГОСТ Р 54500.3.1-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 / Дополнение 1:2008 «Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло». При этом отмечено следующее:

работа с Марковским анализом невозможна без знания операций с матрицами, а полученные результаты трудны для понимания персоналом, не имеющим соответствующих технических знаний, навыков и опыта;

метод Монте-Карло используют для трансформирования распределений и расчёта вероятностей, а исходные данные должны быть *известным распределением*, но метод не может адекватно моделировать события с очень высокой и очень низкой вероятностью появления;

байесовский анализ является *экспертным методом*. Метод «матрицы последствий и вероятностей», как и метод Монте-Карло, требует, чтобы вероятности были известными.

Проблема состоит в том, что в Таблице А.1 «Характеристики методов оценки риска» ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 в графе «Анализ риска – Вероятностные характеристики» метод FMEA, публично высмеянный членом президентской комиссии по расследованию обстоятельств катастрофы Space Shuttle Challenger Нобелевским лауреатом Р. Фейнманом за оценку вероятности катастрофы 0,0001 [2], отмечен знаком **SA** – «строго применим», а Марковский анализ, метод Монте-Карло, байесовский анализ и «сети Байеса» отмечены знаком **NA**, который означает, что для анализа вероятностных характеристик риска эти методы *не применимы*.

Опыт астрономии за две с половиной тысячи лет построения математических моделей «мира» сформировал понятие *точности* решения измерительных задач как совпадение *расчётных* предсказаний с *измеренными* положениями небесных светил (до *точки*), а их разность (число) называли ошибкой. В XIX веке в работах П. Лапласа, К. Гаусса и А. Лежандра возникло представление о расхождении результатов вычислений по моделям движения небесных тел и измерений их положений с *точностью до распределения вероятностей*. Простота вычислений выделила линейные модели, для них основным распределением из-за универсальности при суммировании стал нормальный закон и его *моменты*. Для нелинейных моделей К. Якоби в 1834 г. получил *композицию* как функциональное преобразование распределений вероятностей входных переменных, что ориентировало на применение непараметрических методов. Так возникли *моментный* и *композиционный* подходы к оцениванию точности математических моделей объектов измерений.

Согласно ГОСТ 24026-80 «Планирование эксперимента. Термины и определения» адекватность математической модели определяется как «соответствие математической модели экспериментальным данным по выбранному критерию». «Статистический рецепт Фишера» по спецификации параметрических моделей критериями Стюдента и Фишера (F-критерия) для гипотезы нормальности ведёт к парадоксу Эльясберга–Хампеля [3, 4]. В «рецепте» нет ни слова об отсутствии независимости и катастрофической неробастности F-критерия, о том, что «различные критерии согласия оценивают часто несущественные аспекты подгонки и что статистически “плавную” нулевую гипотезу доказать нельзя, её можно только отклонить, хотя и при очень большом объёме выборки» [4].

Однако математический эквивалент «погрешности неадекватности математической модели» – погрешность предсказания моделью значений случайной функции, не использованных при её идентификации, как распределение погрешностей экстраполяции (функции компактности)

в методе максимума компактности (ММК) [5, 6] был. Прототипом ММК стал метод группового учёта аргументов [7] и схема перекрёстного наблюдения [8]. В 1980-е гг. ММК позволил оценивать точность и риск в задачах контроля объектов, к надёжности которых предъявлялись повышенные требования [6, 9]. Термин «погрешности неадекватности математической модели объекта измерений» и средний модуль погрешности неадекватности (СМПН) модели объекта были введены в Рекомендациях по метрологии Р 50.2.004-2000. Кроме того, анализ в рамках проекта «Прогноз–ММК» [9–11] выявил неизвестный ранее фактор катастроф – *погрешность неадекватности* математических моделей объектов. В список причин катастроф попали статистическая обработка результатов измерений и статистическое моделирование, погрешности измерений и погрешности неадекватности математических моделей.

В МИ 1967-89 «ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения» *погрешность неадекватности* названа проблемой «наименее развитых областей метрологии» и как методическая составляющая погрешности измерений вошла в условия проверки правильности постановки измерительных задач МИ 2091-90 «ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования». Также в МИ 1967-89 *погрешность неадекватности* названа фактором «№ 1» без каких-либо указаний на методы идентификации и в этом качестве фигурирует в ГОСТ Р 22.2.04-94 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Метрологическое обеспечение контроля состояния сложных технических систем. Основные положения и правила», ГОСТ Р 8.563-96 «ГСИ. Методики выполнения измерений» и его редакции ГОСТ Р 8.563-2009 «ГСИ. Методики (методы) измерений».

В 1986–1987 гг. в СССР по рекомендации рабочей группы ВНИИ стандартизации были отменены 24 стандарта по статистическим методам из 31, позже – и по прикладной статистике. Результаты анализа рабочей группы не были полностью опубликованы, а «традиционные предубеждения» продолжали действовать. Конечно, свято место пусто не бывает. В науке это – терминология, но не столько как список названий и определений, а как *подсистема* в *системе* ассоциаций естественного языка. Ассоциации индивидуумов обладают устойчивостью, нарушение которой представляет собой весьма «болезненный» процесс. Поэтому дискуссии о терминологии отличаются особой напряжённостью. В частности, *метрологический менталитет* опирается на ассоциативно-семантическое поле терминов метрологии с ассоциациями естественного языка, что влияет на выбор математических моделей объектов измерений и на логику статистического вывода при построении моделей. Другими словами, роль искусственных искажений *метрологического менталитета* в проблеме неадекватности чрезвычайно высока.

Терминологическая чехарда вместо работы над «наименее развитыми областями метрологии» привела к беспрецедентному «потоку» переводов с «новой» терминологией: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (далее – GUM), ISO 3534.1-93 «Statistical methods. Probability

and general statistical terms. Terms and definitions» [ГОСТ Р 50779.10-2000 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения»]; ISO 3534.2-93 "Statistical methods. Statistical quality control. Terms and definitions" [ГОСТ Р 50779.11-2000 «Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения»]; ISO 5725:1994 "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results" [ГОСТ Р ИСО 5725-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений»]; ISO 16269-6:2003 "Statistical interpretation of data – Pt. 6. Determination of statistical tolerance interval" [ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов»]; словарь VIM-3 [12].

Перевод GUM с художественной точки зрения можно считать почти безупречным, но отсутствие профессионального комментария насторожило [13]. Дело в том, что ряд терминов англоязычной научной литературы переводится как «неопределённость» [14], но имеет иной, чем «рассеяние», смысл. В первую очередь это относится к uncertainty как *неадекватности* математической модели физической величины измеряемому свойству объекта или *неадекватности* прибора цели измерения. В GUM «врождённой» *неопределённости* «на любом уровне детализации определения измеряемой величины» уделено много внимания (подробнее см. [15]) и заявлено о том, что «эта» неадекватность «должна быть» пренебрежимо мала. При этом использованы названия терминов математической статистики, не соответствующие в контексте GUM их определениям, например, *уровень доверия*, или термины *точечная оценка* и *интервальная оценка* подменялись словами «реалистическая оценка» и «безопасная оценка» с явным выражением им предпочтения. А моментом истины стал п. С.3.2 GUM: «Надлежащей мерой неопределённости результата измерения является не дисперсия наблюдаемой величины, а дисперсия среднего арифметического по выборке наблюдений».

При некотором сходстве описаний на уровне понятий явления неадекватности математических моделей в GUM и рекомендациях по метрологии Р 50.2.004-2000 в тексте GUM математическая сторона вопроса не раскрыта. Однако при представлении формул Тейлора как «новых законов» подчёркивается роль теории планирования эксперимента, тогда как в этой теории даже в ситуации, когда неизвестную модель «можно представить в виде отрезка ряда Тейлора, проверка адекватности оказывается единственным критерием годности модели. Все стройное здание построения математической модели может рухнуть, если не выполняются исходные предпосылки, лежащие в основе статистического анализа, такие, как предпосылки о виде законов распределения, однородности дисперсий и т. д.» [16].

В GUM термины *свёртка* явно и *композиция* неявно упомянуты, но «в силу известных трудностей» их применение признано «нецелесообразным», поскольку идеи GUM сосредоточились на ключевом слове «неопределённость». В аутентичном переводе оно ассоциируется с «отсутствием

определённости», а в сочетании со словами «стандартная», «суммарная» и «расширенная» – превращается в идиомы.

ГОСТ Р 50779.10-2000 и ГОСТ Р 50779.11-2000 внесли свою лепту в неадекватность терминологии: доверительная вероятность и уровень доверия – синонимы, нет терминов *композиция*, *свёртка* и *вероятность согласия*, а *толерантный интервал* = statistical coverage interval (статистический интервал охвата). Перевод tolerance interval = «**поле [область] допуска**» и формула толерантного интервала ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005, исправленная лишь в одноимённом ГОСТ Р 50779.29-2017, стали фоном нетолерантной критики *толерантных интервалов* специалистами по внедрению «неопределённости» в отечественную поверку [17]. «Критика» закончилась казусом: GUM стал одноимённым ГОСТ Р 54500.3-2011 с правильным определением *толерантного интервала*, но со «старыми» формулами, а в РМГ 29-2013 исчезли все «статистические» термины РМГ 29-99, кроме СКО как синонима стандартного отклонения.

Неадекватность ISO 5725:1994 проявилась в названии, так как «термин precision не следует использовать для термина accuracy» [18]. Математический аппарат ISO 5725:1994 – дисперсионный анализ. Условиями его применимости являются сбалансированность плана измерений, а также гауссовость, некоррелированность и гомоскедастичность данных [19]. В ISO 5725:1994 этим условиям не соответствуют все практические примеры [20–25], раскритикованные прямо в тексте стандарта. Даже установка ГОСТ Р ИСО 5725-2002 на «борьбу с выбросами» превратилась в подгонку под «нормальность», от которой пытались избавиться путём отмены стандартов по статистическим методам в 1986–1987 гг.

В итоге искажение понятий *неопределённость* в GUM и *прецизионность* в ISO 5725:1994 вызвало бесплодную дискуссию.

В 2004 г. на семинаре во ВНИИМ имени Д. И. Менделеева ведущие метрологи Национальной физической лаборатории Великобритании и Физико-технического института Германии М. Сох, W. Wöger, P. Harris и B. Siebert познакомились со статистической идентификацией погрешности неадекватности согласно Р 50.2.004-2000. Тогда было высказано общее мнение, что математическая часть теории безупречна, но можно поспорить по философским вопросам. А в 2007 г. в третьей редакции VIM [12] появился термин: «2.27 **дефинициальная неопределённость** – составляющая неопределённости измерений, являющаяся результатом ограниченной *детализации* в определении измеряемой величины. Примечания: 1. Дефинициальная неопределённость есть практический минимум неопределённости измерений при *любом* измерении данной величины. 2. *Любое* изменение *детализации* в определении величины ведет к другой дефинициальной неопределённости». Здесь *детализация* – аналог *кода структуры модели* из Р 50.2.004-2000.

«Спор» продолжился [1, 26–33] и закончился признанием: «задача, стоящая перед составителями словаря (VIM-3 – *авт.*) – гармонизировать терминологию, используемую при разных подходах, таким образом, чтобы одному понятию соответствовал только один термин, оказалась трудновыполнимой» [28].

Учёный совет ВНИИМ им. Д. И. Менделеева ещё в 2002 г. осудил «англоязычную гармонизацию», но, когда дискуссия о GUM дошла до поверки, один теоретик заявил, что этот вопрос в настоящее время стал тривиальным, и необходимость применения GUM, фактически являющегося международным регламентом, не обсуждается, так как дискуссии по неопределённости измерений – пройденный этап. Но в VIM-3 сохранены оба термина – «неопределённость» и «погрешность».

Если в GUM проблема неадекватности обозначена как «в принципе» решаемый вопрос, то в VIM-3 этот «вопрос» назван *дефинициальной неопределённостью* без какого-либо намёка на принцип решения.

Да, термина «*дефинициальная неопределённость*» в GUM нет. Есть «дефиниция» [34, п. 3.1.3] и «неадекватность» [34, п. 4.1.2], но без математического определения. «Неадекватность» описана в [34, п. D.1.1] как «неполнота модели» на понятийном уровне, а в плане идентификации – в Р 50.2.004-2000. В целом же проблема *дефинициальной неопределённости* с самого начала была центральной для GUM, но об отражении этого факта в международных стандартах говорить пока рано, а критика GUM [13] сразу назвала эту ситуацию «драмой неадекватности».

Нормативно подходы к оцениванию точности «триединством измерений» были разделены в ГОСТ Р 8.820-2013 «ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения»: «... следует использовать показатели точности: неопределённость по ГОСТ Р 54500.3, характеристики погрешности по МИ 1317 и РМГ 83, показатели правильности и прецизионности по ГОСТ Р ИСО 5725-1». Композиционный подход здесь представлен свёрткой в Приложении Д МИ 1317-2004 «ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров». В списке нет ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» и МИ 2916-2005 «ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач» со свёртками (композициями для линейных моделей) распределений, ГОСТ Р 50779.21-2004 «Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Ч. 1. Нормальное распределение», ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 с интервальными оценками и Р 50.2.004-2000 с проверкой неадекватности.

ГОСТ Р 50779.21-2004 соответствует ISO 2854:76 “Statistical interpretation of data – Techniques of estimation and tests relating to means and variance” [ИСО 2854-1976 «Статистическое представление данных. Методы оценки и проверки гипотез о средних значениях и дисперсиях»]. Вот только в GUM статистическая проверка гипотез не предусмотрена.

В Руководстве Guide OIML G 19:2017 “The role of measurement uncertainty in conformity assessment in legal metrology” (Роль неопределённости измерений в решениях об оценке соответствия в законодательной метрологии) была заявлена «новая» идея. «Включение понятия неопределённости измерений в принятие решений о соответствии испытаний

в рамках законодательной метрологии требует иного мышления и других рассуждений о таких решениях. В таком вероятностном подходе понятно, что следует учитывать определённые риски, указанные в ISO/IEC 17025:2005. Одним из способов рассмотрения этого является построение функции, известной как функция плотности вероятностей (PDF), которая представляет степень веры (уровень доверия) о знании истинного значения измеряемой величины». Там же была предложена «новая» концепция вероятности: «...PDF кодирует всю известную информацию об измеряемой величине, включая как систематические, так и случайные воздействия. В то время как кривая, подходящая для гистограммы только случайных колебаний, часто имеет гауссову форму, PDF не является подходящей для гистограммы, она скорее содержит дополнительную информацию, поступающую от систематических воздействий при измерении». Но «несмотря на то, что вместо понятий *погрешность* и *анализ погрешности* применительно к измерениям теперь используется понятие *неопределённость*, термин и понятие *погрешность* по-прежнему применимы при поверке средств и систем измерений».

И тут же Росаккредитация обязала лаборатории при определении измерительных возможностей «брать пример с GUM» и учитывать требования поверочных схем к эталонам. Но определить измерительные возможности по «косвенным и совместным измерениям» как «измерениям» значит определить их *дефинициальную неопределённость*.

Только в лабораториях сообразили, что «пересчитать погрешность в неопределённость» просто делением на «корень из трех» нельзя [35], как в ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 в соответствии с риск-ориентированным мышлением фактически уже декларируется необходимость «значительного переходного периода для наработки методического аппарата и обучения специалистов» [36].

Согласно Р 50.2.004-2000 «*погрешность неадекватности математической модели* – расчётная величина, разность расчётного значения выходной переменной модели объекта по данным измерений входных переменных и результата её измерения в соответствующих расчёту условиях». Ранее это были погрешности аппроксимации.

Погрешность неадекватности моделей функционального типа как случайная функция имеет характеристики положения и рассеяния. Первая – собственно функциональная зависимость, которую можно рассматривать как систематическую составляющую, а вторая – распределение отклонений от характеристики положения, её можно представлять зоной толерантности. Погрешность неадекватности для характеристики положения определяют остатки экстраполяционного функционала, а для характеристики рассеяния – контурная оценка по статистикам Смирнова или квантилям отклонений эмпирической функции распределения от теоретической. Контурные оценки погрешности неадекватности принятого распределения позволяют не рассматривать альтернативные гипотезы и последовательно строить свёртку функции распределения $F_X(x)$ наблюдаемой составляющей и ненаблюдаемых составляющих в виде

эквивалентных равномерных распределений на интервалах $[a, b]$:

$$f_X(x) * f_R(x) = f_{XR}(x) = [F_X(x-a) - F_X(x-b)] / (b-a).$$

Объединение «*» составляющих погрешности в ГОСТ 8.009-84, МИ 1317-2004 и свёртка распределений вероятностей в ГОСТ Р 54500.3-2011 (п. G.1.4) – одно и то же. Свёртка – это композиция при единичном якобиане функционального преобразования. По ней «могут быть рассчитаны интервалы с заданным уровнем доверия p », а «трапецеидальное распределение можно рассматривать как свёртку двух прямоугольных распределений» [34, пп. 4.3.9, G.1.4]. Но в [34] нет примеров такого расчёта, хотя в ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 есть таблицы толерантных интервалов.

Испытания в целях утверждения типа и поверка средств измерений являются контрольными. Их качественный результат – решение о степени соответствия количественных результатов установленным требованиям, требованиям государственных поверочных схем по доверительной вероятности или ГОСТ 27883-88 «Средства измерения и управления технологическими процессами. Общие требования и методы испытаний». ГОСТ 16504-81 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества. Основные термины и определения» также характеризует качественные результаты достоверностью, ошибками контроля 1-го и 2-го рода. В МИ 187-86 оценкой вероятности ошибки 2-го рода принята « $P_{\text{бам}}$ – наибольшая вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра средства измерений», а «при малом числе (или одном) поверяемых СИ вместо $(P_{\text{гр}})_{\text{мг}}$ в качестве критерия может быть установлена наибольшая вероятность $P_{\text{грм}}$ ошибочного признания дефектным любого в действительности годного экземпляра СИ». Риск *принятия ложного* решения связан с вероятностью нахождения контролируемой характеристики объекта вне границ допуска. Трудность лишь в том, как оценить эту вероятность.

Согласно ГОСТ 16504-81 достоверность имеет методическую и инструментальную составляющие. Методическая составляющая достоверности результата контрольных испытаний определяется *планом измерений* при испытаниях и браковочным условием с учётом нормы доверительной вероятности. Инструментальная составляющая определяется алгоритмом контроля и вероятностными свойствами контура контроля, включающего эталоны и средства вычислений.

Различают априорную и апостериорную достоверности. Априорную достоверность результата поверки устанавливают согласно МИ 188-86 «ГСИ. Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки» по распределению Иордана. Априорной достоверности фактически посвящен и ГОСТ Р 8.731-2010 «ГСИ. Системы допускового контроля. Основные положения». Апостериорную достоверность поверки согласно МИ 187-86 может

охарактеризовать оперативная характеристика по нормализованной плотности распределения вероятностей:

$$L(\tilde{x}) = \int_{-\gamma}^{\gamma} \varphi(\tilde{x}/\tilde{\sigma}) d\tilde{x},$$

где $\tilde{x}$, γ – нормализованные значение погрешности и её границы соответственно; $\varphi(\tilde{x}/\tilde{\sigma})$ – условная (при $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}$) плотность распределения вероятностей.

В обоих случаях допустима оценка PDF вида $\varphi = f_X(x) * f_R(x)$.

В ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 подразумевается, что риски должны оцениваться апостериорно с учётом параметров методик испытаний и калибровки. Это напрямую связано со статистическими предположениями относительно выбора структуры и методов оценивания параметров для моделей метрологических характеристики функционального вида.

Концептуально *дефинициальная неопределённость* – стандартное или среднее квадратическое (СКО) отклонение, но принцип её идентификации в GUM не указан. «Безусловным остается факт совпадения свёрток распределений составляющих бюджета неопределённости, оцениваемых по типу В, и равномерно распределённых компонентов бюджета погрешностей» [15]. Совпадение расчётов погрешности и неопределённости уже было в Р 50.2.038-2004 «ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределённости результата измерений», и Приложение Б с неопределённостью измерения было исключено.

Расчёт методами теории погрешностей с учётом погрешности неадекватности позволяет оценить *дефинициальную неопределённость* как компонент параметра рассеяния композиции или свёртки (т. е. PDF) выходной переменной «уравнения измерений» – *СКО композиции* [37–39, 15].

В «образцовом» примере «калибровки по GUM» термометра по статистическому ряду поправок b_k , $k=1,11$ с СКО $s=0,0035$ °C получена линейная функция поправок [34, п. Н.3]:

$$b(t) = y_1 + y_2(t - t_0).$$

При $t_0 = -20$ °C и $t = 21...27$ °C калибровка методом наименьших квадратов (МНК) дала оценки $y_1 = -0,1712$ °C, $y_2 = 0,00218$ и поправку $b(t = 30$ °C) = $-0,1494$ °C с суммарной стандартной неопределённостью $u_c = 4,1 \cdot 10^{-3}$ °C.

Однако анализ «примера GUM» выявил ряд «странностей». Во-первых, точность эталонного термометра не дана, контрольного измерения нет, а правила округления нарушены. Во-вторых, выбор модели обоснован тем, что «угловой коэффициент y_2 более чем в три раза превосходит свою стандартную неопределённость». Но согласно [34, п. 3.4.2] функция поправок как модель может быть *неполной*, и «для получения достоверных оценок неопределённости рекомендуется, по возможности, использовать эмпирические математические модели», причём возможность есть, а оценок неадекватности нет. В-третьих, хотя согласно [34, п. Н.3.6] утверждается, что «метод наименьших квадратов применим в случае, когда данные измерений известны неточно»,

для МНК это нарушение условия неконфликтности [37–39]. В-четвёртых, гипотеза «нормальности» не проверяется. В-пятых, функция поправок термометра содержит «разладки» [13], что ограничивает экстраполяцию модели.

Конечно, описанный выше пример калибровки «по GUM» – не образец для описания области аккредитации лабораторий. Калибровочная кривая [34, п. Н.3] как модель с кодом структуры $\mathcal{G}=11$ была аттестована по программе «ММК–стат 2.0» [11, 40]: $b_{11}^{[2]}(t) = -0,2148514 + 0,002182436t$, где жирным шрифтом выделены совпавшие при аттестации цифры оценок параметров модели; СМПН $\bar{\varepsilon}_{11}^{[2]} = 4,750704 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$; $^{[2]}$ – признак МНК; «11» – код; среднее абсолютное отклонение (CAO) поправок $d_{11}^{[2]} = 2,632977476 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Контроль погрешностей неадекватности систематической составляющей функции поправок, играющий ту же роль, что и контроль параметра Ω_p согласно МИ 187-86 «Методические указания ГСИ. Средства измерений. Критерии достоверности и параметры методик поверки» [41], позволяет оценить их модуль как дополнительную составляющую погрешности эталона $\Omega_N = \text{СМПН} - \text{CAO} = 2,117726524 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Идентификация по программе «ММИ–поверка» распределения поправок b_k , $k=1,11$ относительно среднего арифметического значения поправки $b_{cp} = -0,1635 \text{ } ^\circ\text{C}$ по критерию минимума контурной оценки погрешности неадекватности для функции распределения вероятностей среди типовых усечённых распределений свёртки в качестве наиболее правдоподобного дала распределение Лапласа при $\Delta_N = 1,617 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$. Его свёртка с эквивалентным равномерным распределением в пределах $\pm \Omega_N$ соответствует интервалу $[-0,012618; +0,012852] \text{ } ^\circ\text{C}$ и даёт оценку дефинициальной неопределённости $u_D = (\Delta_N + \Omega_N) / \sqrt{3} = 2,156245364 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ или 61,6 % СКО поправок s [34, п. Н.3].

Статистические предположения в методе совместных измерений [37–39] предусматривают оценивание неадекватности характеристик положения и рассеяния моделей в ходе перебора различных сочетаний их структур и методов оценивания параметров [15, 33, 41]. Эту задачу усложняет влияние разрядной сетки средства вычислений, «разладки» модели и нерегулярность зависимости критериев идентификации от кода структуры модели [41], что требует полного перебора вариантов.

Для данных [34, п. Н.3] среди пятипараметрических моделей не выше четвёртой степени первоначально оптимальной по минимуму СМПН оказалась функция поправок

$$B_{11011}(t) = -0,4409122 + 1,379538 \cdot 10^{-2}t + 5,303979 \cdot 10^{-6}t^3 - 3,728615 \cdot 10^{-7}t^4,$$

где $\bar{\varepsilon}_{11011}^{[2]} = 2,712152 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ при $\Delta_N = 1,5895 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$; $d_{11011}^{[2]} = 1,843555225 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$; $\Omega_N = 8,685967747 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$.

Отклонения от этой модели на интервале $[-0,013088; +0,012183] \text{ } ^\circ\text{C}$ описывает свёртка усечённого распределения Гаусса с равномерным распределением. Однако в связи с выявленными ранее [13] «разладками» модели перепроверка на компьютерах с различными размерами

разрядной сетки и при различных порядках модели максимальной сложности показала, что алгоритмы оптимального перебора кода структуры (детализации) [41] из-за нерегулярности зависимости СМПН от числа параметров модели могут «пропустить» модель оптимальной сложности. Такой «неоптимальной» моделью оказалась $B_{111110000}(t)$ при $\bar{\varepsilon}_{111110000}^{[2]} = 2,8516 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, а при проверке по программе «ММК–стат М» – $B_{010011}(t)$ при $\bar{\varepsilon}_{010011}^{[2]} = 3,4298559 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$. Поэтому при калибровке нужен полный перебор и контроль «разладок» моделей.

Задача калибровки и идентификации дефинициальной неопределённости по данным «образцового» примера [34, п. Н.3] решена несколькими способами с использованием:

ММК для функции преобразования и градуировочной характеристики [13];

МНК линейного регрессионного анализа [42, 43];

ММК как «СКО композиции» [15], упомянутым в книге [44]; графического метода согласно МИ 2916-2005.

Оценённая дефинициальная неопределённость u_D в зависимости от гипотезы о виде распределения поправок превышала 74 % оценки суммарной стандартной неопределённости u_c при «калибровке по GUM» [34, п. Н.3].

Интересно, что расчёт риска принятия ошибочного решения по результатам контрольных испытаний на соответствие после нормализации данных не отличается от его расчёта по данным протокола поверки средства измерений с учётом параметров методики поверки согласно Р 50.2.004-2000 и МИ 2916-2005.

Наиболее существенной информацией о результате калибровки является PDF возможных значений исправленного показания. Здесь и возникает риск указания доверительных границ диаграммы калибровки, не соответствующих нормам доверительной вероятности, толерантным или предикционным интервалам согласно ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005 и ГОСТ Р ИСО 16269-8-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение предикционных интервалов».

Заключение. Отсутствие учёта неадекватности математических моделей объектов испытаний как объектов измерений приводит к занижению вероятностей ложноположительных решений о соответствии или вероятностей ошибок 2-го рода, а отсутствие статистической проверки гипотез о структуре и параметрах этих моделей с целью поиска модели оптимальной сложности – к завышению вероятностей ложноотрицательных решений или ошибок 1-го рода.

Проблему, возникшую с введением ГОСТ ISO/IEC 17025-2019, точно охарактеризовал ещё П. В. Новицкий: «Очень часто доверительные погрешности рассчитывают, вводя ничем не обоснованное предположение о том, что вид закона распределения погрешностей будто бы точно известен. Такой прием является некорректным вне зависимости от того, допускается он сознательно или неосознанно» [45].

«Триединство измерений» (введение на равных правах расчётов «неопределённости, погрешности и прецизионности») в ГОСТ Р 8.820-2013 явно свидетельствует, что проблемы метрологии «новый метрологический менталитет» не

решил, и ситуация с каждым этапом «нововведений» только усложнялась.

Недостатки байесовского анализа как экспертного метода и метода Монте-Карло как метода моделирования заданных распределений, указанные в ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011, давно известны, но в явном виде в документах, связанных с расчётами согласно «Руководству по выражению неопределённости измерения», не отмечались.

Таким образом, гораздо большая определённость в расчётах риска имеет место в действующих российских нормативных документах, оперирующих понятиями «достоверность, погрешности измерений и неадекватности». Не говорится об этом и в проекте ревизии GUM. И как можно в этой ситуации вообще доверять расчётам неопределённости измерения, используемым то ли *сознательно*, то ли *неосознанно*. А так как ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 предполагает выбирать методы расчёта риска, то можно использовать методы, описанные в Р 50.2.004-2000, МИ 2916-2005 с моделями ГОСТ 8.009-84 и МИ 1317-2004 по критериям МИ 187-86 [46].

Список литературы

1. Левин С. Ф. Неопределённость в узком и широком смыслах результатов поверки средств измерений // Измерительная техника. 2007. № 9. С. 15–19.
2. Левин С. Ф. Погрешности измерений и вычислений как причина «катастрофического феномена 1985–1986 годов» в авиационной и ракетно-космической технике // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2000. № 3. С. 21–24.
3. Эльясберг П. Е. Измерительная информация: Сколько её нужно? Как её обрабатывать? М.: Наука, 1983.
4. Хампель Ф. и др. Робастность в статистике: Пер. с англ. М: Мир, 1989.
5. Левин С. Ф. Оптимальная интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций в детерминированной версии метода Монте-Карло и закон красного смещения. М.: АН СССР, 1980.
6. Вопросы кибернетики ВК-94. Статистические методы в теории обеспечения эксплуатации. М.: АН СССР, 1982.
7. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наукова думка, 1982.
8. Quenouille M. H., *Journal of Royal Statistical Society*, 1949, vol. 11, pp. 68–84.
9. Левин С. Ф. Методические рекомендации. Гарантированность программ обеспечения эксплуатации техники. Киев: Знание, 1989.
10. Левин С. Ф. Метод максимума компактности и комплексные измерительные задачи // Измерительная техника. 1995. № 7. С. 15–21.
11. Левин С. Ф. Метрологическое аттестование и сопровождение программ статистической обработки данных // Измерительная техника. 1991. № 12. С. 16–18.
12. VIM 3. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины, 3-е изд.: Пер. с англ. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, БелГИМ, СПб.: НПО «Профессионал», 2010. URL: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf (дата обращения: 10/01/2020).
13. Левин С. Ф. Легенда о неопределённости // Партнёры и конкуренты. 2001. № 1. С. 13–25.
14. Физическая энциклопедия в 5 т. Т. 3. М.: Большая Российская энциклопедия, 1992.
15. Левин С. Ф. Дефинициальная неопределённость и погрешность неадекватности // Измерительная техника. 2019. № 11. С. 7–17. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-11-7-17>
16. Адлер Ю. П., Грановский Ю. В., Маркова Е. В. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее. М.: Знание, 1982.
17. Левин С. Ф. Чего на самом деле должны опасаться ведущие специалисты по внедрению неопределённости в отечественные измерения // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 61–64.
18. Исаяев Л. К., Мардин В. В. Русско-англо-французско-испанский словарь основных и общих терминов в метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1998.
19. Шеффе Г. Дисперсионный анализ: Пер. с англ. Б. А. Севастьянова и В. П. Чистякова. М.: Государственное изд-во физ.-мат. литературы, 1963.
20. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 1 // Главный метролог. 2003. № 3. С. 5–7.
21. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 2 // Главный метролог. 2003. № 4. С. 44–54.
22. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 3 // Главный метролог. 2004. № 1. С. 44–53.
23. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 4 // Главный метролог. 2004. № 3. С. 52–56.
24. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 5 // Главный метролог. 2005. № 1. С. 19–26.
25. Левин С. Ф. Нерешённые проблемы «прецизионности». Ч. 6 // Главный метролог. 2005. № 3. С. 20–28.
26. Кокс М., Харрис П. Основные положения Приложения 1 к Руководству по выражению неопределённости измерений // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 17–24.
27. Ehrlich C., Dybkaer R., Wöger W., *OIML Bulletin*, April 2007, pp. 23–35.
28. Эрлик Ч., Дибкайер Р., Вёгер В. Эволюция философии и трактовки понятия «измерение» // Главный метролог. 2016. № 1. С. 11–30.
29. Левин С. Ф. Руководство по выражению неопределённости измерения: ревизия – смена парадигмы или новая санкция? // Законодательная и прикладная метрология. 2016. № 5. С. 31–44. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2016-5-31-44>
30. Левин С. Ф. Метрология: понятия и термины, фразеологизмы и катахрезы. Ч. 1 // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2017. № 1. С. 35–38.
31. Левин С. Ф. Метрология: понятия и термины, фразеологизмы и катахрезы. Ч. 2 // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2017. № 2. С. 35–38.
32. Левин С. Ф. Концепция неопределённости – Теория погрешностей: Философский спор и математические результаты // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2018. № 4. С. 32–36.

33. Левин С. Ф. Руководство по выражению неопределённости измерения: проблемы, нереализованные возможности и ревизия. Ч. 3. Приведение к общему терминологическому знаменателю // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 14–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-14-22>

34. Руководство по выражению неопределённости измерения: Пер. с англ. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, БелГим / Науч. ред. проф. В. А. Слаева. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.

35. Левин С. Ф. Можно ли «точно» пересчитать погрешность в неопределённость? // Законодательная и прикладная метрология. 2017. № 3. С. 18–25.

36. Развитие деятельности по калибровке средств измерений. Доклад рабочей группы. М.: РСПП, 2016.

37. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 3. С. 23–24.

38. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 4. С. 32–36.

39. Левин С. Ф. Математическая теория измерительных задач. Ч. 10. Метод совместных измерений // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2006. № 5. С. 33–34.

40. Левин С. Ф. Измерительная задача идентификации функции погрешности // Законодательная и прикладная метрология. 2016. № 4. С. 27–33.

41. Левин С. Ф. Статистические процедуры контроля при высокоточных измерениях // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2018. № 3. С. 8–11.

42. Левин С. Ф. Калибровка средства измерений – Три решения одной измерительной задачи // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2018. № 1. С. 35–38.

43. Большее Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. Изд. 3-е. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1983.

44. Селиванов М. Н., Фридман А. Э., Кудряшова Ж. Ф. Качество измерений. Л.: Лениздат, 1987.

45. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.

46. Левин С. Ф. Качество поверки средств измерений и апостериорная достоверность контроля // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 20–25.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-9-20-25>

References

1. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 9, pp. 921–928. <https://doi.org/10.1007/s11018-007-0173-5>

2. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2000, no. 3, pp. 21–24 (in Russian).

3. Elyasberg P. E., *Izmeritel'naya informatsiya: Skolko ee nuzhno? Kak ee obrabatyvat?* Moscow, Nauka Publ., 1983 (in Russian).

4. Hampel F. R. et al., *Robust Statistics*, New York: John Wiley & Sons, 1986.

5. Levin S. F., *Optimal'naya interpolatsionnaya filtratsiya statisticheskikh harakteristik sluchajnykh funktsij v determinirovannoy*

versii metoda Monte-Karlo i zakon krasnogo smeshcheniya, Moscow, AN SSSR Publ., 1980 (in Russian).

6. *Voprosy kibernetiki VK-94. Statisticheskie metody v teorii obespecheniya ekspluatatsii*, Moscow, AN SSSR Publ., 1982.

7. Ivahnenko A. G., *Induktivnyj metod samoorganizatsii modelej slozhnykh system*, Kiev, Naukova dumka Publ., 1982 (in Russian).

8. Quenouille M. H., *Journal of Royal Statistical Society*, 1949, B 11, pp. 68–84.

9. Levin S. F., *Metodicheskie rekomendatsii. Garantirovanost programm obespecheniya ekspluatatsii tekhniki*, Kiev, Znanie Publ., 1989 (in Russian).

10. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 1995, vol. 38, no. 7, pp. 732–743. <https://doi.org/10.1007/BF02616256>

11. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 1991, vol. 34, no. 12, pp. 1221–1225. <https://doi.org/10.1007/BF00982559>

12. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd edition, available at: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf (accessed: 10/01/2020).

13. Levin S. F., *Partnery i konkurenty*, 2001, no. 1, pp. 13–25 (in Russian).

14. *Fizicheskaya enciklopediya v 5 tom*. Vol. 3, Moscow, Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya Publ., 1992 (in Russian).

15. Levin S. F., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 11, pp. 933–944. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01716-0>

16. Adler Yu. P., Granovskij Yu. V., Markova E. V., *Teoriya eksperimenta: proshloe, nastoyashchee, budushchee*, Moscow, Znanie Publ., 1982 (in Russian).

17. Levin S. F., *Izmeritel'naya tekhnika*, 2008, no. 12, pp. 61–64 (in Russian).

18. Isaev L. K., Mardin V. V., *Russko-anglo-francuzsko-ispanskij slovar osnovnykh i obshchih terminov v metrologii*, Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1998 (in Russian).

19. Sheffe H., *The Analysis of Variance*, New York, John Wiley & Sons, 1958.

20. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2003, no. 3, pp. 5–7 (in Russian).

21. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2003, no. 4, pp. 44–54 (in Russian).

22. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2004, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).

23. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2004, no. 3, pp. 52–56 (in Russian).

24. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2005, no. 1, pp. 19–26 (in Russian).

25. Levin S. F., *Glavnyj metrolog*, 2005, no. 3, pp. 20–28 (in Russian).

26. Koks M., Harris P., *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, no. 4, pp. 336–345. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0146-5>

27. Ehrlich C., Dybkaer R., Wöger W., *OIML Bulletin*, April 2007, pp. 23–35.

28. Erlik Ch., Dibkajer R., Vyoger V., *Glavnyj metrolog*, 2016, no. 1, pp. 11–30 (in Russian).

29. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2017, no. 1, pp. 35–38 (in Russian).

30. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2017, no. 2, pp. 35–38 (in Russian).
31. Levin S. F., *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, 2016, no. 5, pp. 31–44 (in Russian).
32. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2018, no. 4, pp. 32–36 (in Russian).
33. Levin S. F., *Izmeritel'naya tekhnika*, 2019, no. 7, pp. 14–22 (in Russian).
34. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Sec. Ed. Geneva, BIMP, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1995.
35. Levin S.F., *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, 2017, no. 3, pp. 18–25 (in Russian).
36. *Razvitie deyatel'nosti po kalibrovke sredstv izmerenij. Doklad rabochej gruppy*, Moscow, RSPP Publ., 2016 (in Russian)
37. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2006, no. 3, pp. 23–24 (in Russian).
38. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2006, no. 4, pp. 32–36 (in Russian).
39. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2006, no. 5, pp. 33–34 (in Russian).
40. Levin S. F., *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, 2016, no. 4, pp. 27–33 (in Russian).
41. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2018, no. 3, pp. 8–11 (in Russian).
42. Levin S. F., *Kontrolno-izmeritelnye pribory i sistemy*, 2018, no. 1, pp. 35–38 (in Russian).
43. Bol'shev L. N., Smirnov N. V., *Tablicy matematicheskoy statistiki. Izd. 3*, Moscow, Nauka Publ., 1983 (in Russian).
44. Selivanov M. N., Fridman A. E., Kudryashova Zh. F., *Kachestvo izmerenij*, Leningrad, Lenizdat Publ., 1987 (in Russian).
45. Novickij P. V., Zograf I. A., *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij*, Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1985 (in Russian).
46. Levin S. F. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 863–871. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1516-0>

Дата поступления: 10.10.2019.

Дата принятия: 09.03.2020.

Inadequacy for mathematical models of measurement objects and risk calculations according to ISO/IEC 17025-2019

Sergey F. Levin

Moscow Institute for Expertise and Tests, Moscow, Russian Federation, e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

The problem of inadequacy of mathematical models of measurement objects is considered in connection with the problem of “definitional uncertainty of measurement” and the need for risk management in accordance with GOST ISO/IEC 17025-2019 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”. The prehistory of the problem is described: from the formation of moment and compositional approaches to estimating accuracy to the introduction of a special term “inadequacy error for mathematical model of measurement object”. The negative impact of hopelessness of conceptual and terminological transformations in metrology and critical contradiction of the applicability estimates for “statistical methods” of GOST R ISO/IEC 31010-2011 “Risk management – Risk assessment techniques” and “Guide to the expression of uncertainty in measurement” is noted. It is shown that taking into account the inadequacy of probabilistic models in risk calculations is a necessary condition for results reliability.

Key words: mathematical model, definitional uncertainty, moment approach, compositional approach, inadequacy of model error.

Оценивание интеграла от квадрата плотности вероятности одномерной случайной величины

А. В. Лапко^{1, 2}, В. А. Лапко^{1, 2}

¹Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск, Российская Федерация, e-mail: lapko@ict.krasn.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Российская Федерация, e-mail: lapko@ict.krasn.ru

Рассмотрены проблемы прямого оценивания исследуемого функционала с использованием ядерных статистик. При выборе оптимального количества интервалов дискретизации области значений одномерной случайной величины установлено, что функционал от квадрата плотности вероятности является константой, значения которого не зависят от параметров плотности вероятности. Определены функциональные зависимости исследуемой константы от коэффициента контрэксцесса закона распределения случайной величины. Проанализированы установленные зависимости для семейств логнормальных плотностей вероятностей, законов распределения Стьюдента и семейств плотностей вероятностей с распределением Гаусса. По полученным результатам сформирована обобщённая модель между изучаемой константой и коэффициентом контрэксцесса, которая не зависит от вида плотности вероятности, а определяется оценкой указанного коэффициента. Разработана методика оценивания интеграла от квадрата плотности вероятности. Эффективность предлагаемой методики подтверждена результатами вычислительных экспериментов. Условия вычислительного эксперимента значительно отличаются от информации, применяемой при синтезе моделей зависимости между изучаемой константой и коэффициентом контрэксцесса. Установлены условия компетентности методики оценивания интеграла квадрата плотности вероятности от коэффициента контрэксцесса при использовании предлагаемых моделей зависимости изучаемой константы от условий вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: функционал от квадрата плотности вероятности, одномерная случайная величина, коэффициент контрэксцесса, смесь плотностей вероятностей, логнормальное распределение, закон распределения Стьюдента.

Введение. Традиционный подход вычисления функционалов от плотности вероятности $p(x)$ в условиях неопределённости состоит в использовании ядерных оценок $p(x)$ [1–11]. Реализация данного подхода сопровождается значительными вычислительными затратами и необходимостью исследования асимптотических свойств непараметрических оценок рассматриваемых функционалов от плотности вероятности. В работе [12] при анализе асимптотических свойств модификации непараметрической оценки плотности вероятности обосновано, что функционал

$$W_2 = \left(\Delta \int_{\alpha}^{\beta} p^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (1)$$

является константой для законов распределения с конечными пределами α , β изменения значений случайных величин. Здесь $\Delta = (\beta - \alpha)$ – длина интервала изменения их значений. Для сравнения закономерностей, свойственных случайным величинам с конечными и бесконечными интервалами их значений, введём определение. При бесконечных α , β под

значением Δ будем понимать минимальную длину $\bar{\Delta}$ основной части Δ , вероятность попадания случайных величин x в которую равна 0,997. Остальные значения случайной величины будем считать выбросами. Данное определение позволяет с единых позиций сравнивать эффективность оценивания функционала (1) для симметричных и несимметричных законов распределения случайных величин, включая смеси плотностей вероятностей.

Значения функционала W_2 определяются видом плотности вероятности и не зависят от параметров $p(x)$. На этом основана методика дискретизации области значений случайных величин [13]. Полученные результаты имеют важное значение при восстановлении плотности вероятности в условиях статистических данных большого объёма, доверительного оценивания $p(x)$, проверки гипотез о распределениях случайных величин и решении задач автоматической классификации [14–17].

Цель настоящей работы – создание методики вычисления интеграла от квадрата плотности вероятности одномерной случайной величины, обеспечивающей обход проблемы прямого оценивания исследуемого функционала с использованием ядерных статистик.

Таблица 1

Значения функционала W_2 и параметров плотностей вероятностей $p(x)$ одномерной случайной величины

Закон распределения	$\bar{\Delta}$	η	δ	W_2
Лапласа	8,215	6,000	0,408	1,704
Экспоненциальный	5,810	9,000	0,330	1,704
Равномерный	0,998	1,800	0,745	0,998
Логистический	6,501	4,200	0,488	1,472
Нормальный $N(m; \sigma)$	6,000	3,000	0,577	1,300
Стьюдента:				
$s=5$	10,752	8,829	0,337	1,637
$s=6$	9,600	5,998	0,408	1,562
$s=7$	8,880	5,000	0,447	1,514
$s=8$	8,400	4,500	0,471	1,480
$s=9$	8,050	4,200	0,488	1,455
$s=10$	7,784	4,000	0,5	1,436
$s=20$	6,753	3,375	0,544	1,359
$s=30$	6,459	3,231	0,556	1,336
$s=40$	6,321	3,167	0,562	1,325
$s=50$	6,240	3,130	0,565	1,319
$s=60$	6,187	3,107	0,567	1,314
Логнормальный $LN(a; c)$:				
$LN(0,1; 0,1)$	0,609	3,123	0,566	1,248
$LN(0,1; 0,2)$	1,390	3,678	0,521	1,339
$LN(0,1; 0,3)$	2,238	4,645	0,464	1,396
$LN(0,1; 0,4)$	3,285	6,260	0,400	1,477
$LN(0,1; 0,5)$	4,623	8,898	0,335	1,585
$LN(0,1; 0,6)$	6,371	13,273	0,274	1,722
$LN(0,1; 0,7)$	8,685	20,791	0,219	1,892
$LN(0,1; 0,8)$	11,769	34,340	0,171	2,099
$LN(0,1; 0,9)$	15,898	59,224	0,130	2,350
$LN(0,1; 1)$	21,436	113,936	0,094	2,651
Смесь плотностей вероятностей (2):				
$N(-1,5; 0,5), N(1,5; 0,5)$	5,748	1,380	0,851	1,273
$N(-1,5; 0,75), N(-1,5; 0,75)$	7,122	1,720	0,762	1,168
$N(-1,5; 1), N(1,5; 1)$	8,496	2,041	0,700	1,151
$N(-1,5; 1,25), N(1,5; 1,25)$	9,869	2,303	0,659	1,174
$N(-1,5; 1,5), N(1,5; 1,5)$	11,244	2,500	0,632	1,203
$N(-1,5; 1,75), N(1,5; 1,75)$	12,619	2,641	0,615	1,227
$N(-1,5; 2), N(1,5; 2)$	13,996	2,741	0,604	1,245
$N(-3; 0,5), N(0; 0,5), N(3; 0,5)$	8,612	1,619	0,786	1,273
$N(-3; 1), N(0; 1), N(3; 1)$	11,223	1,899	0,726	1,097
$N(-3; 2), N(0; 2), N(3; 2)$	16,453	2,461	0,637	1,190
$N(-3; 1), N(0; 0,5), N(3; 1)$	11,223	2,022	0,703	1,207
$N(-3; 0,5), N(0; 1), N(3; 0,5)$	8,612	1,519	0,811	1,177

Окончание таблицы 1

Закон распределения	$\bar{\Delta}$	η	δ	W_2
Смесь плотностей вероятностей (2):				
$N(-3; 2), N(0; 0,5), N(3; 2)$	16,447	3,008	0,577	1,447
$N(-3; 0,5), N(0; 1), N(3; 2)$	12,535	2,459	0,638	1,270
$N(-3; 0,5), N(0; 1), N(3; 1)$	9,918	1,726	0,761	1,153
$N(-3; 0,5), N(0; 2), N(3; 1)$	11,019	1,559	0,801	1,245
$N(-3; 0,5), N(0; 0,5), N(3; 0,5), N(6; 0,5)$	11,512	1,698	0,767	1,274
$N(-3; 1), N(0; 1), N(3; 1), N(6; 1)$	14,024	1,853	0,735	1,070
$N(-3; 2), N(0; 2), N(3; 2), N(6; 2)$	19,056	2,260	0,665	1,149
$N(-3; 0,5), N(0; 1), N(3; 1), N(6; 2)$	15,281	2,174	0,678	1,198
$N(-3; 1), N(0; 0,5), N(3; 0,5), N(6; 1)$	14,024	1,926	0,721	1,232
$N(-3; 0,5), N(0; 1), N(3; 2), N(6; 0,5)$	12,288	1,584	0,795	1,194

Анализ результатов вычислительных экспериментов. В процессе вычислительных экспериментов определяли количественные характеристики различных законов распределения одномерных случайных величин и соответствующих им функционалов W_2 (1). Рассматривали случайные величины с симметричными и несимметричными плотностями вероятностей, включая многомодальные $p(x)$. Подобные плотности вероятности характерны для спектральных признаков данных дистанционного зондирования природных объектов [16, 17]. Полученные результаты представлены в табл. 1. При формировании многомодальных законов распределения использовали смесь плотностей вероятностей

$$p(x) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M p_j(x), \quad (2)$$

где M – количество составляющих смеси $p(x)$.

Параметры эксцесса η и коэффициента контрэксцесса δ вычисляли по выражениям

$$\eta = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} \left(x - \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \right)^4 p(x) dx;$$

$$\delta = (\eta)^{-1/2},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение (СКО).

В табл. 1 приняты следующие обозначения: m, σ – математическое ожидание и СКО случайной величины с нормальным законом распределения; s – число степеней свободы распределения Стьюдента; a, c – параметры логнормального закона распределения. Информация, характеризующая одномодальные законы распределения (Лапласа, экспоненциальный,

равномерный, логистический, нормальный), приведена при конкретных значениях параметров. При изменении параметров законов распределения меняется оценка длины интервала Δ изменения случайных величин, но при этом значение функционала W_2 остаётся постоянным. Например, для нормальной плотности вероятности при изменении $\sigma \in [0,5; 10]$ значения $W_2 = 1,301$. В столбце Δ приведены частные значения минимальной длины при $\sigma = 1$. Подобные закономерности свойственны приведённым выше законам распределения.

Для симметричных одномодальных законов распределения случайных величин значения константы $W_2 \in [1,3; 1,704]$. С увеличением W_2 увеличиваются параметры эксцесса $\eta \in [3; 6]$. Для смесей плотностей вероятностей ($M=2, 3, 4$) при изменении $W_2 \in [1,07; 1,447]$ параметры эксцесса и контрэксцесса находятся в интервалах $\eta \in [1,853; 3,008]$, $\delta \in [0,735; 0,577]$. Явная зависимость W_2 от количества мод не наблюдается. Константа W_2 нелинейно зависит от СКО составляющих смеси законов распределения. При $M=2$ с увеличением СКО параметр эксцесса увеличивается. При этом константа W_2 нелинейно зависит от параметров η, δ . Отмеченная тенденция сохраняется для условий $M=3; 4$.

Для семейства логнормальных законов распределения

$$p(x) = \frac{1}{cx\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\ln x - a)^2 / (2c^2)\right]$$

значения константы W_2 не зависят от параметра a . С увеличением параметра c в интервале $[0,1; 1]$ константа W_2 увеличивается от 1,248 до 2,651. В табл. 1 $N_1=10$ – количество составляющих семейства плотностей вероятностей.

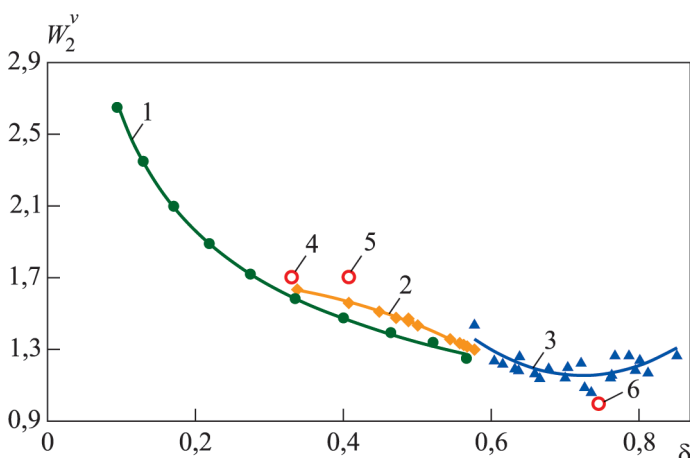


Рис. 1. Модели зависимостей констант W_2^v , $v=1, 3$, от коэффициента контрэксцесса δ для семейств плотностей вероятностей: 1–3 соответствуют моделям (3)–(5); точки 4–6 – законы распределения соответственно экспоненциальный, Лапласа и равномерный

Fig. 1. Models of dependences of constants W_2^v , $v=1, 3$ on the antikurtosis coefficient δ for families of probability densities:

1–3 correspond to the models (3), (4), (5); points 4–6 correspond to the following distribution laws: exponential, Laplace and uniform

Отмеченная закономерность характеризуется функциональной зависимостью

$$\bar{W}_2^1(\delta) = 1,0107\delta^{-0,4116}. \quad (3)$$

При этом средняя относительная ошибка аппроксимации

$$\bar{R}_2^1 = \frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} |W_2^j - \bar{W}_2^1(\delta)| / W_2^j$$

соответствует значению 0,00646.

Для случайных величин с законом распределения Стьюдента при увеличении числа степеней свободы s константа W_2 уменьшается. Например, $W_2 = 1,637$ при $s=5$, а при $s=60$ значение $W_2 = 1,314$. Отмеченная тенденция уменьшения значений W_2 является ожидаемой. С увеличением числа степеней свободы закон распределения Стьюдента приближается к закону Гаусса. Поэтому значения функционалов W_2 этих законов при $s>30$ являются близкими. Эта тенденция сохраняется и для параметра эксцесса и коэффициента контрэксцесса. Используя информацию табл. 1 о законах распределения Стьюдента, нормального и логистического распределений, можно оценить функциональную зависимость между константой W_2 и коэффициентом контрэксцесса δ одномерной случайной величины в виде

$$\bar{W}_2^2(\delta) = -2,6\delta^2 + 0,962\delta + 1,606. \quad (4)$$

Для модели (4) средняя относительная ошибка аппроксимации $\bar{R}_2^2 = 0,0022$ при $N_2 = 13$. Здесь N_2 – количество составляющих семейства законов распределения Стьюдента, включая нормальное и логистическое распределение в табл. 1.

Для смесей законов распределения по данным табл. 1 функциональную зависимость между константой W_2 и коэффициентом контрэксцесса δ можно записать как

$$\bar{W}_2^3(\delta) = 9,5\delta^2 - 13,705\delta + 6,11 \quad (5)$$

со средней относительной ошибкой аппроксимации $\bar{R}_2^3 = 0,0393$. Здесь $N_3 = 22$ – количество составляющих смеси плотностей вероятностей (2), представленных в табл. 1.

В графическом виде зависимости (3)–(5) представлены на рис. 1.

Обобщим полученные результаты при построении функциональной модели $W_2(\delta)$ по данным табл. 1:

$$\bar{W}_2(\delta) = 31,27\delta^4 - 62,73\delta^3 + 46,34\delta^2 - 16,18\delta + 3,8 \quad (6)$$

либо

$$\bar{W}_2(\delta) = 1,06\delta^{-0,386}. \quad (7)$$

В этих условиях для моделей (6), (7) средняя относительная ошибка аппроксимации $\bar{R}_2$ равна соответственно 0,0275; 0,037. В графическом виде зависимости (6), (7) представлены на рис. 2.

Значения δ, W_2 из табл. 1 обозначены на рис. 1 точками, а значения δ, W_2 для контрольных плотностей вероятностей

показаны на рис. 2 в виде треугольников и квадратов для смеси плотностей вероятности при $M=5$ и логнормального закона распределения соответственно. Анализ результатов обобщения зависимости $W_2(\delta)$, представленных на рис. 2, подтверждает ранее выявленные закономерности. С увеличением δ уменьшаются значения W_2 . Наибольшее отклонение установленной зависимости $\bar{W}_2(\delta)$ от W_2 наблюдается для случайных величин, характеризующихся равномерной плотностью вероятности и законом распределения Лапласа.

Методика оценивания интеграла от квадрата плотности вероятности. Пусть имеется выборка $V=(x^i, i=\overline{1, n})$, составленная из статистически независимых наблюдений одномерной случайной величины x с плотностью вероятности $p(x)$.

Необходимо оценить значения функционала

$$W'_2 = \int_{\alpha}^{\beta} p^2(x) dx.$$

Реализация предлагаемой методики сводится к выполнению следующих действий:

1. По исходной выборке V оценивают длину $\bar{\Delta}$ интервала изменения значений случайной величины

$$\bar{\Delta} = x_{\max} - x_{\min},$$

если пределы α, β изменения x конечны. Здесь $x_{\max}, x_{\min}$ – максимальное и минимальное значения из выборки V .

При априорных сведениях о бесконечных пределах изменения случайных величин из выборки V отсеивают ряд наблюдений. Критерием отсеивания является принадлежность случайных величин из выборки V минимальному интервалу с частотой, равной 0,997. Из оставшихся наблюдений определяют значение $\bar{\Delta}$.

Вычисляют оценку $\bar{\delta}$ коэффициента контрэксцесса

$$\bar{\delta} = (\bar{\eta})^{-1/2},$$

где

$$\bar{\eta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x^i - \bar{x})^4 / \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x^i - \bar{x})^2 \right]^2;$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^i.$$

2. Используя одну из моделей (6), (7) зависимости $W_2(\delta)$, находят значение $W_2(\bar{\delta})$.

3. С учётом полученных значений $W_2(\bar{\delta}), \bar{\Delta}$ вычисляют оценку функционала W'_2 :

$$\bar{W}'_2 = (W_2(\bar{\delta}))^2 / \bar{\Delta}.$$

Результаты применения предлагаемой методики приведены в табл. 2. При исследовании применяли контрольные

плотности вероятности типа смеси $p_1(x)$ (2) при $M=5$ и логнормальный закон распределения $p_2(x)$. Эти законы распределения случайных величин не использовали при синтезе моделей (6), (7). Составляющие смеси $p_1(x)$ характеризуются значениями математических ожиданий: $m_1=-3; m_2=0; m_3=3; m_4=6; m_5=9$. В процессе вычислительных экспериментов рассчитывали СКО $\sigma_v, v=1,5$. Коэффициент контрэксцесса для логнормального закона распределения $p_2(x)$ выбирали вне интервала определения модели $\bar{W}_2(\delta)$ (см. рис. 2).

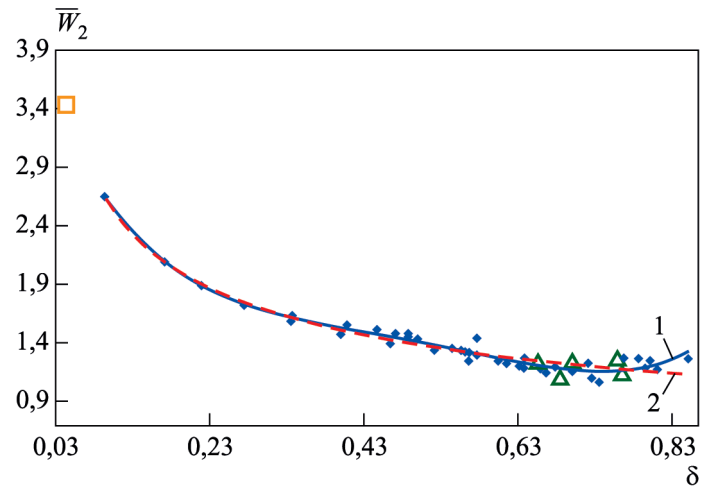


Рис. 2. Зависимости константы $\bar{W}_2$ от коэффициента контрэксцесса δ согласно моделям (6), (7) – 1, 2 соответственно

Fig. 2. Dependence of the constant $\bar{W}_2$ on the antikurtosis coefficient δ , curves 1, 2 correspond to models (6), (7)

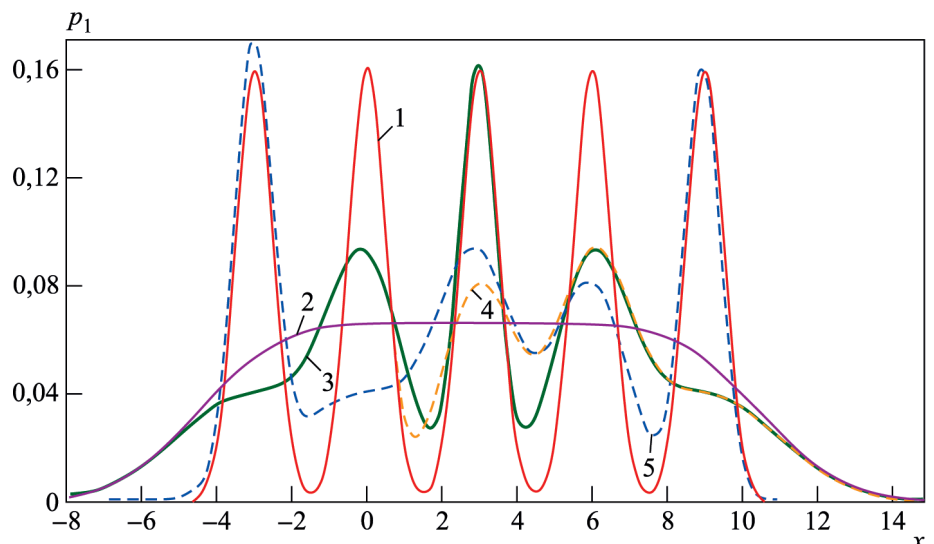


Рис. 3. Контрольные плотности вероятностей $p_1(x)$, рассчитанные при условиях 1–5 вычислительных экспериментов из табл. 2 – кривые 1–5 соответственно

Fig. 3. A graphic illustration of the control of density of the probabilities $p_1(x)$; curves 1–5 correspond to the conditions of computational experiments 1–5 of table 2

Таблица 2

Значения оценок константы W_2 и функционала W'_2 для контрольных плотностей вероятностей $p_1(x)$, $p_2(x)$ для моделей (6), (7)

№ п/п	Контрольная плотность вероятности	α	$\bar{\delta}$	$\bar{W}_2(\bar{\delta})$		W'_2		R	
				(6)	(7)	(6)	(7)	(6)	(7)
1	$p_1(x)$, $\sigma_v=0,5$; $v=\overline{1,5}$; $\bar{\Delta}=14,432$; $W_2=1,276$; $W'_2=0,113$	1,00	0,759	1,164	1,179	0,094	0,096	0,168	0,150
		0,95	0,721	1,162	1,203	0,094	0,100	0,168	0,115
		1,05	0,797	1,200	1,157	0,100	0,093	0,115	0,177
		0,90	0,683	1,184	1,228	0,097	0,104	0,142	0,080
		1,10	0,835	1,280	1,136	0,114	0,089	-0,009	0,212
2	$p_1(x)$, $\sigma_v=2$; $v=\overline{1,5}$; $\bar{\Delta}=21,738$; $W_2=1,119$; $W'_2=0,058$	1,00	0,685	1,183	1,227	0,064	0,069	-0,103	-0,190
		0,95	0,651	1,215	1,251	0,068	0,072	-0,172	-0,241
		1,05	0,719	1,163	1,204	0,062	0,067	-0,069	-0,155
		0,90	0,617	1,256	1,277	0,073	0,075	-0,259	-0,293
		1,10	0,754	1,162	1,182	0,062	0,064	-0,069	-0,103
3	$p_1(x)$, $\sigma_1=2$; $\sigma_2=1$; $\sigma_3=0,5$; $\sigma_4=1$; $\sigma_5=2$; $\bar{\Delta}=21,729$; $W_2=1,234$; $W'_2=0,07$	1,00	0,655	1,211	1,248	0,068	0,072	0,029	-0,029
		0,95	0,622	1,250	1,273	0,072	0,075	-0,029	-0,071
		1,05	0,687	1,181	1,225	0,064	0,069	0,086	0,014
		0,90	0,589	1,292	1,300	0,077	0,078	-0,100	-0,114
		1,10	0,720	1,163	1,203	0,062	0,067	0,114	0,043
4	$p_1(x)$, $\sigma_1=0,5$; $\sigma_2=0,5$; $\sigma_3=1$; $\sigma_4=1$; $\sigma_5=2$; $\bar{\Delta}=18,081$; $W_2=1,223$; $W'_2=0,083$	1,00	0,701	1,172	1,216	0,076	0,082	0,084	0,012
		0,95	0,666	1,200	1,240	0,080	0,085	0,036	-0,024
		1,05	0,736	1,160	1,193	0,074	0,079	0,108	0,048
		0,90	0,631	1,239	1,266	0,085	0,089	-0,024	-0,072
		1,10	0,771	1,171	1,172	0,076	0,076	0,084	0,084
5	$p_1(x)$, $\sigma_1=0,5$; $\sigma_2=2$; $\sigma_3=1$; $\sigma_4=1$; $\sigma_5=0,5$; $\bar{\Delta}=15,09$; $W_2=1,153$; $W'_2=0,088$	1,00	0,765	1,167	1,176	0,090	0,092	-0,023	-0,045
		0,95	0,726	1,161	1,199	0,089	0,095	-0,011	-0,080
		1,05	0,803	1,208	1,154	0,097	0,088	-0,102	0,000
		0,90	0,688	1,180	1,225	0,092	0,099	-0,045	-0,125
		1,10	0,841	1,297	1,133	0,112	0,085	-0,273	0,034
6	$p_2(x)$ при $a=0,1$; $c=1,2$; $\bar{\Delta}=38,81$; $W_2=3,44$; $W'_2=0,305$	1,00	0,044	3,173	3,542	0,259	0,323	0,151	-0,059
		0,95	0,042	3,201	3,612	0,264	0,336	0,134	-0,102
		1,05	0,046	3,146	3,476	0,255	0,311	0,164	-0,020
		0,90	0,040	3,229	3,689	0,269	0,351	0,118	-0,151
		1,10	0,048	3,119	3,414	0,251	0,300	0,177	0,016

При организации вычислительных экспериментов предполагали погрешность $\bar{\delta} = \alpha\delta$ оценивания значений коэффициента контрэксцесса. В табл. 2 представлены относительные ошибки оценивания функционала W'_2 типа

$$R = (W'_2 - \bar{W}'_2) / W'_2$$

при использовании моделей (6), (7) в конкретных условиях вычислительных экспериментов.

Для смеси плотностей вероятностей $p_1(x)$ с нормальными законами распределения при $M=5$ и малых значениях СКО $\sigma_v=0,5$; $v=\overline{1,5}$ проявляется многомодальный характер $p_1(x)$ (рис. 3). В этих условиях наблюдается преимущество предлагаемой методики при использовании модели (6) по сравнению с аппроксимацией (7) (см. табл. 2), если коэффициент контрэксцесса превышает пороговое значение $\delta=0,759$. При этом относительная ошибка оценивания не превышает значения 0,115. Если оценка $\bar{\delta} < \delta$, то более обоснованным является применение модели (7) при относительной ошибке аппроксимации (0,08–0,115).

С увеличением СКО $\sigma_v=2$; $v=\overline{1,5}$ составляющих смеси плотностей вероятностей её многомодальный характер менее проявляется (см. рис. 3). Соотношения между оценками $\bar{W}'_2$, определяемыми по моделям (6), (7), сохраняются. Относительная ошибка оценивания W'_2 уменьшается при $\bar{\delta} > \delta$ и увеличивается при $\bar{\delta} < \delta$. При отличающихся значениях $\sigma_v \in [0,5; 2]$, $v=\overline{1,5}$ приведённых условий наблюдается значительное уменьшение относительной ошибки оценивания W'_2 при малых отклонениях $\bar{\delta}$ от δ . С увеличением данного отклонения результаты использования моделей (6), (7) при реализации предлагаемой методики оценивания функционала W'_2 сопоставимы.

Оценим значение W'_2 для логнормального закона распределения при коэффициенте контрэксцесса $\delta=0,044$, который находится вне области опре-

деления моделей (6), (7). В этих условиях при использовании моделей (6), (7) относительная ошибка оценивания W'_2 принадлежит интервалам [0,134; 0,177], [-0,151; 0,016] соответственно.

Заключение. Существует константа функционала W_2 от плотности вероятности $p(x)$ одномерной случайной величины вида (1). Обнаружение этой константы позволяет обойти проблему прямого вычисления W_2 с использованием оценок $p(x)$ ядерного типа. Значения W_2 связаны функциональной зависимостью $\bar{W}_2(\delta)$ с коэффициентом контрэксцесса δ случайной величины x . Подобные зависимости установлены для следующих семейств плотностей вероятностей: логнормальные, распределения Стьюдента, смеси плотностей вероятностей. Средняя относительная ошибка оценивания W_2 с применением моделей $\bar{W}_2(\delta)$ для логнормальных плотностей вероятностей составляет 0,00646, законов распределения Стьюдента (включая нормальное и логистическое распределения) – 0,0022, смесей плотностей вероятностей – 0,0393. Обобщенная модель функциональной зависимости для исследуемых семейств плотностей вероятностей характеризуется средней относительной ошибкой аппроксимации $W_2(\delta)$, равной 0,0275.

На базе данных выводов разработана методика оценивания функционала W'_2 , согласно которой вначале находят коэффициент контрэксцесса и константу W_2 и затем на их основе определяют значение W'_2 . Эффективность предлагаемой методики подтверждена результатами вычислительных экспериментов для плотностей вероятностей, значительно отличающихся от условий синтеза обобщенной модели $\bar{W}_2(\delta)$.

Полученные результаты можно обобщить на более широкое семейство плотностей вероятности и многомерные законы распределения. Применение этих результатов способствует формированию эффективных процедур дискретизации области значений случайных величин.

Список литературы

1. Parzen E., *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
2. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и её применения. 1969. Т. 14. № 1. С. 156–161.
3. Scott D. W., *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2015. 384 p.
4. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597.
5. Duong T., *Journal of Statistical Software*, 2007, vol. 21, no. 7, pp. 1–16.
6. Добровидов А. В., Рудько И. М. Выбор ширины окна ядерной функции в непараметрической оценке производной плотности методом сглаженной кросс-валидации // Автоматика и телемеханика. 2010. № 2. С. 42–58.
7. Botev Z. I., Grotowski J. F., Kroese D. P., *Annals of Statistics*, 2010, vol. 38, no. 5, pp. 2916–2957.
8. Chen S., *Journal of Probability and Statistics*, 2015, vol. 2015, pp. 1–21.
9. O'Brien T. A., Kashinath K., Cavanaugh N. R., Collins W. D., O'Brien J. P., *Computational Statistics & Data Analysis*, 2016, vol. 101, pp. 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2016.02.014>

10. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическое оценивание квадратического функционала многомодальной плотности вероятности // Метрология. 2019. № 3. С. 17–29. <https://doi.org/10.32446/0132-4713.2019-3-17-29>

11. Лапко А. В., Лапко В. А. Зависимость между параметрами гистограммы и ядерной оценки одномодальной плотности вероятности // Измерительная техника. 2019. № 9. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-9-3-8>

12. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 24–27.

13. Лапко А. В., Лапко В. А. Метод дискретизации области значений многомерной случайной величины // Измерительная техника. 2019. № 1. С. 16–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-1-16-20>

14. Лапко А. В., Лапко В. А. Построение доверительных границ для плотности вероятности на основе её регрессионной оценки // Метрология. 2013. № 12. С. 3–9.

15. Лапко А. В., Лапко В. А. Выбор коэффициента размытости ядерных оценок плотности вероятности в условиях больших выборок // Измерительная техника. 2019. № 5. С. 3–6. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-5-3-6>

16. Лапко А. В., Лапко В. А., Им С. Т., Тубольцев В. П., Авдеенко В. А. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин // Автометрия. 2019. Т. 55. № 3. С. 22–30. <https://doi.org/10.15372/AUT20190303>

17. Лапко А. В., Лапко В. А. Методика проверки гипотез о распределениях многомерных спектральных данных с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 2. С. 238–244. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-238-244>

References

1. Parzen E., *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, vol. 33, no. 3, pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
2. Epanechnikov V. A., *Theory of Probability & Its Applications*, 1969, vol. 14, no. 1, pp. 156–161.
3. Scott D. W., *Multivariate Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2015, 384 p.
4. Sheather S. J., *Statistical Science*, 2004, vol. 19, no. 4, pp. 588–597.
5. Duong T., *Journal of Statistical Software*, 2007, vol. 21, no. 7, pp. 1–16.
6. Dobrovidov A. V., Ruds'ko I. M., *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 2, pp. 209–224. <https://doi.org/10.1134/S0005117910020050>
7. Botev Z. I., Grotowski J. F., Kroese D. P., *Annals of Statistics*, 2010, vol. 38, no. 5, pp. 2916–2957.
8. Chen S., *Journal of Probability and Statistics*, 2015, vol. 2015, pp. 1–21.
9. O'Brien T. A., Kashinath K., Cavanaugh N. R., Collins W. D., O'Brien J. P., *Computational Statistics & Data Analysis*, 2016, vol. 101, pp. 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2016.02.014>

10. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 769–775. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01693-z>

11. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 747–753. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01690-2>

12. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 763–767. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0279-x>

13. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 427–433. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1447-9>

14. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01579-0>

15. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 12, pp. 1354–1357. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0381-8>

16. Lapko A. V., Lapko V. A., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 383–389. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01634-w>

17. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T., Tuboltsev V. P., Avdeenok V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 230–236. <https://doi.org/10.3103/S8756699019030038>

18. Lapko A. V., Lapko V. A., *Computer Optics*, 2019, vol. 43, no. 2, pp. 238–244. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-2-238-244>

Дата поступления: 04.12.2019.

Дата принятия: 17.02.2020.

Estimating the integral of the square of the probability density of a one-dimensional random variable

Aleksandr V. Lapko^{1,2}, Vasilii A. Lapko^{1,2}

¹*Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM SB RAS), Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: lapko@icm.krasn.ru*

²*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: lapko@icm.krasn.ru*

When choosing the optimal number of sampling intervals of the range of values of a one-dimensional random variable, it is established that the functional of the square of the probability density is a constant. The values of the constant are independent of the probability density parameters. The functional dependencies of the studied constant on the coefficient of antikurtosis of the distribution law of a random variable are determined. The analysis of the established dependences for families of lognormal probability densities, Student's distribution laws and families of probability densities with Gauss distribution is carried out. Based on the results obtained, a generalized model is formed between the studied constant and the antikurtosis coefficient. The generalized model does not depend on the type of probability density, but is determined by the estimation of the antikurtosis coefficient. On this basis, we develop a method for estimating the integral of the square of the probability density, which involves the following actions. The random variable interval and the antikurtosis coefficient are estimated from the initial sample. At known values of these estimates, the integral of the square of the probability density is calculated. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the results of computational experiments. The conditions of the computational experiment differ significantly from the information used in the synthesis of models of the dependence between the studied constant and the antikurtosis coefficient. The conditions of competence of the method of estimating the probability density square integral from the antikurtosis coefficient are established using the proposed models of the dependence of the studied constant on the conditions of the computational experiment.

Key words: functional of the square of probability density, one-dimensional random variable, antikurtosis coefficient, mixture of probability densities, lognormal distribution, Student's distribution law.

Точность лидарных измерений концентрации молекул гидрофторида в атмосферном пограничном слое

В. Е. Привалов¹, В. Г. Шеманин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия. e-mail: vaevpriv@yandex.ru

²Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, Россия, e-mail: vshemanin@mail.ru

Освещены проблемы загрязнения атмосферы молекулами гидрофторида. Рассмотрено использование лидара комбинационного рассеяния света для дистанционного измерения концентрации молекул различных загрязнителей на уровне десятков и сотен единиц предельно-допустимой концентрации. Оценена погрешность измерений концентрации порядка 10^{14} см⁻³ и более молекул гидрофторида в режиме синхронного счёта фотонов лидаром комбинационного рассеяния света в атмосферном пограничном слое высотой до 1,5 км. Представлены результаты численного решения лидарного уравнения для комбинационного рассеяния света молекулами гидрофторида: возможная измеренная концентрация молекул гидрофторида составляет около $1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ с относительной погрешностью измерения менее 25 % на длине волны 405 нм при высоте зондирования не более 500 м.

Ключевые слова: лидар комбинационного рассеяния света, концентрации молекул, гидрофторид, режим синхронного счёта фотонов, атмосферный пограничный слой.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха молекулами гидрофторида HF представляет большую проблему в связи с его высокой токсичностью и низким уровнем предельно допустимых концентраций (ПДК): 0,02 мг/м³ согласно гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.3492-17 (с изменениями на 31 мая 2018 г.) «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» или порядка $1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ [1, 2]. Разработка новых дистанционных методов измерения искомой концентрации молекул HF в атмосферном пограничном слое на базе лидара комбинационного рассеяния света требует оценки точности решения такой измерительной задачи.

Согласно теоретическому анализу методов лазерного зондирования молекул углеводородов в атмосфере установлено, что лидар комбинационного рассеяния света можно использовать для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне десятков и сотен единиц ПДК. Авторами настоящей статьи предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света газовыми молекулами в атмосфере в направлении назад с учётом конечной ширины линии генерации лазера. Учёт конечной ширины линии генерации реального лазера, полос комбинационного рассеяния света и аппаратной функции лидара позволяет уточнить решение такого лидарного уравнения [3], особенно для случая малых концентраций исследуемых молекул.

Цель настоящей работы – оценить погрешность измерений лидаром комбинационного рассеяния света концентрации порядка единиц ПДК молекул гидрофторида в атмосферном

пограничном слое высотой до 1,5 км в режиме синхронного счёта фотонов, а также выбрать оптимальные параметры лидарного уравнения такого лидара.

Лидар комбинационного рассеяния света. Оптическая схема (рис. 1) лидара комбинационного рассеяния света построена на основе схем, приведённых в работах [1–3]. В качестве зондирующего излучения используется излучение второй гармоники YAG-Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длиной волны 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 650 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 10 мкДж при частоте $f < 1$ МГц следования лазерных импульсов [2]. Излучение лазера 8 направлялось вдоль оси приёмного телескопа. Излучение комбинационного рассеяния молекулами гидрофторида в атмосферном пограничном слое в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 1 диаметром 400 мм и фокусировалось линзовым объективом 2 в волоконный ввод 3 микроспектрометра 9 типа FSD-8 (НВЦО ИОФ РАН, Россия), работающего на линии с персональным компьютером 10. Часть лазерного излучения направлялась стеклянной пластиной 5 через интерференционный светофильтр 6 на фотодиод 7. Напряжение U_0 фотодиода записывалось платой сбора данных компьютера для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчёта времени измерения.

Лидарное уравнение для лидара комбинационного рассеяния света. Лазер лидара будем характеризовать числом фотонов n_0 импульса зондирующего атмосферу

лазерного излучения длительностью τ_0 . Линию генерации лазера полушириной Γ_0 будем считать гауссовой с максимумом на частоте ν_0 . Тогда в режиме счёта фотонов излучения комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами гидрофторида в направлении назад число $n(\nu, z)$ фотонов в фотоприёмнике лидара можно найти из лидарного уравнения [3] как интеграл от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R + \Gamma_R)$ [8]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t_d S_0 N(z) \frac{d\sigma}{d\Omega} \times \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) T(\nu_R, z) \Phi(\nu) A(\nu) \frac{d\nu}{2z^2}, \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотодетектором лидара на частоте ν_R комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования z ; $n_0 = E_0 / (h\nu_0)$ – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения с энергией E_0 импульса лазерного излучения длительностью τ_0 ; h – постоянная Планка; c – скорость света; τ_1 – время одного измерения или длительность синхроимпульса; $G(z)$ – геометрическая функция лидара; t_d – время измерения или накопления сигнала; S_0 – площадь приёмной апертуры телескопа; $N(z)$ – концентрация исследуемых молекул; $d\sigma/d\Omega$ – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами; ν_R , Γ_R – соответственно частота и полуширина линии генерации комбинационного рассеяния света; $T_0(\nu_0, z)$, $T(\nu_R, z)$ – пропускание атмосферы на частотах ν_0 , ν_R соответственно; $\Phi(\nu)$ – функция

распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [8]; $A(\nu)$ – аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара.

Геометрическая функция $0 < G(z) < 1$ лидара полностью определяется параметрами его оптической схемы и количественно характеризует степень виньетирования потока рассеянного назад излучения, поступающего в фотоприёмник из рассеивающего объёма атмосферы с расстояния z [3]. Пропускание атмосферы на частотах ν_0 , ν_R соответственно определяется выражениями [3, 10]:

$$T_0(\nu_0, z) = \exp \left[- \int_0^z \alpha(\nu_0, r) dr \right];$$

$$T(\nu_R, z) = \exp \left[- \int_0^z \alpha(\nu_R, r) dr \right],$$

где $\alpha(\nu_0, r)$, $\alpha(\nu_R, r)$ – коэффициенты ослабления на частотах соответственно лазерного излучения ν_0 и комбинационного рассеяния света ν_R молекулами гидрофторида.

Тогда уравнение (1) можно представить в виде

$$n(\nu, z) = \frac{c \tau_0}{2z^2} n_0 S_0 G(z) N(z) f t_d \frac{d\sigma}{d\Omega} \times \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} \Phi(\nu') \exp \left[- \int_0^z \{ \alpha(\nu_0, z) + \alpha(\nu_R, z) \} dr \right] A(\nu') d\nu', \quad (2)$$

где функцию распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [3] при гауссовой форме этой линии можно записать как

$$\Phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Gamma_0} \exp \left[- \frac{(\nu - \nu_0)^2}{2\Gamma_0^2} \right]. \quad (3)$$

Кроме того, будем считать, что аппаратная функция или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара $A(\nu)$ также имеет гауссову форму и настроена точно на частоту ν_R полосы комбинационного рассеяния света молекулами гидрофторида с полушириной Γ_a большей полуширин Γ_R , Γ_0 :

$$A(\nu) = \frac{K_1 \xi(\nu)}{\sqrt{2\pi}\Gamma_a} \exp \left[- \frac{(\nu - \nu_R)^2}{2\Gamma_a^2} \right], \quad (4)$$

где K_1 – экспериментально измеренная лидарная константа на частоте ν_0 лазерного излучения [3]; $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника на частоте ν_R излучения комбинационного рассеяния света.

Тогда при условии, что $\Phi(\nu) = 1$, когда полуширина линии генерации много меньше, чем полуширина аппаратной функции лидара, уравнение (2) запишем как

$$n(\nu, z) = BN(z) tI(\nu, z) / z^2, \quad (5)$$

где

$$B = c \tau_0 S_0 f / 2; \quad (6)$$

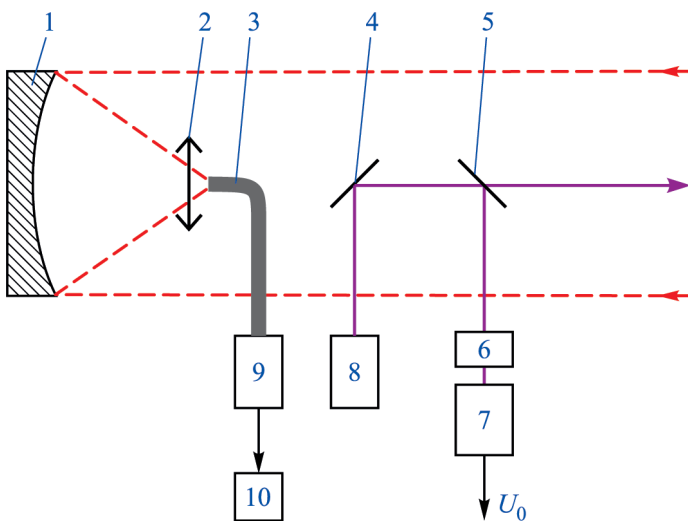


Рис. 1. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света: 1 – сферическое зеркало приёмного телескопа; 2 – линзовый объектив; 3 – волоконный ввод; 4 – глухое зеркало; 5 – стеклянная пластина; 6 – интерференционный светофильтр; 7 – фотоприёмник; 8 – лазер; 9 – микроспектрометр; 10 – персональный компьютер

Fig. 1. The Raman lidar optical layout:

1 – a spherical mirror of the receiving telescope; 2 – a lens objective; 3 – fiber input; 4 – a blind mirror; 5 – glass plate; 6 – interference filter; 7 – photo detector; 8 – laser; 9 – micro spectrometer; 10 – personal computer

$$I(\nu, z) = G(z)n_0 \times \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_a} \frac{d\sigma}{d\Omega} \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\nu_0, z) + \alpha(\nu_R, z)] dr \right\} A(\nu') d\nu'. \quad (7)$$

Предположение о том, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, вполне допустимо для промышленных лазеров и спектрометров [3]. Сделаем некоторые преобразования – вынесем дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света (имеющее физический смысл молекулярной константы) и экспоненту из-под знака интеграла – и получим

$$I(\nu, z) = G(z)n_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\nu_0, z) + \alpha(\nu_R, z)] dr \right\} \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_a} A(\nu') d\nu'. \quad (8)$$

Последний интеграл в (8) может быть преобразован в интеграл ошибок:

$$\int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_a} A(\nu') d\nu' = \frac{K_1 \xi(\nu)}{\sqrt{2\pi} \Gamma_a} \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_a} \exp \left[- \frac{(\nu - \nu_R)^2}{2\Gamma_a^2} \right] d\nu = \text{erf} K_1 \xi(\nu) \cdot 2^{-1/2} = K_1 \xi(\nu) \cdot 0,68269 \cdot 2^{-1} = 0,34 K_1 \xi(\nu). \quad (9)$$

С учётом соотношения (9) перепишем выражение (8):

$$I(\nu, z) = G(z)n_0 \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 0,34 K_1 \xi(\nu) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\nu_0, z) + \alpha(\nu_R, z)] dr \right\}. \quad (10)$$

Теперь с учётом выражений (6), (10) выразим из уравнения (5) концентрацию молекул HF

$$N(z) = n(\nu, z) z^2 / [BtI(\nu, z)]. \quad (11)$$

Рассмотрим однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [3]. Максимум полосы валентных колебаний молекулы HF составляет 3959 см^{-1} [1, 2]. Дифференциальное сечение колебательного комбинационного рассеяния света молекулы HF для выбранных длин волн лазерного излучения 405, 532 и 650 нм $d\sigma/d\Omega = 2,98 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$ оценено по данным авторов настоящей статьи, а значения $d\sigma/d\Omega$, рассчитанные с учётом зависимости $1/\lambda^4$ для интересующих длин волн, указаны в таблице. Остальные параметры лидарного уравнения – значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(\nu_0, z)$ и $\alpha(\nu_R, z)$ также приведены в таблице. Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидара $0,12 \text{ м}^2$, шаг по расстоянию $7,5 \text{ м}$ для времени одного измерения 50 нс , в течение которого можно зарегистрировать 200 фотонов.

Численное решение лидарного уравнения. На первом этапе численно решим уравнение (11) при $G(z)=1$, времени измерения $t_d=100 \text{ с}$ и расстоянии зондирования в диапазоне

Параметры лидарного уравнения

λ , нм	ν , ГГц	$d\sigma/d\Omega \cdot 10^{30}$, см^2	$\alpha(\nu_0, z)$, км^{-1}	$\alpha(\nu_R, z)$, км^{-1}	$\xi(\nu)$
650,0	461,54	0,60	0,14	–	–
875,2	342,78	–	–	0,12	0,2
532,0	563,91	1,34	0,16	–	–
673,9	445,17	–	–	0,14	0,5
405,0	740,74	4,00	0,24	–	–
482,3	622,02	–	–	0,18	0,8

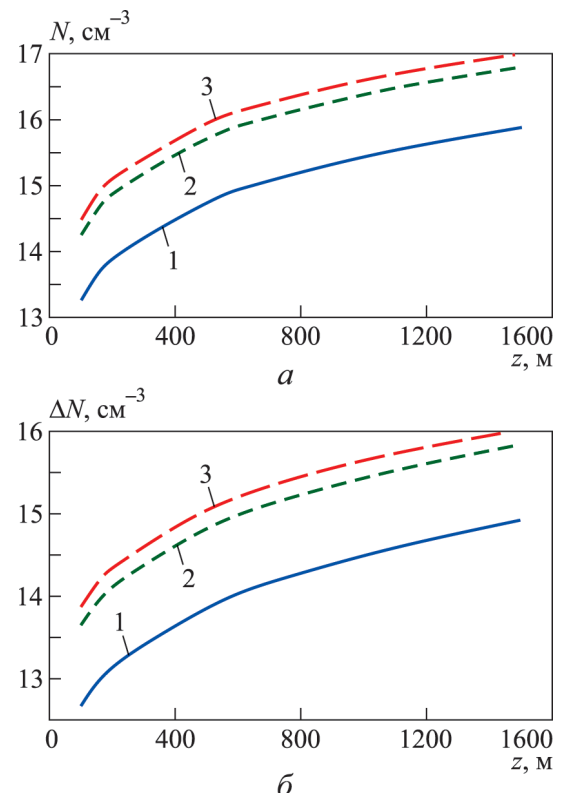


Рис. 2. Рассчитанные по уравнениям (11), (12) зависимости соответственно концентрации (а) и абсолютной погрешности концентрации (б) молекул гидрофторида от расстояния зондирования z в атмосферном пограничном слое лидаром комбинационного рассеяния света на длинах волн лазерного излучения 405 (1), 532 (2) и 655 нм (3)

Fig. 2. The plots of the dependences calculated from equations (11), (12), respectively, of the concentration (a) and the absolute error of the concentration (b) of hydrofluoride molecules on the ranging distance z in the atmospheric boundary layer by the Raman lidar at the laser radiation wavelengths of 405 (1), 532 (2) and 655 nm (3)

100–1500 м для длин волн лазерного излучения 405, 532 и 650 нм. Результаты решения уравнения (11) для этого случая представлены на рис. 2, а. Наблюдается увеличение концентрации исследуемых молекул гидрофторида с увеличением

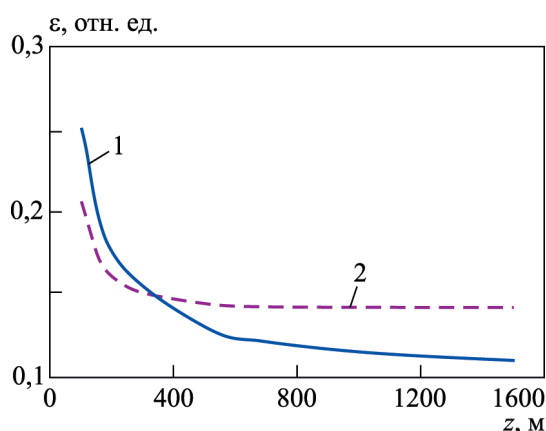


Рис. 3. Зависимости относительной погрешности концентрации молекул гидрофторида от расстояния зондирования в атмосферном пограничном слое лидаром комбинационного рассеяния света: 1 – расчёт по уравнениям (11)–(12); 2 – расчёт по уравнению (13)

Fig. 3. The plots of the hydrofluoride molecules concentration relative error dependence on the ranging distance in the atmospheric boundary layer by the Raman lidar: 1 – calculation by equations (11), (12); 2 – calculation by equation (13)

длины волны лазерного излучения вследствие сильной спектральной зависимости величин из уравнения (11). При этом на протяжении первых 500 м концентрация резко (примерно на 1,5 порядка) повышается. При частоте следования лазерных импульсов 1 МГц и времени одного измерения 50 нс или шага по высоте $\Delta H = 7,5$ м минимум концентрации молекул гидрофторида, равный $1,88 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, достигается на длине волны 405 нм и расстоянии зондирования 100 м. Для расстояний зондирования 500, 1000 и 1500 м этот минимум составит соответственно $5,56 \cdot 10^{14}$, $2,74 \cdot 10^{15}$ и $7,64 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее уменьшение концентрации исследуемых молекул возможно за счёт увеличения времени измерения t_d и частоты f следования лазерных импульсов или увеличения их энергии E_0 [3].

Вычисление погрешностей лидарных измерений. Для расчёта абсолютной погрешности $\Delta N(z)$ измерения концентрации $N(z)$ исследуемых молекул найдём дифференциал выражения (11), затем заменим дифференциалы на конечные приращения и получим выражение

$$\Delta N(z) = \frac{1}{Bt^2 I^2(v, z)} \{ [\Delta n(v, z) z^2 + 2n(v, z) z \Delta z] t + [\Delta t I(v, z) + t \Delta I(v, z)] n(v, z) z^2 \}. \quad (12)$$

В исследуемом диапазоне частот функция $I(v, z)$ слабо зависит от частоты v . Результаты решения уравнения (12) для этого случая на трёх длинах волн лазерного излучения в заданном диапазоне расстояний зондирования 100–1500 м представлены на рис. 2, б. Абсолютная погрешность измерения концентрации молекул гидрофторида в атмосфере увеличивается с увеличением как длины волны

лазерного излучения от 405 до 650 нм, так и расстояния зондирования.

При оценке погрешности лидарных измерений учтено, что с использованием самого быстроредействующего фотоприёмника число фотонов в импульсе лазерного излучения, зарегистрированных методом синхронного счёта, не превысит 200 и для идеального лазера, излучение которого описывается статистикой Пуассона, дисперсия числа регистрируемых фотонов $\Delta n(v, z) = 200^{1/2} = 14,14$.

Относительная погрешность $\varepsilon = \Delta N(z)/N(z)$ измерений концентрации для тех же параметров задачи вычислена с учётом зависимостей на рис. 2. С учётом постоянства функции $I(v, z)$ для заданной длины волны или частоты лазерного излучения из уравнения (12) получим окончательное теоретическое выражение для относительной погрешности измерения концентрации молекул гидрофторида в атмосфере:

$$\varepsilon = \sqrt{\left[\frac{\Delta n(v, z)}{n(v, z)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta z}{z} \right]^2 + \left[\frac{\Delta t}{t} \right]^2}. \quad (13)$$

На рис. 3 представлены экспериментальная зависимость относительной погрешности измерений концентрации для указанных выше параметров лидарного уравнения и условий измерений, а также теоретическая зависимость, рассчитанная по уравнению (13). Различие экспериментальных и теоретических значений относительной погрешности при расстоянии зондирования в диапазоне 400–1500 м можно объяснить существенным влиянием пропускания слоя атмосферы большой толщины на заданной частоте или длине волны лазерного излучения, а также излучения комбинационного рассеяния света, поскольку было принято $I(v, z) = \text{const}$.

Заключение. При уменьшении заданной относительной погрешности измерения расстояния зондирования (ranging distance) в диапазоне 7,5...0,5 % относительная погрешность измерения концентрации уменьшается с 25 до 11 % для лазерного излучения с длиной волны 405 нм. Решающую роль в уменьшении лидарного сигнала играет пропускание слоя атмосферы, которое на расстоянии зондирования 1500 м уменьшается на 44 % по сравнению с расстоянием 100 м, и на столько же уменьшается значение функции $I(v, z)$. Учёт ширины аппаратной функции лидара комбинационного рассеяния света приводит к уменьшению значения функции $I(v, z)$ почти в три раза для всего диапазона расстояний зондирования в соответствии с результатами [3].

Таким образом, при зондировании молекул гидрофторида в атмосферном пограничном слое лидаром комбинационного рассеяния света для измерения заданной концентрации молекул порядка единиц ПДК ($1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) с относительной погрешностью измерения концентрации менее 25 % параметры лазерного излучения и лидара должны быть следующими: длина волны 405 нм; расстояние зондирования не более 500 м. Вопросы, рассмотренные авторами, представляют интерес в смежных областях (например, [4–10]).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 19-42-230004, 19-45-230009).

Список литературы

References

1. Privalov V. E., Voronina E. I., Shemanin V. G., *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 43–51. <https://doi.org/10.3103/S1060992X08010074>
2. Voronina E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G., *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 69–76. <https://doi.org/10.3103/S1060992X10010108>
3. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Оценка погрешности лидарных измерений концентрации сероводорода в атмосфере // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 30–33. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-4-30-33>
4. Savchenko E. A., Velichko E. N., Aksenov E. T., Nepomnyashchaya E. K., *Proceeding International Conferences Laser Optics ICLO*, August 2018, p. 539. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435384>
5. Nepomnyashchaya E. K., Velichko E. N., Pleshakov I. V., Aksenov E. T., Savchenko E. A., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 8410, p. 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/841/1/012020>
6. Putintseva M. V., Aksenov E. T., Korikov C. C., Velichko E. N., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1124, p. 031021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1124/3/0310217>
7. Ivanov S. I., Lavrov A. P., Molodyakov S. A., Saenko I. I., *Proc. SPIE*, vol. 20165381, pp. 253–257. <https://doi.org/10.1117/12.547757>
8. Volkov V. A., Gordeev D. A., Ivanov S. I., Lavrov A. P., Saenko I. I., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 737 (1), p. 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012002>
9. Arkhipov V. A., Akhmadeev I. R., Bondarchuk S. S., Vorozhtzov B. I., Pavlenko A. A., Potapov M. G., *Atmosphere and Ocean Optics*, 2007, vol. 20, pp. 48–52.
10. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика, Томск: Научно-техническая литература, 2010. С. 191.

1. Privalov V. E., Voronina E. I., Shemanin V. G., *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 43–51. <https://doi.org/10.3103/S1060992X08010074>
2. Voronina E. I., Privalov V. E., Shemanin V. G., *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 69–76. <https://doi.org/10.3103/S1060992X10010108>
3. Privalov V. E., Shemanin V. G., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 360–364. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1434-1>
4. Savchenko E. A., Velichko E. N., Aksenov E. T., Nepomnyashchaya E. K., *Proceeding International Conferences Laser Optics ICLO*, August 2018, p. 539. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435384>
5. Nepomnyashchaya E. K., Velichko E. N., Pleshakov I. V., Aksenov E. T., Savchenko E. A., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 8410, p. 012020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/841/1/012020>
6. Putintseva M. V., Aksenov E. T., Korikov C. C., Velichko E. N., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 1124, p. 031021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1124/3/0310217>
7. Ivanov S. I., Lavrov A. P., Molodyakov S. A., Saenko I. I., *Proc. SPIE*, vol. 20165381, pp. 253–257. <https://doi.org/10.1117/12.547757>
8. Volkov V. A., Gordeev D. A., Ivanov S. I., Lavrov A. P., Saenko I. I., *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, vol. 737 (1), p. 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012002>
9. Arkhipov V. A., Akhmadeev I. R., Bondarchuk S. S., Vorozhtzov B. I., Pavlenko A. A., Potapov M. G., *Atmosphere and Ocean Optics*, 2007, vol. 20, pp. 48–52.
10. Donchenko V. A., Kabanov M. V., Kaul B. V., Samohvalov I. V., *Atmosfernaya elektrooptika*, Tomsk: Nauchno-tehnicheskaya literature Publ., 2010, 191 p. (in Russian).

Дата поступления: 16.10.2019.

Дата принятия: 23.12.2019.

Lidar measurements accuracy of the hydrofluoride molecules concentration in the atmospheric boundary layer

Vadim E. Privalov¹, Valery G. Shemanin²

¹Peter the Great Saint-Petersburg Politechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: vaevpriv@yandex.ru

²Kuban State Technological University, Novorossiysk, Russian Federation, e-mail: vshemanin@mail.ru

The Raman lidar measurements accuracy of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer has been estimated in the work at the concentration level of 10^{14} cm^{-3} and higher in the height range up to 1,5 km in the synchronous photon counting mode. It is received that it can measure the studied molecules concentration at the level of $1,5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ with the concentration measurement relative error lesser than 25 % at the 405 nm wavelength and the ranging distance up to 500 m by such a lidar.

Key words: Raman lidar, concentration, hydrofluoride molecules, synchronous photon counting mode, atmospheric boundary layer.

Методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства

И. А. Архаров¹, И. Д. Какорин²

¹Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация, e-mail: arkharov@bmstu.ru

²Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация, e-mail: kakorin@jinr.ru

Предложена методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства. Предложенная методика учитывает уравнения состояния двухфазной среды, т. е. изменения плотности, массового паросодержания и температуры двухфазных потоков криоагентов в зависимости от давления в сужающем устройстве. Показано, что без учёта эволюции параметров потока возникает дополнительная погрешность определения расхода и, следовательно, невозможно корректно определить чувствительность и диапазон измерений расходомера. Выбран наиболее оптимальный диапазон измерений перепада давлений, а также предложен способ измерения расхода двухфазного потока по перепаду температуры на сужающем устройстве. Проблема определения расхода двухфазных криогенных потоков актуальна для ускорительной, аэрокосмической и газотранспортной техники.

Ключевые слова: двухфазные криогенные потоки, бессепарационный расходомер, сужающее устройство, гелий.

Введение. Во многих отраслях современной техники возникает необходимость измерения расхода в двухфазных криогенных потоках. Например, для поддержания функциональных параметров в сверхпроводящих ускорителях элементарных частиц и ионов высоких энергий, таких как NICA [1], FAIR/SIS100/300 [2, 3], LHC [4], Tevatron [5], «Нуклотрон» [6], TTF [7], необходимо охлаждать и термостатировать до температур менее 4,5 К все сверхпроводящие элементы: магниты, резонаторы и шины питания. Для этого применяют системы с принудительной циркуляцией гелия. При этом важной задачей является обеспечение необходимых значений параметров двухфазного криогенного потока, среди которых паросодержание, расход, температура и давление. Непрерывный контроль и поддержание данных параметров в заданных диапазонах значений позволяют, во-первых, гибко регулировать условия охлаждения сверхпроводящих элементов и, во-вторых, рационально использовать жидкий гелий. Гибкая регулировка условий термостатирования сверхпроводящих элементов позволяет минимизировать количество аварийных ситуаций, связанных с переходом сверхпроводящих устройств в нормальное состояние (квенч), сопровождающихся большими потерями гелия. Рациональное использование жидкого гелия, учитывая крупные масштабы потребления на ускорительных комплексах (нередко более 10000 л/ч), напрямую связано с оптимизацией экономических затрат всего комплекса.

Контроль параметров двухфазных потоков криоагентов также важен и для других типов установок, в которых при достижении критических значений возможно возникновение серьезных аварийных ситуаций, например, в системах охлаждения атомных реакторов.

В аэрокосмической отрасли двухфазные расходомеры (ДР) используют для получения детальной информации о процессе заполнения баков летательных аппаратов криогенным топливом и окислителем. Еще более сложная проблема возникает при необходимости перекачки криогенных жидкостей между резервуарами в условиях пониженной гравитации. В этом случае указатель уровня заполнения бака не работает и количество криогенной жидкости определяется через показания расходомера, параметры которого должны обеспечивать требуемую точность.

В газовой промышленности сжиженный природный газ, являющийся криогенной жидкостью, транспортируют в специальных танкерах или цистернах морского, железнодорожного или автомобильного базирования. При перевалочных операциях (процессы заполнения и/или опорожнения сосудов сжиженного природного газа) необходимо контролировать параметры двухфазных потоков и соответственно определять количество фактически загруженного сжиженного природного газа и испарившегося природного газа.

Одним из основных требований, предъявляемых к двухфазным криогенным расходомерам, является возможность

измерять паросодержание и расход криоагента без разделения жидкой и газообразной фаз. Измерение расхода в однофазной или гомогенной области потока криоагента, например, на входе в сверхпроводящий магнит как объект охлаждения, не даёт полной информации о структуре охлаждающего потока, так как при теплообмене на объекте возможно образование паровой фазы и нарушение режима его охлаждения. Большинство аварийных ситуаций при охлаждении сверхпроводящих обмоток связано именно с нарушением режима охлаждения. Таким образом, измерение соотношения жидкой и газообразной фаз в разных областях потока является критичным для систем охлаждения сверхпроводящих магнитов. В научной литературе и в рекламных материалах производителей представлены ДР, работа которых основана на разных физических принципах [8–13]. В работе [14] предложен метод измерения расхода двухфазного гелия, основанный на эффекте перепада давления на сужающем устройстве (СУ) при протекании по нему потока. Авторы [15, 16] применяют высокочастотный датчик для определения объёмного паросодержания потока и на основе этой информации, а также используя эмпирически полученные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент скольжения фаз, находят расход двухфазного криоагента. Заметим, что в работе [14] не принимается во внимание уравнение состояния двухфазной среды, а предполагается, что плотности жидкости и газа, массовое паросодержание, а также температура постоянны во всём потоке в зоне измерения. Данное предположение не корректно, так как давление в широкой части СУ выше, чем в узкой. Этот эффект аналогичен эффекту убывания давления вдоль линии тока при возрастании скорости течения жидкости (закон Бернулли): перепад давления увеличивается при увеличении скорости потока, поэтому зависящие от давления плотность, массовое паросодержание и температура изменяются вдоль всего потока. В данной работе авторы предлагают учесть изменение свойств потока, используя уравнение состояния двухфазной среды.

Метод расчёта калибровочной зависимости. На рис. 1 схематически показаны СУ и величины, которые далее фигурируют в расчёте калибровочной зависимости ДР. Запишем закон сохранения энергии отдельно для каждой фазы в широкой и узкой частях устройства:

$$\begin{aligned} P_1(dV_{г1} + dV_{ж1}) - P_2(dV_{г2} + dV_{ж2}) = \\ = dm_{г2}u_{г2}^2/2 - dm_{г1}u_{г1}^2/2 + dm_{ж2}u_{ж2}^2/2 - dm_{ж1}u_{ж1}^2/2 + \\ + dm_{г2}U_{г2} + dm_{ж2}U_{ж2} - dm_{г1}U_{г1} - dm_{ж1}U_{ж1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где P – давление; dV – элементарный объём фазы; dm – массовый расход; U – удельная внутренняя энергия; u – скорость фазы; PdV – работа, совершаемая над элементарным объёмом; индексы «г» и «ж» относятся к газу и жидкости, а индексы «1», «2» к широкой и узкой частям СУ соответственно.

Из закона сохранения массы следует, что расход G двухфазного потока равен сумме расходов фаз:

$$Gdt = dm_{г1} + dm_{ж1} = dm_{г2} + dm_{ж2}.$$

Массовый расход паровой фазы выразим через плотность ρ_r , скорость u_r , объёмное паросодержание φ и массовое паросодержание x :

$$G_r = Gx = \rho_r u_r \varphi A, \quad (2)$$

где A – поперечное сечение широкой или узкой части СУ.

Аналогичное выражение запишем и для массового расхода жидкой фазы:

$$G_{ж} = G(1-x) = \rho_{ж} u_{ж} (1-\varphi) A. \quad (3)$$

Удельная внутренняя энергия двухфазной среды связана с удельной внутренней энергией газообразной U_r и жидкой $U_{ж}$ фаз и массовым паросодержанием следующей зависимостью:

$$U = xU_r + (1-x)U_{ж}. \quad (4)$$

Найдём с помощью (2), (3) расходы фаз в сечениях СУ:

$$\left. \begin{aligned} Gdt x_i &= dm_{гi}, \quad Gdt(1-x_i) = dm_{жи}, \\ Gx_i &= \rho_{гi} u_{гi} \varphi_i A_i, \quad G(1-x_i) = \rho_{жи} u_{жи} (1-\varphi_i) A_i, \\ u_{гi} &= Gx_i / (\rho_{гi} \varphi_i A_i), \\ u_{жи} &= G(1-x_i) / (\rho_{жи} (1-\varphi_i) A_i), \quad i=1, 2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В соотношениях (5) A_1, A_2 обозначают поперечные сечения широкой и узкой частей СУ соответственно. Подставив соотношения (5) в (1) с учётом $dV = dm/\rho$, найдём

$$\begin{aligned} P_1(Gx_1 dt / \rho_{г1} + G(1-x_1) dt / \rho_{ж1}) - \\ - P_2(Gx_2 dt / \rho_{г2} + G(1-x_2) dt / \rho_{ж2}) = \\ = \{ Gx_2 dt [Gx_2 / (\rho_{г2} \varphi_2 A_2)]^2 + G(1-x_2) \times \\ \times dt [G(1-x_2) / (\rho_{ж2} (1-\varphi_2) A_2)]^2 - Gx_1 dt [Gx_1 / (\rho_{г1} \varphi_1 A_1)]^2 - \\ - G(1-x_1) dt [G(1-x_1) / (\rho_{ж1} (1-\varphi_1) A_1)]^2 \} / 2 + \\ + dm_{г2} U_{г2} + dm_{ж2} U_{ж2} - dm_{г1} U_{г1} - dm_{ж1} U_{ж1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения плотности двухфазного потока используем закон аддитивности: объёмный расход многофазного потока равен сумме объёмных расходов каждой фазы. В рассматриваемом случае закон аддитивности с учётом массового паросодержания x , можно записать как

$$1/\rho = x/\rho_r + (1-x)/\rho_{ж}. \quad (7)$$

Используем (2), (3) и найдём выражение для коэффициента скольжения фаз:

$$s = u_r / u_{ж} = x(1-\varphi) \rho_{ж} / [(1-x) \varphi \rho_r]. \quad (8)$$

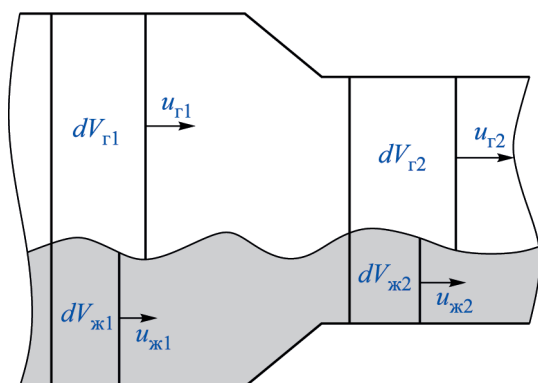


Рис. 1. Схема сужающего устройства

Fig. 1. Schematic view of the venturi

Подставив соотношения (7), (8) в (6), получим, что при течении двухфазного потока через СУ величина J является постоянной:

$$J = P/\rho + U + G^2 \frac{x^3(\rho_g \varphi)^{-2} + (1-x)^3[\rho_{ж}(1-\varphi)]^{-2}}{2A^2} =$$

$$= P/\rho + U + G^2 \frac{[\rho_g \varphi s^3 + \rho_{ж}(1-\varphi)][\rho_g \varphi s + \rho_{ж}(1-\varphi)]^{-3}}{2A^2}.$$

Если ввести удельную энтальпию двухфазного потока $I = P/\rho + U$, то выражение для J примет следующий вид:

$$J = I + G^2 \frac{x^3(\rho_g \varphi)^{-2} + (1-x)^3[\rho_{ж}(1-\varphi)]^{-2}}{2A^2} =$$

$$= I + G^2 \frac{[\rho_g \varphi s^3 + \rho_{ж}(1-\varphi)][\rho_g \varphi s + \rho_{ж}(1-\varphi)]^{-3}}{2A^2}.$$

Используем (4), (7) и найдём удельную энтальпию

$$I = (P/\rho_g + U_g)x + (P/\rho_{ж} + U_{ж})(1-x) = I_g x + I_{ж}(1-x),$$

где $I_{г/ж} = P/\rho_{г/ж} + U_{г/ж}$ – удельная энтальпия газа/жидкости.

Значения плотностей ρ_g , $\rho_{ж}$ на линии насыщения могут быть найдены либо интерполяцией табличных экспериментальных данных [17], либо с помощью специальных расчётных программ или пакетов программного обеспечения. Так программа REFPROP10 [18], разрабатываемая национальным институтом стандартов и технологий США (NIST), использует наиболее точные модели (для 147 однофазных сред и 121 предопределённой смеси) из доступных в настоящее время. Например, для гелия используется многопараметрическое уравнение состояния Шмидта–Вагнера [19, 20], записанное в терминах энергии Гельмгольца. Данное уравнение состояния содержит сумму двух членов: энергии Гельмгольца для идеального газа и остаточной энергии Гельмгольца. Последняя учитывает влияние межмолекулярных сил и записывается в форме Якобсена–Стюарта–Джахангири–Пенончелло [21, 22], содержащего

дополнительные слагаемые в форме гауссовых функций, зависящие как от температуры, так и от плотности. Данные слагаемые имитируют переход от классического к неклассическому поведению вблизи критической точки и быстро затухают при удалении от неё. Коэффициенты уравнения состояния найдены путём подгонки к надёжным экспериментальным и теоретическим данным по гелию¹, полученные с учётом стандартных термодинамических ограничений², а также впервые использованные ограничения, накладываемые на параметры Грюнайзена и идентификации фазы (жидкость или пар). Остальные термодинамические параметры гелия можно найти с помощью соотношений Максвелла как производные по энергии Гельмгольца [19]. Кроме того, REFPROP10 поддерживает интерфейс прикладного программирования (API), что позволяет легко организовать работу с ней из разнообразных языков программирования. Исходя из соображений удобства работы, авторы выбрали именно эту программу. Для определения коэффициента скольжения фаз s в общем случае необходимо иметь экспериментальную карту течений двухфазных потоков, полученную на стенде [23], однако в некоторых случаях можно воспользоваться и более простыми эмпирическими соотношениями, полученными на основе обработки экспериментальных данных. Объёмное паросодержание φ можно найти различными методами [8–13]; так в работе [15] авторы предложили новую конструкцию высокочастотного датчика с меандровой обмоткой на основе металло-керамики, которая позволяет неинтрузивным образом измерять паросодержание. Таким образом, в выражении для постоянной СУ неопределёнными остаются расход G и энтальпия I . Очевидно, что необходимо ещё одно уравнение, которое позволит связать параметры потока в широкой и узкой части СУ. Чтобы найти это недостающее уравнение, примем, что течение двухфазного потока через область сужения адиабатное и потери на трение отсутствуют. В этом случае удельная энтропия S является ещё одной приближенно сохраняющейся величиной и система уравнений для определения расхода становится замкнутой:

$$S_1 = S_2, J_1 = J_2, J_i = I_i + G^2 \times$$

$$\times \frac{x_i^3(\rho_{gi} \varphi_i)^{-2} + (1-x_i)^3[\rho_{жи}(1-\varphi_i)]^{-2}}{2A_i^2} = I_i + G^2 \times$$

$$\times \frac{[\rho_{gi} \varphi_i s_i^3 + \rho_{жи}(1-\varphi_i)][\rho_{gi} \varphi_i s_i + \rho_{жи}(1-\varphi_i)]^{-3}}{2A_i^2}.$$

¹ Среди которых данные по измерению давления, плотности и температуры, изохорная теплоёмкость, скорость звука, характеристики на линии насыщения гелия, результаты квантово-механических вычислений и др.

² Например, в критической точке должны выполняться следующие условия: $\partial p / \partial \rho = \partial^2 p / \partial \rho^2 = 0$, давление и энергия Гиббса не должны изменяться при переходе из одной фазы в другую, если температура при этом остается постоянной.

Расход определяется как

$$G = \sqrt{2(I_1 - I_2)} \times \left\{ \left[x_2^3 (\rho_{r2} \varphi_2)^{-2} + (1 - x_2)^3 (\rho_{ж2} (1 - \varphi_2))^{-2} \right] A_2^{-2} - \left[x_1^3 (\rho_{r1} \varphi_1)^{-2} + (1 - x_1)^3 (\rho_{ж1} (1 - \varphi_1))^{-2} \right] A_1^{-2} \right\}^{-1/2}, \quad (9)$$

или, если выразить x через s согласно формуле (8),

$$G = \sqrt{2(I_1 - I_2)} \left\{ \left[\rho_{r2} \varphi_2 s_2^3 + \rho_{ж2} (1 - \varphi_2) \right]^{-3} A_2^{-2} - \left[\rho_{r1} \varphi_1 s_1^3 + \rho_{ж1} (1 - \varphi_1) \right]^{-3} A_1^{-2} \right\}^{-1/2}. \quad (10)$$

В [14] получены соотношения для определения расхода:

$$\left. \begin{aligned} G &= k(\varphi, T) \xi \sqrt{\Delta P \rho}, \\ k(\varphi, T) &= \sqrt{2} \left\{ x^3 \rho_r^{-2} [(\varphi_2 A_2)^{-2} - (\varphi_1 A_1)^{-2}] + \right. \\ &\quad \left. + (1 - x)^3 \rho_{ж}^{-2} [(1 - \varphi_2) A_2]^{-2} - [(1 - \varphi_1) A_1]^{-2} \right\}^{-1/2} / (\xi \rho), \\ \xi &= \sqrt{2} A_1 A_2 (A_1^2 - A_2^2)^{-1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

при предположениях

$$\rho_{r1} = \rho_{r2} = \rho_r, \quad \rho_{ж1} = \rho_{ж2} = \rho_{ж}, \quad x_1 = x_2 = x, \quad T_1 = T_2 = T, \quad (12)$$

где T – температура потока; ξ – постоянный параметр, зависящий от геометрических размеров СУ; $k(\varphi, T)$ – поправочный коэффициент, который должен учитывать структуру потока (авторы предлагают находить его на специальном калибровочном стенде).

Однако такая факторизация массового расхода в общем случае не имеет места. Действительно, внутренняя энергия в самом общем случае зависит от температуры и объема. Таким образом, удельная внутренняя энергия является функцией температуры и удельного объема $1/\rho$: $U = U(T, 1/\rho)$. Используя это обозначение и выражение для энтальпии формулу (9) можно переписать как

$$G = \left\{ 2 \left\{ \left[(P/\rho)_1 - (P/\rho)_2 \right] + \left[U(T_1, 1/\rho_1) - U(T_2, 1/\rho_2) \right] \right\} \right\}^{1/2} \times \left\{ A_2^{-2} \left(x_2^3 (\rho_{r2} \varphi_2)^{-2} + (1 - x_2)^3 [\rho_{ж2} (1 - \varphi_2)]^{-2} \right) - A_1^{-2} \left(x_1^3 (\rho_{r1} \varphi_1)^{-2} + (1 - x_1)^3 [\rho_{ж1} (1 - \varphi_1)]^{-2} \right) \right\}^{-1/2}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для факторизации перепада давления $\Delta P = P_1 - P_2$ необходимо выполнение условий (12), поскольку при их выполнении и учёте (7) $\rho_1 = \rho_2$, следовательно $U(T_1, 1/\rho_1) = U(T_2, 1/\rho_2)$. В этом случае формула (13) примет вид:

$$G = \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho} \left\{ \left(x^3 (\rho_r \varphi_2)^{-2} + (1 - x)^3 [\rho_{ж} (1 - \varphi_2)]^{-2} \right) \times A_2^{-2} - \left(x^3 (\rho_r \varphi_1)^{-2} + (1 - x)^3 [\rho_{ж} (1 - \varphi_1)]^{-2} \right) A_1^{-2} \right\}^{-1/2} = \sqrt{\Delta P \rho} \sqrt{2} \left\{ x^3 \rho_r^{-2} [(\varphi_2 A_2)^{-2} - (\varphi_1 A_1)^{-2}] + (1 - x)^3 \rho_{ж}^{-2} [(1 - \varphi_2) A_2]^{-2} - [(1 - \varphi_1) A_1]^{-2} \right\}^{-1/2} / \rho. \quad (14)$$

Выражения (11) и (14) для расхода совпадают. Таким образом, использование поправочного коэффициента $k(\varphi, T)$ оправдано лишь при небольших массовых расходах, когда перепадом давления на СУ можно пренебречь, а условия (12) можно считать выполняющимися приближенно.

Для определения расхода G при заданных температуре потока T_1 и перепаде давления на СУ ΔP используем итерационный алгоритм, так как расход входит как в левую, так и в правую (через зависимость коэффициента скольжения от скорости потока) части уравнения (10). В качестве начального приближения положим, что поток однородный в обеих частях СУ и коэффициенты скольжения $s_1 = s_2 = 1$. Далее, измерив значение паросодержания в потоке φ_1 с помощью какого-либо датчика паросодержания, например вышеупомянутого высокочастотного датчика [15], с помощью программы REFPROP10 найдём плотности ρ_{r1} , $\rho_{ж1}$, удельные энтальпии I_1 и энтропию S_1 , а также давление P_1 на линии насыщения при заданной температуре T_1 . Зная коэффициент скольжения s_1 , с помощью соотношения (8) вычислим массовое паросодержание потока x_1 . Далее определим давление $P_2 = P_1 - \Delta P$ и удельную энтропию $S_2 = S_1$ в узкой части СУ. Используем найденные значения P_2 , S_2 и вычислим ρ_{r2} , $\rho_{ж2}$, I_2 , x_2 с помощью REFPROP10. Предполагая, что коэффициент скольжения s_2 известен, с помощью соотношения (8) определим объёмное паросодержание φ_2 . Теперь, зная все величины, которые входят в правую часть уравнения (9), найдём массовый расход в следующем приближении. Если заданная точность достигнута (например, разница между предыдущим и текущим значениями G меньше заданного порога), то останавливаем выполнение алгоритма и текущее значение расхода будет искомым, в противном случае выполняем следующую итерацию алгоритма. Здесь необходимо отметить, что в процессе итерационного уточнения величин G и x_2 скольжения фаз в широкой s_1 и узкой s_2 частях, будут автоматически пересчитываться и в конце работы алгоритма на выходе также получим значения этих величин.

Авторами разработана программа, взаимодействующая с REFPROP10 через API, которая с помощью описанного алгоритма позволяет вычислять расход и другие параметры двухфазного потока по исходным данным о давлениях и температурах в СУ, поступающим с соответствующих датчиков. Предложенный алгоритм можно модифицировать для определения расхода по перепаду температур ΔT на СУ: а именно, в вышеприведённом алгоритме вместо давления в узкой части P_2 по начальной температуре T_1 определим температуру $T_2 = T_1 - \Delta T$.

Зная S_2 и T_2 , точно так же, как и в предыдущем варианте алгоритма, определим все термодинамические величины в узкой части с помощью программы REFPROP10.

Обсуждение результатов. Сравним калибровочные характеристики расходомера из [15], рассчитанные двумя методами: первый представлен в [14], второй – в данной работе, соответственно ДР1 и ДР2, на примере работы с горизонтальными потоками двухфазного гелия при температуре насыщения $T_{\text{нас}} = 4,5 \text{ К}$ ($P_{\text{нас}} = 130060 \text{ Па}$)³ для сверхпроводящего ускорителя многозарядных ионов «Нуклотрон». Его СУ имеет следующие геометрические характеристики: диаметр широкой и узкой части d_1 и d_2 , равны соответственно 38,0 мм и 9,5 мм. Предполагается, что расходомер в системе охлаждения «Нуклотрона» должен быть установлен горизонтально. Для данной ориентации можно воспользоваться простыми соотношениями, которые позволяют определить коэффициенты скольжения для горизонтальных потоков гелия в каналах круглого сечения. Данные соотношения удобны для практических применений [24], так как по сравнению с картами течений двухфазных потоков позволяют довольно просто определить коэффициент скольжения:

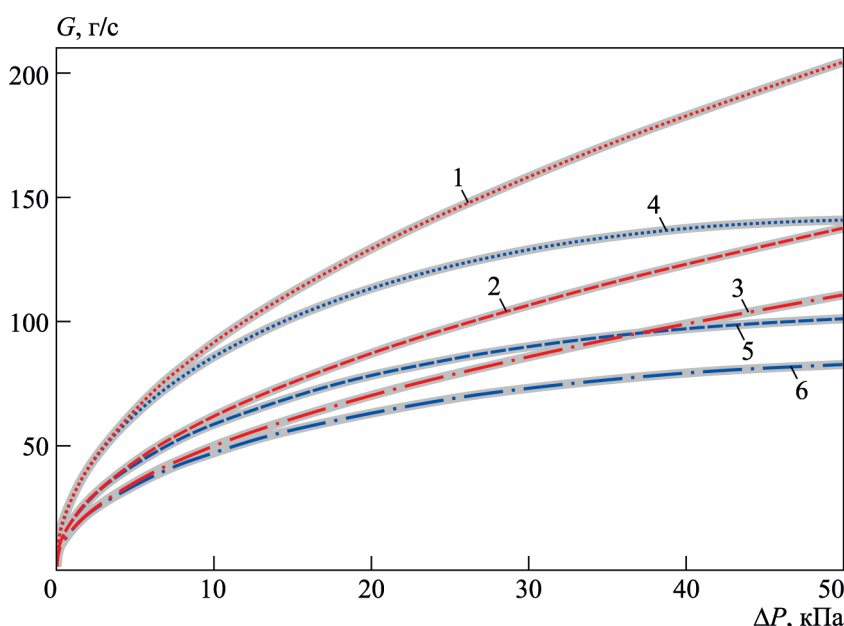


Рис. 2. Зависимость расхода G потока двухфазного гелия ($T_{\text{нас}} = 4,5 \text{ К}$; $P_{\text{нас}} = 130060 \text{ Па}$) от перепада давления ΔP на сужающем устройстве при различных значениях массового паросодержания x :

1, 2, 3 – ДР1 рассчитаны по методике, представленной в [14]; 4, 5, 6 – ДР2 рассчитаны по изложенной в данной работе методике; фоновые полосы серого цвета – предельные отклонения значений расхода

Fig.2. The two-phase helium ($T_{\text{sat}} = 4,5 \text{ К}$; $P_{\text{sat}} = 130060 \text{ Па}$) flowrate G dependence on the pressure drop across the venturi ΔP at various values of the mass vapour quality x : 1, 2, 3 – TPF No.1 are calculated according to the technique presented in paper [14]; 4, 5, 6 – TPF No. 2 are calculated according to the technique presented in this paper; the grey background bands – the limit deviation of flowrate

$$s = (\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{г}})^{y(m)},$$

где $m = G/A$ – массовая скорость потока, а показатель степени $y(m)$ имеет вид функции

$$\left. \begin{aligned} y &= 0, m \geq 200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с}); \\ y &= 0,457m^{-0,16}, 10 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с}) \leq m \leq 200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с}). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Предполагается, что при достаточно больших m поток гелия становится гомогенным ($y = 0$), а при небольших $m < 10 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ поток расслаивается ($y = 1/3$) [25]. Стоит отметить, что для иных ориентаций расходомера необходимо экспериментально получить соотношения аналогичные (15) или в самом общем случае карту течений двухфазных потоков для данной ориентации.

На рис. 2 представлены зависимости расхода от перепада давления для некоторых значений массового паросодержания. Широкие фоновые полосы серого цвета показывают предельные отклонения значений расхода, обусловленные погрешностью измерения датчика давления с классом точности 1.0 и абсолютной погрешностью температуры в широкой части СУ 10 мК.

На рис. 3 представлены зависимости массового расхода от перепада температуры при различных значениях массового паросодержания. Аналогично рис. 2 предельные отклонения значений расхода изображены широкими фоновыми полосами серого цвета и соответствуют погрешности измерения температуры 1 мК.

Из рис. 2 следует, что, калибровочные кривые ДР1 и ДР2 практически совпадают при низких расходах. Это согласуется с обсуждаемыми выше условиями применимости формул (11) и оправданности использования поправочного коэффициента $k(\varphi, T)$. С ростом расхода кривые начинают расходиться, причём чем выше расход, тем больше расхождение. Так относительная разница между массовыми расходами $(G_{\text{ДР1}} - G_{\text{ДР2}}) / G_{\text{ДР2}}$, когда $\Delta P = 50 \text{ кПа}$ превышает 45 % при $x = 0,1$, 38 % при $x = 0,5$ и 35 % при $x = 0,9$. Погрешность определения расхода из-за погрешностей датчиков давления и температуры у ДР1 больше по сравнению с ДР2 во всём диапазоне изменения перепада давления. Что касается чувствительности $|dG/d\Delta P|$, то, на первый взгляд, у ДР1 эта характеристика представляется предпочтительней, так как чувствительность ДР2 слабо отличается от нуля при перепадах давления выше 50 кПа, в то время как у ДР1 она практически постоянна

³ Здесь и далее подразумевается, что величины T и P с нижним индексом «нас» характеризуют двухфазный поток, который находится в равновесии на линии насыщения.

в этом диапазоне. Подобное поведение калибровочной кривой ДР2 можно объяснить тем, что увеличение массового расхода потока вызывает снижение давления в узкой части СУ, что влечет уменьшение средней плотности потока (окрестность критической точки исключена из рабочего диапазона расходомера), а это в свою очередь ведёт к снижению массового расхода, так как он возрастает с плотностью. Из-за подобной обратной связи, начиная с некоторого значения перепада давления, расход уже не может расти бесконечно, так как данный рост компенсируется соответствующим снижением из-за уменьшения плотности потока, а форма калибровочной кривой ДР1 не учитывает адекватным образом все физические процессы, происходящие в расходомерах на базе СУ. Это значит, что с её помощью невозможно правильно рассчитать чувствительность и оценить рабочий диапазон рассматриваемого расходомера.

Используя найденные калибровочные кривые, можно определить рабочий диапазон ДР. Для определения нижней и верхней границ диапазона будем руководствоваться следующими соображениями: с одной стороны, расходомер должен работать в той области, где погрешность определения расхода из-за неточности датчиков давления и температуры минимальна, с другой стороны, чувствительность в этой области должна быть максимальна. Как следует из рис. 2 это взаимопротиворечащие условия, так как при небольших перепадах давления чувствительность и погрешность определения расхода максимальны, и наоборот, при высоких давлениях эти параметры минимальны. Таким образом, при выборе рабочего диапазона ДР необходимо руководствоваться тем, какое из двух вышеперечисленных условий более приоритетно. Выберем диапазон 11–30 кПа, так как для ДР2 при данных перепадах чувствительность заметно отличается от нуля, а погрешность определения расхода невелика по сравнению с аналогичной погрешностью при небольших расходах. Точное сравнение рабочих диапазонов ДР1 и ДР2 невозможно из-за того, что калибровочная кривая ДР1 не учитывает всех физических особенностей работы СУ. Типичные массовые расходы, с которыми работает ДР, зависят от конструкции системы охлаждения ускорителя. Например, значение полной холодопроизводительности гелиевой системы охлаждения в проекте ускорителя «Нуклотрон», которое изначально оценивалась как 1,1 кВт, после модернизации криогенной системы было увеличено и достигло 4 кВт [26]. Учитывая, что теплоёмкость гелия при температуре 4,5 К равна 18594 Дж/кг [18] и массовое паросодержание на выходе из системы не должно превышать 0,9 [27], массовый расход гелия, который необходимо обеспечить с помощью системы охлаждения, должен быть не меньше $4000 / (0,9 \cdot 18594) \text{ кг/с} = 239 \text{ г/с}$.

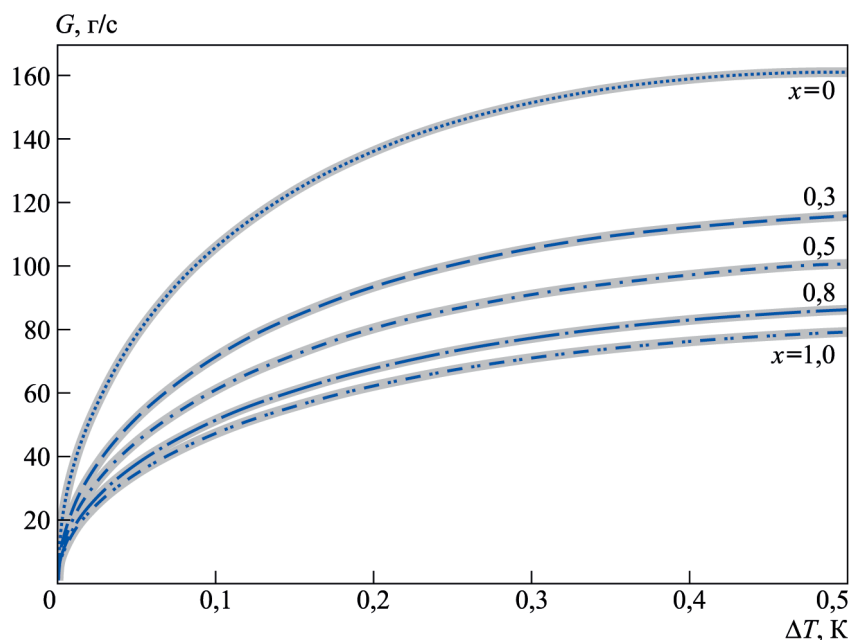


Рис. 3. Зависимость расхода G потока двухфазного гелия ($T_{\text{нас}} = 4,5 \text{ К}$; $P_{\text{нас}} = 130060 \text{ Па}$) от перепада температуры ΔT на сужающем устройстве при различных значениях массового паросодержания x ; фоновые полосы серого цвета – предельные отклонения значений расхода

Fig. 3. The two-phase helium ($T_{\text{sat}} = 4,5 \text{ К}$; $P_{\text{sat}} = 130060 \text{ Па}$) flowrate G dependence the temperature difference across the venturi ΔT at various values of the mass vapour quality x ; the grey background bands – the limit deviation of flowrate

Если добавить дополнительный расход гелия 1,2 г/с, необходимый для охлаждения питающих токовводов [27], то верхняя граница диапазона измеряемого расхода должна быть не меньше 240 г/с. Диапазону давлений 11–30 кПа соответствует диапазон массовых расходов 50–70 г/с при $x = 0,9$. Если дизайн системы охлаждения такой, что возможна только общая регуляция гелиевого потока, то ДР на базе СУ 38/9.5 должен обеспечивать работу с потоками 240 г/с и его необходимо устанавливать в обходном канале (байпасе), если же возможна отдельная регуляция, скажем, для 4 групп сверхпроводящих магнитов, то ДР должен обеспечивать работу с потоками, не превышающими 60 г/с и ДР можно использовать непосредственно в прямом канале. Вторым вариантом решения проблемы работы с большими потоками, который также применим для случая, когда необходимо использовать ДР для потоков с очень малыми расходами, является использование СУ со специально подобранными геометрическими размерами.

Приведённую методику можно дополнительно проверить и при необходимости уточнить, если использовать температурный напор в широкой и узкой частях СУ для определения расхода. Датчики температуры с паспортной погрешностью измерения $\pm 1 \text{ мК}$ доступны в широком диапазоне температур 2–300 К [28] и могут быть включены в состав оборудования ДР.

Полезно также сравнить относительные погрешности расхода, определенные ДР2, для случаев, когда измеряется

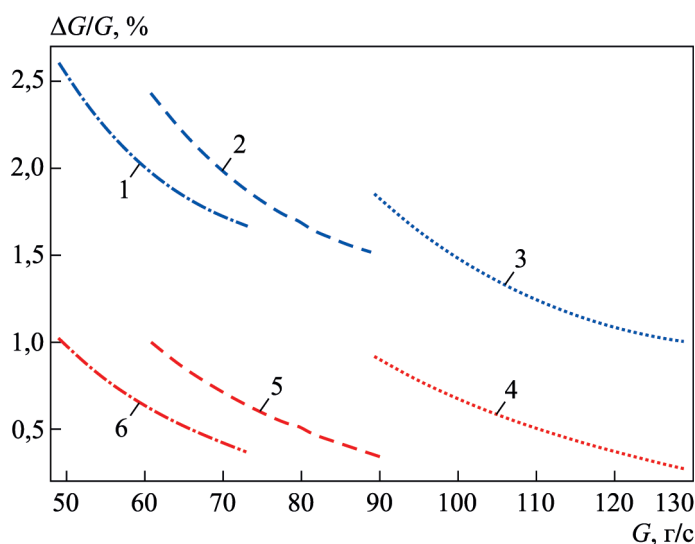


Рис. 4. Относительная погрешность $\Delta G/G$, возникающая при определении массового расхода G при различных значениях массового паросодержания x двухфазного гелия ($T_{\text{нас}} = 4,5 \text{ K}$; $P_{\text{нас}} = 130060 \text{ Па}$).

Графики построены для рабочего диапазона ДР2 11–30 кПа:

1, 2, 3 – Р-датчик; 4, 5, 6 – Т-датчик; 3, 4 – $x = 0,1$; 2, 5 – $x = 0,5$; 1, 6 – $x = 0,9$

Fig. 4. Relative error $\Delta G/G$ vs flowrate G at various values of the mass vapour quality x of two-phase helium ($T_{\text{sat}} = 4,5 \text{ K}$; $P_{\text{sat}} = 130060 \text{ Pa}$). The plots are for the TPF No. 2 operational range 11–30 kPa:

1, 2, 3 – P-sensor; 4, 5, 6 – T-sensor; 3, 4 – $x = 0,1$; 2, 5 – $x = 0,5$; 1, 6 – $x = 0,9$

перепад либо давления, либо температуры на СУ. На рис. 4 показаны результаты такого сравнения. Предполагается, что расходомер работает в определённом выше рабочем диапазоне 11–30 кПа. Кривые, соответствующие случаю, когда измеряется перепад давления при различных массовых паросодержаниях обозначены как «Р-датчик», а случаю, когда измеряется перепад температуры, – «Т-датчик». Для построения кривых «Р-датчик» предполагалось, что датчик давления имеет класс точности 1.0 и погрешность определения температуры составляет 10 мК, в то время как для построения зависимостей «Т-датчик» предполагалось, что погрешность определения температуры составляет 1 мК. Из рис. 4 следует, что относительная погрешность расхода всюду меньше, если он определяется на основе перепада температуры. Так как калибровка датчика давления для сверхнизких температур представляет собой отдельную проблему [29], то какую именно комплектацию измерительного оборудования использовать зависит как от бюджета, так от и технических требований, предъявляемых к ДР.

Закключение. Предложена методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства, учитывающая уравнения состояния двухфазной среды и позволяющая определять или уточнять значения массового расхода по перепаду температуры на сужающем устройстве.

При выводе основного соотношения, описывающего работу расходомера, не учитывались потери на трение и применено адиабатическое приближение. Экспериментальная калибровка не проведена, так как авторам не известен стенд, обеспечивающий максимальный массовый расход вплоть до 100 г/с (чувствительность ДР максимальна). Если установить расходомер в криогенную систему «Нуклотрона», то такую скорость, в принципе, можно обеспечить, но в настоящее время на «Нуклотроне» нет необходимого оборудования, такого как эталонный однофазный гелиевый расходомер в подающем коллекторе и устройство для изменения массовой доли двухфазных потоков [3]. В данной работе полученные результаты авторы сравнили с результатами методики, предложенной в [14]. Расчётным путём показано, что без учёта состояния двухфазной среды невозможно корректно оценить чувствительность и определить диапазон измерений двухфазного расходомера. Относительная разница в значениях расхода, определённых с помощью двух методик, на примере ДР1 и ДР2 для регламентируемых режимов потоков может достигать 36 %.

Список литературы

1. Khodzhbagiyan H. G. et al., *Phys. Procedia*, 2012, vol. 36, pp. 1083–1086. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.110>
2. Augustin I., *Nucl. Instrum. Meth. B*, 2007, vol. 261, pp. 1014–1017. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.110>
3. Khodzhbagiyan H. G., Fischer E., Kovachenko A. D., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 411–414. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864339>
4. Lebrun P., *Cryogenics*, 1994, vol. 34, supp. 1, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(05\)80003-7](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(05)80003-7)
5. Norris B. et al., *Adv. Cryog. Eng.*, 1993, vol. 39B, pp. 1185–1192. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2522-6_145
6. Grigory V. Trubnikov, et al. *Proceedings of 11th European Particle Accelerator Conference*, Genoa, Italy, June 23–27, 2008, vol. 8, pp. 2581–2583.
7. Detlef Reschke, *Proceedings of 8th Workshop on RF Superconductivity*, Abano Terme, Padua, Italy, October 6–10, 1997, vol. 2, pp. 385–396.
8. Пат. № 2108567 РФ / Гречко А. Г., Архаров А. М., Архаров И. А., Емельянов М. Г. // Изобретения. Полезные модели. 1998. № 4.
9. Ashmore R. H., Two-phase cryogenic flowmeter: a proof of concept. Master's thesis. (The Florida State University, Florida, 2006).
10. Foster-Miller creates first accurate flow meter for cryogenic liquids. URL: <http://mstarlabs.com/apeng/fosterm.html> (дата обращения: 11.01.2018).
11. Moerk J. S. et al., US Patent no. 5861755 (19 January 1999).
12. Arkharov A. M. et al., *Adv. Cryog. Eng.*, 1998, vol. 43, pp. 795–802. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_99
13. Lovell T. W., Dresar N. T. V., *AIP Conf. Proc.*, 2006, vol. 823, pp. 273–280. <https://doi.org/10.1063/1.2202426>

14. Filippov Yu. P., Panferov K. S., *Cryogenics*, 2011, vol. 51, no. 11–12, pp. 640–645.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.013>
15. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Kovrizhnykh A. M., *Cryogenics*, 2013, vol. 57, pp. 55–62.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.05.004>
16. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., *Cryogenics*, 2016, vol. 79, pp. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.07.015>
17. Arp V. D., McCarty R. D., Friend D., *Thermophysical Properties of Helium-4 from 0.8 to 1500 K with Pressures to 2000 MPa. NIST Technical Note 1334 (revised)*, National Institute of Standards and Technology, 1998. 152 p.
18. Lemmon E. W. et al., *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0*, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
19. Ortiz Vega, Diego O. A new wide range equation of state for helium-4: Ph.D Thesis. (Texas, A&M University, 2013).
20. Schmidt R., Wagner W., *Fluid Phase Equilib.*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 175–200.
[https://doi.org/10.1016/0378-3812\(85\)87016-3](https://doi.org/10.1016/0378-3812(85)87016-3)
21. Jacobsen R. T., Stewart R. B., Jahangiri M., *Int. J. Thermophys.*, 1986, vol. 7, pp. 503–511.
<https://doi.org/10.1007/BF00502385>
22. Jahangiri M. et al., *Int. J. Thermophys.*, 1986, vol. 7, pp. 491–501.
<https://doi.org/10.1007/BF00502384>
23. Alexeyev A. I., Filippov Yu. P., Mamedov I. S., *Cryogenics*, 1991, vol. 31, no. 5, pp. 330–337.
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90105-6)
24. Filippov Yu. P., *Cryogenics*, 1999, vol. 39, no. 1, pp. 59–68. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00114-3)
25. Zivi S. M., *J. Heat Transfer*, 1964, vol. 86, no. 2, pp. 247–251. <https://doi.org/10.1115/1.3687113>
26. Трубников Г. В., Ускорительный комплекс накопительных колец на встречных пучках тяжелых ионов NICA в ОИЯИ. URL: <http://www.myshared.ru/slide/661153> (дата обращения: 26.12.2019).
27. Khodzhbagiyani H. G. et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol. 21, no. 6, pp. 1795–1798.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2081334>
28. Dedikov Yu. A., Filippov Yu. P. *Proceedings of 17th International Conference on High-Energy Accelerators*, Dubna, Russian Federation, September 7–12, 1998, pp. 305–307.
29. Zhang J. et al., *Appl. Mech. Mater.*, 2011, vol. 80–81, pp. 698–703.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.698>
3. Khodzhbagiyani H. G., Fischer E., Kovachenko A. D., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2006, vol. 16, no. 2, pp. 411–414.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864339>
4. Lebrun P., *Cryogenics*, 1994, vol. 34, supp. 1, pp. 1–8.
[https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(05\)80003-7](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(05)80003-7)
5. Norris B. et al., *Adv. Cryog. Eng.*, 1993, vol. 39B, pp. 1185–1192. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2522-6_145
6. Grigory V. Trubnikov et al. *Proceedings of 11th European Particle Accelerator Conference*, Genoa, Italy, June 23–27, 2008, vol. 8, pp. 2581–2583.
7. Detlef Reschke. *Proceedings of 8th Workshop on RF Superconductivity*, Abano Terme, Padua, Italy, October 6–10, 1997, vol. 2, pp. 385–396.
8. Grechko A. G. et al., RF Patent no. 2108567 (10.04.1998).
9. Ashmore R. H., Two-phase cryogenic flowmeter: a proof of concept. Master's thesis. (The Florida State University, Florida, 2006).
10. Foster-Miller creates first accurate flow meter for cryogenic liquids, available at: <http://mstarlabs.com/apeng/fosterm.html> (accessed: 11.01.2018).
11. Moerk J. S. et al., US Patent no. 5861755 (19 January 1999).
12. Arkharov A. M. et al., *Adv. Cryog. Eng.*, 1998, vol. 43, pp. 795–802. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_99
13. Lovell T. W., Dresar N. T. V., *AIP Conf. Proc.*, 2006, vol. 823, pp. 273–280. <https://doi.org/10.1063/1.2202426>
14. Filippov Yu. P., Panferov K. S., *Cryogenics*, 2011, vol. 51, no. 11–12, pp. 640–645.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.09.013>
15. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Kovrizhnykh A. M., *Cryogenics*, 2013, vol. 57, pp. 55–62.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.05.004>
16. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., *Cryogenics*, 2016, vol. 79, pp. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2016.07.015>
17. Arp V. D., McCarty R. D., Friend D. *Thermophysical Properties of Helium-4 from 0.8 to 1500 K with Pressures to 2000 MPa. NIST Technical Note 1334 (revised)*. National Institute of Standards and Technology, 1998. 152 p.
18. Lemmon E. W. et al., *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0*, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
19. Ortiz Vega, Diego O., A new wide range equation of state for helium-4: Ph.D Thesis. (Texas, A&M University, 2013).
20. Schmidt R., Wagner W., *Fluid Phase Equilib.*, 1985, vol. 19, no. 3, pp. 175–200. [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(85\)87016-3](https://doi.org/10.1016/0378-3812(85)87016-3)
21. Jacobsen R. T., Stewart R. B., Jahangiri M., *Int. J. Thermophys.*, 1986, vol. 7, pp. 503–511.
<https://doi.org/10.1007/BF00502385>
22. Jahangiri M. et al., *Int. J. Thermophys.*, 1986, vol. 7, pp. 491–501. <https://doi.org/10.1007/BF00502384>
23. Alexeyev A. I., Filippov Yu. P., Mamedov I. S., *Cryogenics*, 1991, vol. 31, no. 5, pp. 330–337.
[https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90105-6)
24. Filippov Yu. P., *Cryogenics*, 1999, vol. 39, no. 1, pp. 59–68. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(98\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(98)00114-3)

References

1. Khodzhbagiyani H. G. et al., *Phys. Procedia*, 2012, vol. 36, pp. 1083–1086.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.110>
2. Augustin I., *Nucl. Instrum. Meth. B*, 2007, vol. 261, pp. 1014–1017. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.110>

25. Zivi S. M., *J. Heat Transfer*, 1964, vol. 86, no. 2, pp. 247–251. <https://doi.org/10.1115/1.3687113>

26. Trubnikov G. V., Uskoritel'nyi kompleks nakopitel'nykh kolets na vstrechnykh puchkakh tyazhelykh ionov NICA v OIYal, available at: <http://www.myshared.ru/slide/661153> (accessed: 26.12.2019).

27. Khodzhbagiyan H. G. et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2011, vol. 21, no. 6, pp. 1795–1798. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2081334>

28. Dedikov Yu. A., Filippov Yu.P. *Proceedings of 17th International Conference on High-Energy Accelerators*, Dubna, Russian Federation, September 7–12, 1998, pp. 305–307.

29. Zhang J. et al., *Appl. Mech. Mater.*, 2011, vol. 80–81, pp. 698–703. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.698>

Дата поступления: 13.04.2020.

Дата принятия: 29.04.2020.

Technique for flowrate calculation of cryogenic two-phase flows in Venturi flowmeters without separation.

Ivan A. Arkharov¹, Igor D. Kakorin²

¹The Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: arkharov@bmstu.ru

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation, e-mail: kakorin@jinr.ru

A technique for calculating the flowrate of cryogenic two-phase flows in separationless flowmeters based on a venturi is proposed. The technique takes into account the equation of state of the two-phase medium, that is changes in density, mass vapour quality and temperature of cryogens two-phase flows against pressure in the venturi. It is shown that without an accounting of the flow parameters evolution, an additional flowrate error appears and therefore it is impossible to correctly determine the sensitivity and measurement range of the flowmeter. The most optimal measurement range of the pressure drop is chosen as well as a method of the flowrate measuring by the temperature difference across the venturi is proposed. The problem of determining the flowrate of two-phase cryogenic flows is topical for accelerator, aerospace and gas-transport engineering.

Key words: Two-phase cryogenic flows, separationless flowmeter, Venturi, helium.

Эффективность применения фазохронометрического метода и нейродиагностики для контроля деградации подшипников качения в процессе эксплуатации

А. С. Комшин, К. Г. Потапов, В. И. Пронякин, А. Б. Сырицкий

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация, e-mail: komshin@bmstu.ru, potap@bmstu.ru, vip-u@bmstu.ru, syritsky@bmstu.ru

Рассмотрены проблемы контроля состояния подшипников качения – одних из самых распространённых технических устройств роторных узлов машин и механизмов. Представлен альтернативный подход к метрологическому обеспечению и оценке технического состояния подшипников качения в процессе эксплуатации. Проанализированы существующие подходы, включая методы вибрационной диагностики, анализа огибающей, вейвлет-анализа и другие. Рассмотрено применение фазохронометрического метода и нейродиагностики для сопровождения подшипника в течение жизненного цикла. При этом использован единый формат измерительной информации. Оценена возможность диагностирования подшипника качения на базе измерительной информации, поступающей от вала и сепаратора.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, измерение, деградация, подшипник качения, измерительная технология, дефект, математическая модель, фазохронометрический метод, информационная эффективность, нейродиагностика.

Введение. В настоящее время подшипники качения (далее – подшипники) – наиболее распространённые технические устройства роторных узлов машин и механизмов. Подшипники в значительной степени определяют надёжность и работоспособность указанных узлов и, как правило, являются их самыми слабыми звеньями, требующими постоянного контроля.

Специалисты отмечают, что отказы подшипников могут происходить по нескольким причинам. К наиболее слабо контролируемым относятся дефекты, возникающие при развитии трещин и в результате воздействия циклических усталостных нагрузок [1, 2]. Это делает ресурс подшипников крайне непредсказуемым [3]. В работе [1] представлена схема типичного разрушения подшипника, особенностью которой является этап зарождения дефекта, предшествующего разрушению подшипника. В работе [4] рассмотрен оригинальный метод *kernelextremelearningmachine* (K-ELM), предназначенный для анализа исходных данных вибрации подшипника. Достоинства данного метода – повышение качества обучения и классификации измерительной информации о функционировании подшипника для оптимизации ключевых параметров улучшенного экстремального обучения ядра-опорных векторов, а также использование однослойного перцептрона.

Наиболее распространены методы и средства вибродиагностики подшипниковых элементов с анализом огибающей

в нестационарных условиях [5–8]. Так, в работе [7] показано, что применение цифровых технологий и вариаций спектрального анализа при методе огибающей позволяет получить значительный эффект в диагностировании отдельных дефектов подшипников. Однако данный подход решает лишь отдельные задачи диагностирования подшипников на этапах жизненного цикла.

Некоторые работы в области диагностирования подшипников посвящены анализу не отдельных составляющих вибрации по осям, а математическому анализу вектора пространственного ускорения в качестве измерительного сигнала для контроля состояния подшипников качения. Результаты работ показывают ряд преимуществ анализа вектора пространственной вибрации в случае неисправного подшипника. Дополнительный анализ огибающей позволяет получить более высокую точность спектра огибающей оси нагрузки [9, 10]. Отдельно следует отметить алгоритмический подход, основанный на выделении признаков в рамках теорий энтропии и коэффициента Холдера, а также интеллектуального распознавания образов неисправностей подшипников. Существующие подходы используются при оценке технического состояния ПК на базе искусственного интеллекта в режиме реального времени [11].

Отечественными учёными накоплен значительный опыт по решению проблем контроля и диагностики подшипников. Подходы к оценке технического состояния основаны на методах

тепловой диагностики, анализе вибрации, электрической проводимости, акустической эмиссии, нейронных сетей [12–19].

Каждый из представленных выше методов позволяет решать многие задачи диагностики подшипников, выявлять отдельные дефекты, особенно в сосредоточенных системах (на испытательных стендах, в условиях доступа к подшипнику и его элементам, при высоких скоростях вращения и т. п.). Однако на данный момент не существует полной оценки и сопровождения подшипников на всех этапах жизненного цикла. В зависимости от источников возмущения вибрационный спектр ПК электрической машины разделяется на несколько диапазонов.

В сверхвысокочастотном диапазоне (500–20000 Гц) применение демодуляционных методов анализа виброакустического сигнала в зоне резонансной частоты может выявлять зарождающиеся дефекты на самых ранних стадиях развития. В высокочастотном диапазоне (2000–20000 Гц) рекомендуется рассматривать стохастическую акустическую модель с учётом модуляционных свойств вынужденных собственных колебаний узлов механизма. В среднечастотном диапазоне (200–2000 Гц) необходимо строить диагностическую модель с учётом квазиполигармонического параметрического воздействия колебаний и нелинейного взаимодействия элементов механизма. Это является началом переноса дефектов с одних элементов подшипника на другие, т. е. началом разрушения подшипника и указывает на его предаварийное состояние. В низкочастотном диапазоне (0–300 Гц) колебания вызваны в основном силами неуравновешенных вращающихся масс, хорошие результаты дают детерминированные методы идентификации механических систем.

Классический подход, требующий применения различных методов и средств вибро- и акустодиагностики для контроля различных дефектов подшипников на разных этапах

жизненного цикла, подразумевает на каждом этапе решение отдельных специфических задач.

Таким образом, для получения достоверной измерительной информации о работе подшипников на каждом этапе его жизненного цикла необходим единый подход к диагностике и контролю подшипников, включающий [20]:

разработку методов испытаний, построенных на единых научных принципах для всех этапов жизненного цикла объекта;

применение минимальной номенклатуры измеряемых физических величин;

создание единого методологического подхода к оценке текущего технического состояния опор качения.

Фазохронометрический метод диагностики роторных машин и механизмов. Фазохронометрический (ФХМ) метод разработан в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Его применение позволило отказаться от мультисистемного подхода к диагностике ПК и разработать единую ФХМ-систему, способную обеспечить эффективное информационно-метрологическое сопровождение подшипника не только на этапе эксплуатации, но и на протяжении всего жизненного цикла [21–24]. В ФХМ-диагностике единственным измеряемым параметром является время. На всех этапах диагностики решается одна и та же задача: измеряются и проецируются по заданным алгоритмам на идеальный образец (или модель) вариации интервалов времени вращающихся элементов подшипника, затем сравниваются измеренные и спроецированные вариации интервалов времени и по результатам сравнения диагностируется состояние подшипника на момент измерения. В настоящее время чувствительность ФХМ-систем составляет единицы наносекунд. Этого достаточно, чтобы охватить весь указанный выше диапазон частот вибро- и виброакустической диагностики, выявить зарождающиеся дефекты всех элементов подшипника на самой ранней стадии, отследить их развитие на протяжении всего периода эксплуатации и дать заблаговременный сигнал о необходимости изъятия деградирующего подшипника из эксплуатации.

В отличие от методов и средств вибродиагностики, методы и средства ФХМ-исследований и испытаний подшипников построены на единых научных принципах для всех этапов жизненного цикла объекта. При этом минимизирована номенклатура измеряемых физических величин и создан единый методологический подход к оценке текущего технического состояния опор качения. Таким образом, для диагностики конкретного подшипника можно использовать все достижения и новации ФХМ-метода, получаемые на других объектах.

Первые системы ФХМ-диагностики подшипников были разработаны с учётом возможного размещения измерительных датчиков непосредственно на диагностируемых элементах: кольцах, элементах вращения и сепараторе. На рис. 1 приведена схема ФХМ-диагностики шарикового подшипника. Многоканальная система диагностики состоит из датчиков сепаратора, которые формируют электрические импульсы при прохождении перед датчиками тел качения, и элементов (например, заклёпок) сепаратора. Используют оптические

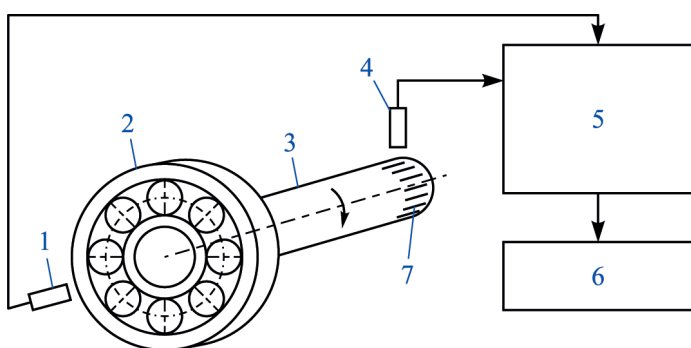


Рис. 1. Схема ФХМ-диагностики шарикового подшипника качения: 1 – датчик сепаратора; 2 – шариковый подшипник качения; 3 – вал; 4 – опорный датчик; 5 – блок измерения интервалов времени; 6 – ЭВМ; 7 – информационные метки

Fig. 1. Scheme of the FHM diagnostics of a ball bearing: 1 – separator sensor; 2 – rolling ball bearing; 3 – shaft; 4 – reference sensor; 5 – time interval measurement unit; 6 – computer; 7 – information labels

(лазерные), индуктивные, индукционные датчики или датчики Холла. В устройство диагностики также могут входить датчик поворота вращающегося внутреннего кольца, установленного на вал 3, и датчик 4 опорного сигнала. Опорный сигнал соответствует полному обороту вращающегося внутреннего кольца и открывает таймер общего счёта.

Импульсы измерительных датчиков поступают в блок 5 (ФХМ-адаптер) измерения интервалов времени между импульсами, где преобразуются в измерительные импульсы. Затем интервалы времени измеряются, кодируются и передаются в блок формирования и анализа рядов интервалов времени. В процессе функционирования подшипника происходит преобразование аналогового сигнала датчика в измерительные импульсы в ФХМ-адаптере и их последующая передача для анализа в ЭВМ 6. При вращении подшипника регистрируются интервалы времени, соответствующие углам поворота вала 3 и сепаратора.

Рассмотрим систему, состоящую из электродвигателя, муфты, вала на двух подшипниковых опорах и нагрузки. Уравнение баланса мощности систем, в которых происходят потери энергии на трение, запишем в виде

$$P_{\text{под}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{под}}$ – подводимая мощность; $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность; $P_{\text{тр}}$ – мощность потерь вследствие трения.

Мощность можно вычислить через произведение момента силы на угловую скорость вращения. Тогда уравнение баланса для системы на рис. 1 можно переписать как

$$M_{\text{д}}\omega_{\text{д}} = M_{\text{н}}\omega_{\text{в}} + (M_{\text{пш1}}\omega_{\text{в}} + M_{\text{пш2}}\omega_{\text{в}}),$$

где $M_{\text{д}}$, $\omega_{\text{д}}$ – момент силы и угловая скорость двигателя соответственно; $M_{\text{н}}$ – момент нагружения вала; $\omega_{\text{в}}$ – угловая скорость вала; $M_{\text{пш1,2}}$ – моменты сопротивления подшипников 1, 2.

В предположении, что двигатель отдаёт постоянную мощность при установившемся режиме работы системы, справедливо уравнение равновесия

$$(M_{\text{н0}} + M_{\text{пш10}} + M_{\text{пш20}})\omega_0 = (M_{\text{н1}} + M_{\text{пш11}} + M_{\text{пш21}})\omega_1, \quad (1)$$

где индексом 0 обозначено начальное состояние системы, индексом 1 – состояние, регистрируемое в данный промежуток времени.

Уравнение (1) может быть переписано в ФХМ-представлении:

$$(M_{\text{н0}} + M_{\text{пш10}} + M_{\text{пш20}})\frac{2\pi}{\tau_0 k} = (M_{\text{н1}} + M_{\text{пш11}} + M_{\text{пш21}})\frac{2\pi}{\tau_1 k}, \quad (2)$$

где τ_0 , τ_1 – регистрируемые доли оборота вала; k – количество долей, на которые разбит один оборот.

Различные дефекты подшипника сказываются на балансе мощности и вызывают различные изменения угловой скорости вращения. На рис. 2 проиллюстрирован процесс проскальзывания тел качения в переднем шпиндельном подшипнике металлорежущего станка на частоте вращения шпинделя

1000 мин⁻¹ (где D – вариации интервалов времени; n – номер кванта фазы; в верхней части рисунка показаны отрезки, отражающие периоды $T_{\text{пр}}$ прохождения временных интервалов проскальзывания тел качения). При отсутствии проскальзывания тел качения характер вращения в целом равномерный, без большого количества резких скачков. При возникновении проскальзывания на хронограмме вращения вала наблюдаются резкие скачки значений интервалов времени. В соответствии с уравнением баланса (2) происходит периодическое повышение момента сопротивления в системе. Ослабление одной опоры приводит к уменьшению жёсткости системы и появлению моментов дисбаланса и гироскопических моментов сил. В результате нагрузка на вторую, более жёсткую опору увеличивается, и она начинает проявляться.

Спектральный анализ автокорреляционных функций (АКФ) хронограмм позволяет увидеть дополнительную информацию. Частоты, присутствующие в спектрах АКФ, кратны частоте перекачивания тел качения по внутреннему кольцу. На рис. 3 представлены спектры АКФ без проскальзывания и с проскальзыванием.

Рассмотрим следующую ситуацию: предположим, что в одном подшипнике описанной выше системы образовался дефект тела качения, например, выкрашивание в одной локальной зоне. Тогда при прохождении телом качения этой зоны будет возникать микроудар. С точки зрения уравнения баланса мощности микроудар приведёт к скачкообразному изменению момента сопротивления в подшипнике, что, в свою очередь, вызовет изменения регистрируемых интервалов времени. Скачок момента силы произойдет тогда, когда тело качения в процессе совершения оборота вокруг своей оси попадёт дефектной областью на дорожку качения. А так как дорожек качения две (внутреннее и наружное кольца), то количество скачков удваивается.

Частоту вращения тела $f_{\text{т}}$ (шарика) вокруг своей оси, если вращение вызвано движением внутреннего кольца, можно определить из выражения

$$f_{\text{т}} = f_{\text{в.к}}(d_{\text{ср}}/d_{\text{т}} - 1),$$

где $f_{\text{в.к}}$ – частота вращения внутреннего кольца; $d_{\text{т}}$, $d_{\text{ср}}$ – диаметр тел качения и средний диаметр подшипника соответственно.

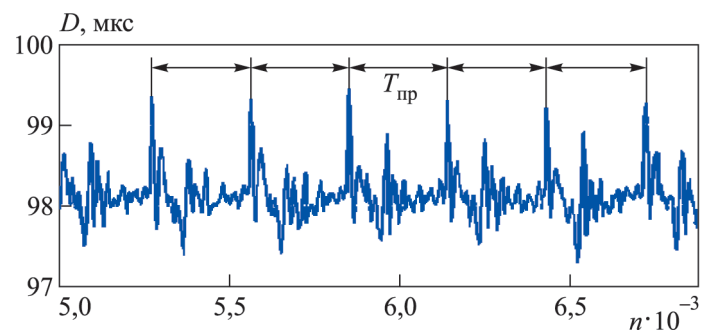


Рис. 2. Хронограмма вращения подшипника: проскальзывание тел качения подшипника в режиме холостого хода

Fig. 2. Chronogram of the rotation of the bearing: slipping of the rolling elements of the bearing in idle mode

Для реализации модельного эксперимента примем следующие значения параметров: $d_{cp}=85$ мм, $d_T=15$ мм, $f_{в.к}=1000$ мин⁻¹.

В системе присутствует случайный шум, связанный с нелинейностью зазоров и распределённый по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением $\sigma=0,0004(625f_{в.к})^{-1}$ (один оборот разбит на 625 долей).

При заданных параметрах подшипника тело качения должно сделать пять оборотов вокруг своей оси за один оборот внутреннего кольца. Но с учётом двух ударов в течение одного оборота в хронограмме вращения вала будут выделяться 10 пиков. Проведение спектрального анализа позволяет найти доминирующую частоту, которая отвечает за возмущения в хронограмме вращения.

Таким образом, при дефекте тела качения в хронограмме вращения вала должны наблюдаться отчётливые скачки, вызванные резким изменением момента сопротивления. В то же время, в спектре АКФ будет выделяться частота, равная удвоенной частоте вращения тела (шарика или ролика) вокруг своей оси.

Использование нейронных сетей для диагностики состояния подшипников. Продемонстрированный подход

к диагностике можно развить с помощью нейронной сети. В настоящее время нейронные сети находят всё большее применение в науке, технике, медицине, торговле и прочих отраслях. Хотя само понятие нейронных сетей возникло ещё в 1943 г. [30], а первый перцептрон – кибернетическая модель мозга – появился в 1958 г. [31], до их полноценного использования прошло полвека. Это связано с тем, что до появления интернета отсутствовало понятие «больших данных», а как оказалось, нейронные сети эффективны именно при обработке больших объёмов информации и не раскрывают своего потенциала в других случаях.

Перед нейронной сетью ставилась задача правильной идентификации дефекта. Для этих целей, с помощью библиотек Keras [32] и TensorFlow [33] языка программирования Python разработан однослойный перцептрон, схема которого показана на рис. 4, где $t_1, 2, \dots, n$ – интервалы времени, образующие массив входных данных.

Конфигурация перцептрона:

тип модели – последовательная;

тип слоёв – полносвязные;

слои – входной (625 нейронов, функция активации relu), выходной (2 нейрона, функция активации softmax);

входные данные – массив данных с размерностью 625 значений;

метрика – точность;

метод вычисления ошибки – adam;

функция потерь – разреженная кросс-категориальная энтропия;

тип обучения – с учителем.

Использование модели перцептрона в данном случае оправдано тем, что подобные нейронные сети хорошо справляются с задачами классификации. Непрерывный ряд интервалов времени, разбитый на отдельные циклы, можно представить как некий одномерный образ, индивидуальный для каждого состояния механизма или его узла. В этом плане данная задача близка к задаче идентификации изображений.

Необходимо отметить, что количество нейронов входного и выходного слоёв было выбрано не случайным образом. Так как входной массив данных имеет 625 элементов, то логично установить такое же количество нейронов входного слоя. Поскольку текущая задача состоит в определении самого факта дефекта без его классификации, то выходной слой имеет всего два нейрона – это 0 (нет дефекта) и 1 (есть дефект). Входные данные для нейронной сети подготовлены следующим образом:

массивы исходных данных поделены по циклам, в каждом цикле 625 значений;

каждому циклу внутри массива «нормальных» значений присвоена метка «0», каждому циклу внутри массива «дефектных» значений – метка «1»;

массивы объединены и перемешаны (для лучшей обучаемости нейронной сети);

перемешанный единый массив поделён на тренировочный и тестовый массивы в соотношении 66:33.

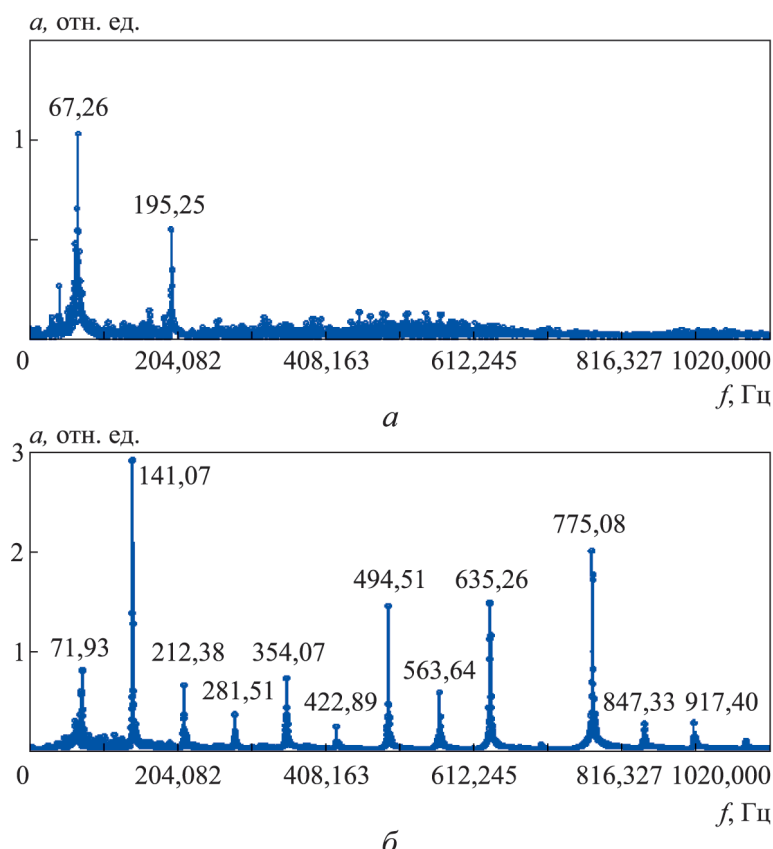


Рис. 3. Спектр автокорреляционных функций амплитудой a в режиме холостого хода при отсутствии проскальзывания (a) и при проскальзывании ($б$)

Fig. 3. The spectrum of autocorrelation functions amplitude a in idle mode in the absence of slippage (a) and during slippage (b)

Обучение перцептрона производилось на 50 эпохах, при этом значения весовых коэффициентов, обеспечивающих наивысшую точность, сохранялись в файл. В результате вычислений, выполненных нейронной сетью, вероятность правильной идентификации на тренировочных данных составила 98 %, на тестовых – 95 %.

Здесь следует отметить, что нейронная сеть не работала в реальных условиях: тренировка происходила на данных, обработанных по предложенной выше методике, т. е. при известном конечном результате (есть проскальзывание или нет). Было важно продемонстрировать потенциал применения нейронных сетей при технической диагностике. При имеющейся верифицированной математической модели, натренировав нейросеть на генерируемых этой моделью данных, можно эффективно использовать сеть при реальной диагностике широкого спектра дефектов.

Одним из ключевых параметров при получении информации, соответствующей результату измерения, является полезная составляющая измерительной информации. В 1948 г. американский инженер и математик К. Шеннон в качестве меры измерения количества информации ввёл понятие энтропии [34], выражающей неопределённость. Позже П. В. Новицкий предложил применить теорию информации к измерительным приборам [35]. Количество информации определяется как разность энтропий до $H(x)$ и после $H(x/x_u)$ измерений [36]:

$$I = H(x) - H(x/x_u).$$

Энтропия дискретного источника вычисляется по формуле [34]:

$$H(x) = -\sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i), \quad (3)$$

где p_i – вероятность i -го события.

Для непрерывного источника выражение (3) преобразуется к виду [34, 36]:

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log_2 p(x) dx.$$

При измерениях случайной величины на интервале $[x_1; x_2]$ с погрешностью Δ для равномерно распределённых величин справедливо выражение [36]:

$$I = \log_2[(x_2 - x_1)/(2\Delta)] = \log_2 N. \quad (4)$$

Равенство (4) справедливо и для любых других законов распределения случайных величин при условии, что интервал неопределённости измерения определяется через энтропию [36]. Для оценки информационной ёмкости ФХМ-метода под величиной N следует понимать отношение единичного временного интервала T к энтропийной неопределённости измерения $2\Delta t$. Предельная погрешность измерения интервалов времени Δt для ФХМ-метода

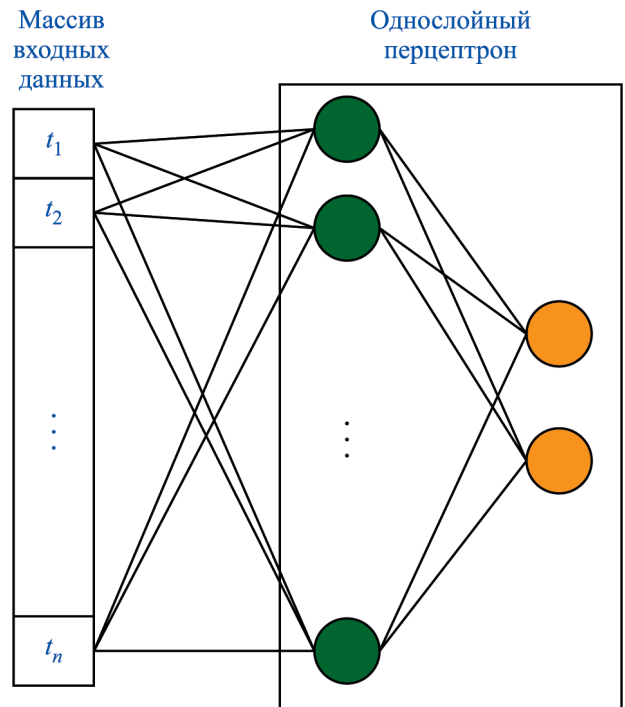


Рис. 4. Схема нейронной сети

Fig. 4. The scheme of the neural network

существующими техническими средствами на данный момент составляет 50 нс [26].

По формуле (4) вычислили информационную ёмкость ФХМ-метода:

$$I = \log_2(2^{-1} \cdot 5^{-1} \cdot 10^8) = 23,3 \text{ бита.}$$

Информационную ёмкость метода вибрационной диагностики можно оценить аналогичным образом. В результате просмотра каталогов современных датчиков вибрации разных фирм установили предельное значение погрешности измерения виброускорения не более 10 мкм/с^2 . В соответствии с формулой (4) рассчитали информационную ёмкость метода вибрационной диагностики:

$$I = \log_2(2^{-1} \cdot 10^5) = 15,6 \text{ бита.}$$

Таким образом, ФХМ-метод даёт больше информации, поскольку в настоящее время никакая величина не измеряется точнее интервалов времени [26].

Заключение. Диагностика подшипников качения с помощью предложенного ФХМ-метода позволяет охватить весь диапазон частот вибрационной и акустической диагностики и выявить зарождающиеся дефекты элементов подшипников качения на самой ранней стадии. При этом можно отслеживать развитие дефектов на протяжении

полного периода эксплуатации подшипника качения и одновременно требовать изъятия деградирующего экземпляра из эксплуатации. Применение нейронных сетей при диагностике подшипников качения имеет большой потенциал и позволяет идентифицировать дефекты с высокой (на уровне 95 %) степенью достоверности. Согласно расчётам метрологических характеристик измерительного канала погрешность передачи информационного сигнала по оптоволоконным линиям связи составляет $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ с. Оценки информационной ёмкости ФХМ-метода и вибродиагностики составляют 23 и 15 бит соответственно. Таким образом, высокая точность определения временных интервалов обеспечивает возможность дальнейшего повышения информационной ёмкости ФХМ-метода.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – докторов наук МД-1209.2020.8.

Результаты работ частично получены с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (сскр.vniiofi.ru), созданного на базе ВНИИОФИ.

Список литературы

1. Kumar A., Kumar R., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, p. 5. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0543-8>
2. Dybała J., Zimroz R., *Applied Acoustics*, 2014, vol. 77, pp. 195–203. DOI:10.1016/j.apacoust.2013.09.001
3. Nikolaou N. G., Antoniadis I. A., *NDT&E Int.*, 2002, vol. 35, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>
4. Zheng L., Xiang Y., Sheng C., *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. 41, p. 505. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2011-5>
5. Prieto M. D., Cirrincione G., Espinosa A. G., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 8, pp. 3398–3407. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2219838>
6. Attoui I., Oudjani B., Boutasseta N. et al., *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, pp. 3409–3435. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04729-4>
7. Randall R. B., Antoni J., *Mechanical systems and signal processing*, 2011, vol. 25 (2), pp. 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
8. Chatterton S., Pennacchi P., Vania A., Borghesani P., *Proceedings of the 9th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science*, vol. 21, Springer, Cham, 2015.
9. Cotogno M., Cocconcelli M., Rubini R., *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
10. Borghesani P., Ricci R., Chatterton S., Pennacchi P., *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
11. Ying Y., Li J., Li J., Chen Z., *Advanced Hybrid Information Processing. ADHIP 2017. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 219, Springer, Cham, 2018.
12. Тихонов Р. С., Старостин Н. П. Тепловая диагностика трения в системе подшипников скольжения с учетом вращения вала // *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций*. 2016. С. 83–83.
13. Короткевич С. В., Холодилов О. В., Кравченко В. В., Чикунев В. В., Белоногий Д. Ю. Входной контроль подшипников качения физическими методами // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2015. № 11. С. 24–31.
14. Мишин В. В., Пащенко А. С. Устройство диагностирования подшипника качения при входном контроле // *Современные материалы, техника и технологии*. 2017. № 1 (9).
15. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Боган А. Н., Мысливцев К. В. Диагностика подшипников качения при эксплуатации станков на основе анализа вибрационного сигнала // *СТИН*. 2013. № 1. С. 21–25.
16. Юркевич В. В., Лушников П. В. Диагностика подшипников качения // *Станкоинструмент*. 2015. № 1. С. 97–99.
17. Кудрявцев Е. А. Возможные пути использования фазохронометрии для диагностики подвижного состава // *Железнодорожный транспорт*. 2015. № 12. С. 51–53.
18. Кудрявцев Е. А. Оценка технического состояния буксовых подшипников качения для вагонов рельсового транспорта // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2013. № 6. С. 26–31.
19. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Измерение пространственных вибраций для диагностики качества сборки шпиндельных узлов // *Измерительная техника*. 2016. № 12. С. 49–52.
20. Пронякин В. И., Кудрявцев Е. А., Комшин А. С., Потапов К. Г. Диагностика подшипников качения фазохронометрическим методом // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2017. № 3 (684).
21. Кудрявцев Е. А., Комшин А. С., Потапов К. Г., Пронякин В. И. Новая концепция ФХМ диагностики подшипников качения // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2017. № 4. С. 18–24.
22. Киселёв М. И., Комшин А. С., Сырицкий А. Б. Прогнозирование технического состояния токарного инструмента на базе фазохронометрической измерительной информации // *Измерительная техника*. 2017. № 11. С. 8–11. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-11-8-11>
23. Комшин А. С. Математическое моделирование измерительно-вычислительного контроля электромеханических параметров турбоагрегатов фазохронометрическим методом // *Измерительная техника*. 2013. № 8. С. 12–15.
24. Сырицкий А. Б. Измерение износа режущего инструмента фазохронометрическим методом в процессе обработки // *Измерительная техника*. 2016. № 6. С. 30–32.
25. Комшин А. С., Орлова С. Р. Контроль деградации конструкционных материалов в процессе эксплуатации на примере струнных элементов // *Измерительная техника*. 2016. № 6. С. 26–29.
26. Kiselev M. I., Pronyakin V. I., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 312, no. 1, p. 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/312/1/012012>
27. Leontiev A. I., Burtsev S. A., *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 543–545. <https://doi.org/10.1134/S1028335816110100>

28. Poshekhonov R. A., Arutyunyan G. A., Pankratov S. A., Osipkov A. S., Onishchenko D. O., Leontyev A. I., *Semiconductors*, 2017, vol. 51 (8), pp. 981–985. <https://doi.org/10.1134/S1063782617080255>
29. Lavrinenko V., Polyakova A., Polyakov A., *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 02074. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402074>
30. Н. Винер. *Кибернетика*. Гл. I: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1961.
31. Голубев Ю. Ф. Нейросетевые методы в мехатронике. М.: Изд-во Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 2007. 157 с.
32. Keras: The Python Deep Learning Library, available at: <http://www.keras.io/> (accessed: 20.02.2020).
33. TensorFlow: An end-to-end open source machine learning platform. URL: <http://www.tensorflow.org> (дата обращения: 20.02.2020).
34. Краус М., Вошни Э. Измерительные информационные системы: Пер. с нем. М.: Мир, 1975. 310 с.
35. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-ое изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
36. Слепова С. В. Основы точности измерительных приборов: учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. 192 с.

References

1. Kumar A., Kumar R., *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, vol. 38, p. 5. <https://doi.org/10.1007/s10921-018-0543-8>
2. Dybała J., Zimroz R., *Applied Acoustics*, 2014, vol. 77, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>
3. Nikolaou N. G., Antoniadis I. A., *NDT&E Int.*, 2002, vol. 35, pp. 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.001>
4. Zheng L., Xiang Y., Sheng C., *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. 41, p. 505. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2011-5>
5. Prieto M. D., Cirrincione G., Espinosa A. G., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 8, pp. 3398–3407. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2219838>
6. Attoui I., Oudjani B., Boutasseta N. et al., *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 106, pp. 3409–3435. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04729-4>
7. Randall R. B., Antoni J., *Mechanical systems and signal processing*, 2011, vol. 25 (2), pp. 485–520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
8. Chatterton S., Pennacchi P., Vania A., Borghesani P., *Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. Mechanisms and Machine Science*, vol. 21, Springer, Cham, 2015.
9. Cotogno M., Cocconcelli M., Rubini R., *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
10. Borghesani P., Ricci R., Chatterton S., Pennacchi P., *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

11. Ying Y., Li J., Li J., Chen Z., *Advanced Hybrid Information Processing. ADHIP 2017. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 219, Springer, Cham, 2018.
12. Tikhonov R. S., Starostin N. P., *Mekhanika, resurs i diagnostika materialov i konstrukcij*, 2016, pp. 83–83 (in Russian).
13. Korotkevich S. V., Kholodilov O. V., Kravchenko V. V., Chikunov V. V., Belonogiy D. Yu., *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2015, no. 11, pp. 24–31 (in Russian).
14. Mishin V. V., Pashmentova A. S., *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2017, no. 1 (9) (in Russian).
15. Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Bogan A. N., Myslivtsev K. V., *STIN*, 2013. № 1. С. 21–25 (in Russian).
16. Yurkevich V. V., Lushnikov P. V., *Stankoinstrument*, 2015, no. 1, pp. 97–99 (in Russian).
17. Kudryavtsev E. A., *Zheleznodorozhnyj transport*, 2015, no. 12, pp. 51–53 (in Russian).
18. Kudryavtsev E. A., *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2013, no. 6, pp. 26–31 (in Russian).
19. Kozochkin M. P., Sabirov F. S., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 59, no. 12, pp. 1310–1315. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1134-2>
20. Pronyakin V. I., Kudryavtsev E. A., Komshin A. S., Potapov K. G., *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2017, no. 3 (684) (in Russian).
21. Kudryavtsev E. A., Komshin A. S., Potapov K. G., Pronyakin V. I., *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2017, no. 4, pp. 18–24 (in Russian).
22. Kiselev M. I., Komshin A. S., Syritskii A. B., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 60, no. 11, pp. 1081–1086. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1321-9>
23. Komshin A. S., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 850–855. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0295-x>
24. Syritskii A. B., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 595–599. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1014-1>
25. Komshin A. S., Orlova, S. R., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 589–594. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1013-2>
26. Kiselev M. I., Pronyakin V. I., Tulekbaeva A. K., *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 312, no. 1, p. 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/312/1/012012>
27. Leontiev A. I., Burtsev S. A., *Doklady Physics*, 2016, vol. 61, no. 11, pp. 543–545. <https://doi.org/10.1134/S1028335816110100>
28. Poshekhonov R. A., Arutyunyan G. A., Pankratov S. A., Osipkov A. S., Onishchenko D. O., Leontyev A. I., *Semiconductors*, 2017, vol. 51 (8), pp. 981–985. <https://doi.org/10.1134/S1063782617080255>
29. Lavrinenko V., Polyakova A., Polyakov A., *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 02074. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402074>
30. Wiener N., *Cybernetics in history. Theorizing in communication: Readings across traditions*, 1954, pp. 267–273.
31. Golubev Yu. F., *Nejrosetevye metody v mekhatronike*, Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im. M. V. Lomonosova Publ., 2007, 157 p. (in Russian).
32. Keras: The Python Deep Learning Library, available at: <http://www.keras.io/> (accessed: 20.02.2020).

33. TensorFlow: An end-to-end open source machine learning platform, available at: <http://www.tensorflow.org> (accessed: 20.02.2020).

34. Krauss M., & Woschni E. G., *Messinformationssysteme: Kennfunktionen, Gütekriterien, Optimierung*, VEB, 1975.

35. Novitsky P. V., Zograf I. A., *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij*, 2 ed., Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991 (in Russian).

36. Slepova S. V., *Osnovy tochnosti izmeritel'nyh priborov: учебное пособие*, Chelyabinsk, YUUrGU Publ., 2008. 192 p. (in Russian).

Дата поступления: 18.03.2020.

Дата принятия: 20.04.2020.

Efficiency of application of the phase-chronometric method and neurodiagnostics for monitoring the degradation of rolling bearings during operation

Aleksander S. Komshin, Konstantin G. Potapov, Vladimir I. Pronyakin, Anthony B. Syritskii

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: komshin@bmstu.ru, potap@bmstu.ru, vip-u@bmstu.ru, syritsky@bmstu.ru

The paper presents an alternative approach to metrological support and assessment of the technical condition of rolling bearings in operation. The analysis of existing approaches, including methods of vibration diagnostics, envelope analysis, wavelet analysis, etc. Considers the possibility of applying a phase-chronometric method for support on the basis of neurodiagnostics bearing life cycle on the basis of the unified format of measurement information. The possibility of diagnosing a rolling bearing when analyzing measurement information from the shaft and separator was evaluated.

Key words: metrological support, measurement, degradation, rolling bearing, measuring technology, defect, mathematical model, phase-chronometric method, information efficiency, neurodiagnostics.

Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления

А. В. Филатов, К. А. Сердюков, А. А. Новикова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Российская Федерация,
e-mail: filsash@mail.ru, konstantinserdyukov@gmail.com, nerra-nerra@mail.ru

Рассмотрены вопросы применения линейных измерительных устройств для измерения температуры. При измерениях температуры резистивными термодатчиками предложено использовать модифицированный нулевой метод, который обеспечивает инвариантность измерителя к изменениям коэффициента усиления измерительного тракта. Нулевой баланс в измерительном тракте автоматически поддерживается синхронным выполнением амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляций и использованием следящей схемы регулировки длительности широтного сигнала. При достижении нулевого баланса длительность импульса управления широтной модуляцией связана линейной зависимостью с сопротивлением термодатчика. Модификация нулевого метода позволяет упростить конструкцию термометра с резистивным чувствительным элементом и повысить точность и линейность его характеристики преобразования путём замены активных прецизионных узлов двумя пассивными – прецизионными сопротивлениями. Рассмотрены погрешности измерений температуры модифицированным нулевым методом. Описана калибровка изготовленного цифрового термометра с миниатюрным резистивным термодатчиком из платины. Предложенную модификацию нулевого метода измерений можно применять при создании приборов, содержащих датчик с чувствительным элементом – электрическим сопротивлением, изменяющимся под воздействием неэлектрической величины.

Ключевые слова: измерение температуры, резистивные термодатчики, модификация нулевого метода измерения.

Введение. Измерение температуры как физической величины является довольно типичной задачей. Линейность температурной шкалы приводит к необходимости применения линейных измерительных устройств, их передаточные характеристики можно описать системой уравнений

$$\begin{cases} Y = B + AX; \\ Y = B - AX, \end{cases} \quad (1)$$

где X , Y – входной и выходной сигналы соответственно; A , B – коэффициенты, обуславливающие соответственно наклон и смещение линейной характеристики преобразования.

В терминах теории электрических цепей коэффициенты определяют значения сигналов двух внутренних опорных элементов (источников) измерительного устройства, настраиваемых в ходе калибровки. При двухточечной калибровке ко входу измерительного устройства поочерёдно подключают два источника эталонных сигналов. В процессе регулировки опорных внутренних элементов значения подаваемых на вход эталонных сигналов приписывают этим элементам. Далее указанные значения запоминают и используют как эталонные. Этими эталонными значениями определяется линейная передаточная характеристика измерительного устройства.

В [1] описаны термометры с измерительным мостом Уитстона, в одно из плеч которого включён чувствительный резистивный элемент (термосопротивление), и дифференциальным усилителем. В этих термометрах первая опорная величина, отвечающая за смещение характеристики преобразования, определяется из условия баланса моста: на входе дифференциального усилителя разность потенциалов должна быть равна нулю. При изменении температуры мост разбалансируется и на выходе усилителя появляется сигнал. Крутизну характеристики определяет коэффициент усиления усилителя, который характеризует вторую опорную величину.

Недостаток большинства измерителей температуры с резистивными термодатчиками связан с мультипликативной погрешностью второй опорной величины, определяющей крутизну передаточной характеристики (коэффициента A в системе (1)). Дрейф и флуктуации коэффициента усиления измерительного тракта термометра, а также нелинейность характеристики преобразования приводят к появлению погрешности измерений.

В [2] описан цифровой термометр, принцип работы которого основан на нулевом методе измерений. Главное достоинство этого метода – устранение влияния изменений коэффициента усиления измерительного тракта на точность измерений.

В термометре выравнивание напряжений на входах компаратора достигается регулировкой напряжения с выхода цифроаналогового преобразователя. Используются три активных прецизионных источника: тока, питающего терморезистивный элемент; опорного напряжения цифроаналогового преобразователя; напряжения смещения. Настройкой напряжения смещения в процессе калибровки устанавливают начальное значение шкалы измерения температуры, а регулировкой опорного источника – наклон линейной характеристики измерителя (настройка на верхнюю границу диапазона).

Цель настоящей статьи – модифицировать нулевой метод [3, 4] так, чтобы упростить конструкцию термометра с резистивным чувствительным элементом и повысить точность и линейность его характеристики преобразования путём замены активных прецизионных узлов двумя пассивными – прецизионными сопротивлениями.

Модификация нулевого метода. Особенность модификации нулевого метода заключается в авторегулировании нулевого баланса с использованием комбинированной модуляции, включающей синхронно выполняемые амплитудно-импульсную (АИМ) и широтно-импульсную (ШИМ) модуляции [5]. При достижении нулевого баланса в измерителе длительность широтно-импульсного сигнала управления ШИМ косвенно связана линейным соотношением с сопротивлением термодатчика.

Рассмотрим модификацию метода на примере устройства измерения температуры, структурная схема устройства приведена на рис. 1. Для выполнения импульсных модуляций в схему термометра введены электронные ключи Кл1–Кл3.

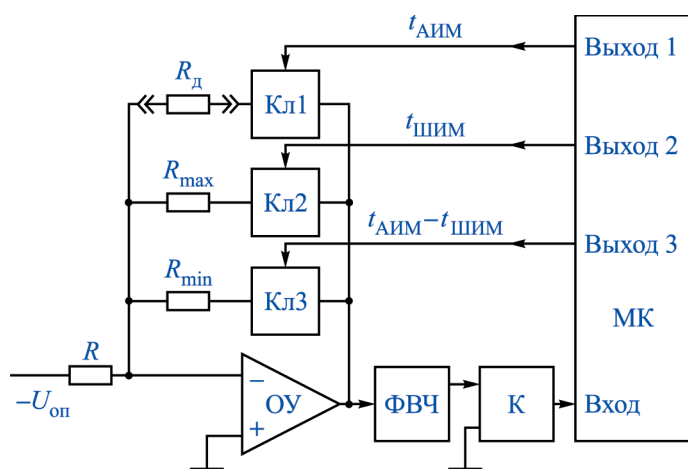


Рис. 1. Структурная схема термометра, реализующего модифицированный нулевой метод измерений:

Кл1–Кл3 – электронные ключи; ОУ – операционный усилитель; ФВЧ – фильтр верхних частот; К – компаратор; МК – микроконтроллер

Fig. 1. The structural diagram of a thermometer that implements a modified zero method of measurement:

K1–K3 – electronic keys; OA – operational amplifier; HF – high-pass filter; C – comparator; MC – microcontroller

Временные диаграммы $U_{\text{вых.1}}^{\text{МК}}(t)$, $U_{\text{вых.2}}^{\text{МК}}(t)$, $U_{\text{вых.3}}^{\text{МК}}(t)$ поступающих от микроконтроллера импульсов управления ключами показаны на рис. 2. В любой момент времени замкнутым является только один ключ. Импульсы управления АИМ длительностью $t_{\text{АИМ}}$, следующие со скважностью 2, замыкают ключ Кл1. ШИМ выполняется в ключе Кл2 по управляющим импульсам длительностью $t_{\text{ШИМ}}$. В промежутке времени после окончания ШИМ и до начала действия сигнала управления АИМ вырабатывается импульс длительностью $t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}$, по которому замыкается ключ Кл3.

Операционный усилитель ОУ включён по инвертирующей схеме (см. рис. 1). В цепи его отрицательной обратной связи установлены сопротивления R_{max} , R_{min} , определяющие соответственно верхнюю и нижнюю границы температурной шкалы, и сопротивление R_d резистивного термодатчика. Подключение одного из сопротивлений в цепь обратной связи усилителя ОУ происходит замыканием ключей, управляемых микроконтроллером МК. На вход операционного усилителя через резистор R поступает постоянное опорное напряжение отрицательной полярности $-U_{\text{оп}}$. В результате синхронной работы ключей на выходе операционного усилителя (см. рис. 2, диаграмма $U_{\text{вых}}^{\text{ОУ}}(t)$) формируется периодическая последовательность трёх повторяющихся уровней положительного напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= U_{\text{оп}}(R_d + R_k)/R; \\ U_{\text{max}} &= U_{\text{оп}}(R_{\text{max}} + R_k)/R; \\ U_{\text{min}} &= U_{\text{оп}}(R_{\text{min}} + R_k)/R, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где R_k – сопротивление электронных ключей в открытом состоянии.

В интегральном исполнении ключи имеют практически одинаковое сопротивление, которое может составлять менее 1 Ом.

После прохождения выходного сигнала операционного усилителя через фильтр верхних частот ФВЧ (см. рис. 1, 2) исключается постоянная составляющая сигнала и временная диаграмма на выходе фильтра смещается вниз относительно нулевой оси времени. Индикатором нулевого баланса в термометре служит отсутствие напряжения на входе компаратора К при замкнутом ключе Кл1, когда по измерительному тракту проходит сигнал с подключённым в цепи обратной связи ОУ термосопротивлением в течение управляющего импульса АИМ. Для достижения нулевого баланса в измерительном тракте термометра микроконтроллером МК направленно изменяется длительность ШИМ. При увеличении длительности $t_{\text{ШИМ}}$ последовательность сигналов на входе компаратора сдвигается вниз относительно нулевой оси времени, при уменьшении $t_{\text{ШИМ}}$ эта последовательность сдвигается вверх.

Регулирование длительности $t_{\text{ШИМ}}$ производится по изменению выходного сигнала компаратора, работающего в режиме нуля-органа и сравнивающего входное напряжение с нулевым потенциалом (определение полярности входного напряжения). Для этого другой вход компаратора соединён с общей точкой схемы термометра – точкой отсчёта потенциалов (см. рис. 1).

На временной диаграмме $U_{\text{вых}}^{\text{ФВЧ}}(t)$ (см. рис. 2) показано состояние достигнутого нулевого баланса, для которого выполняется равенство вольт-секундных площадей S_1 , S_2 положительного и отрицательного импульсов:

$$U_+ t_{\text{ШИМ}} = U_- (t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}); \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_+ &= U_{\text{max}} - U_{\text{д}}; \\ U_- &= U_{\text{д}} - U_{\text{min}}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где U_+ , U_- – соответственно амплитуды положительного и отрицательного импульсов.

Подставим систему (4) в уравнение (3), решим полученное равенство относительно длительности сигнала ШИМ и получим

$$t_{\text{ШИМ}} = (U_{\text{д}} - U_{\text{min}}) t_{\text{АИМ}} / (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}). \quad (5)$$

После подстановки в формулу (5) значений из соотношений (2) получим окончательное выражение для длительности сигнала ШИМ, из которого косвенно можно определить сопротивление датчика:

$$t_{\text{ШИМ}} = (R_{\text{д}} - R_{\text{min}}) t_{\text{АИМ}} / (R_{\text{max}} - R_{\text{min}}). \quad (6)$$

Формула (6) является математической моделью реализации модификации нулевого метода работы измерителя температуры, из которой следует линейная зависимость между длительностью сигнала ШИМ и сопротивлением термодатчика. Поэтому линейность температурной шкалы термометра будет определяться только характеристиками самого датчика. В выражение (6) не входит напряжение опорного источника $U_{\text{оп}}$ и сопротивления R , $R_{\text{к}}$. Сопротивление R подключено на вход операционного усилителя, а $R_{\text{к}}$ является сопротивлением электронных ключей в открытом состоянии. Единственное предъявляемое к ним требование заключается в сохранении значений в течение периода АИМ.

Погрешности измерений температуры модифицированным нулевым методом. Реализованный в термометре модифицированный нулевой метод измерения позволяет устранить систематическую погрешность. Эта погрешность возникает в измерительном тракте и обусловлена током сдвига и напряжением смещения операционного усилителя, которые как постоянно действующие величины отфильтровываются в фильтре верхних частот. При использовании данного метода цифровой выходной сигнал получается в ходе преобразования длительности сигнала ШИМ в код без использования стандартных аналого-цифровых преобразователей.

В термометре фильтр верхних частот первого порядка, представляющий собой разделительную RC -цепь, предназначен для исключения в сигналах постоянной составляющей с минимальными искажениями формы проходящих через фильтр сигналов. Чтобы искажения были минимальными, для постоянной времени фильтра должно выполняться условие, согласно которому граничная частота амплитудно-частотной характеристики фильтра в 10 раз меньше частоты АИМ. Это достигается при выполнении равенства

$$RC = t_{\text{АИМ}} / (10\pi). \quad (7)$$

Так как модификация метода заключается в сравнении вольт-секундных площадей импульсов на входе компаратора, поэтому на точность измерений оказывает влияние скорость переключения ключей. В микроконтроллере термометра выходной сигнал представлен в цифровом коде длительности $t_{\text{ШИМ}}$. При автоматической регулировке нулевого баланса изменение длительности происходит в течение временного интервала, соответствующего изменению кода микроконтроллера на один младший разряд. Чтобы не вносить погрешностей измерения, время переключения ключей $t_{\text{к}}$ не должно превышать половину временного интервала изменения $t_{\text{ШИМ}}$:

$$t_{\text{к}} \leq t_{\text{АИМ}} / 2^{n+1}, \quad (8)$$

где n – количество разрядов цифрового кода длительности $t_{\text{ШИМ}}$ в микроконтроллере.

Из условия (7) также выбирается длительность $t_{\text{АИМ}}$ управляющего импульса АИМ. Увеличение длительности $t_{\text{АИМ}}$ приводит к возрастанию относительного спада (скола)

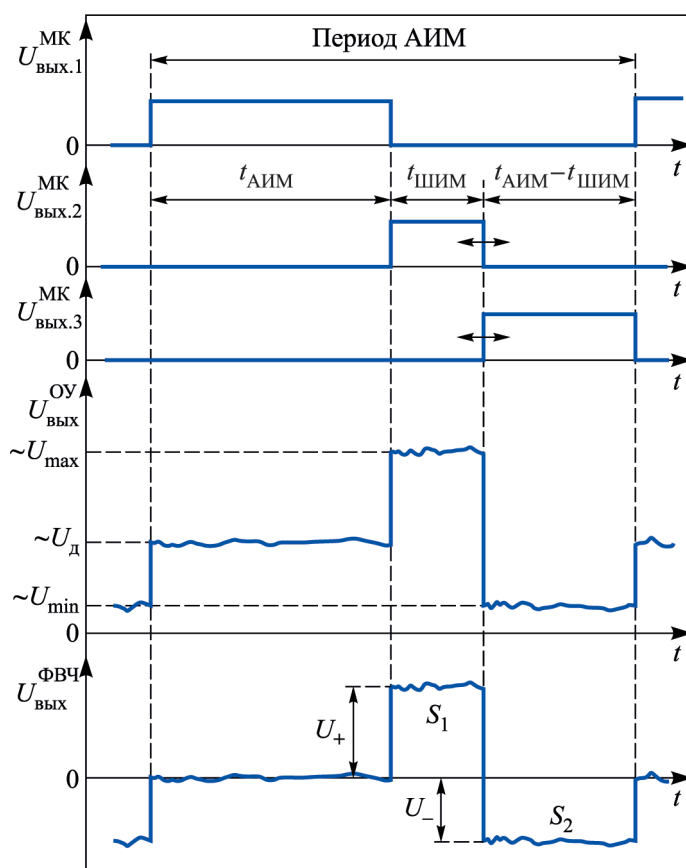


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие реализацию в термометре модифицированного нулевого метода измерений

Fig. 2. Timing diagrams explaining the principle of the implementation of the modification of the zero method of measurement in a thermometer

вершин положительного и отрицательного импульсов на выходе фильтра верхних частот и появлению дополнительных погрешностей. Чтобы этого не происходило, согласно формуле (7) граничную частоту фильтра верхних частот необходимо уменьшать при соответствующем увеличении постоянной времени RC -цепи фильтра. Уменьшение длительности $t_{\text{АИМ}}$ непосредственно связано с разрешающей способностью измерителя (количество разрядов цифрового кода длительностью $t_{\text{ШИМ}}$) и временем переключения ключей.

Увеличение длительности импульса управления АИМ уменьшает быстродействие измерителя, поэтому в описанном термометре длительность рассчитывали с учётом соотношения (8) по формуле

$$t_{\text{АИМ}} = (1,3 \dots 1,5) t_k 2^{n+1}. \quad (9)$$

Для ключей с временем переключения $t_k = 0,1$ мкс и количеством разрядов $n = 12$ по формуле (9) получили значение длительности $t_{\text{АИМ}} = 900$ мкс.

Как следует из формулы (6), двумя опорными элементами в измерителе являются сопротивления R_{max} , R_{min} , которые должны быть прецизионными. Выразим из соотношения (6) сопротивление термодатчика:

$$R_d = R_{\text{min}} + (R_{\text{max}} - R_{\text{min}}) t_{\text{ШИМ}} / t_{\text{АИМ}}. \quad (10)$$

Границам шкалы измерений соответствуют два крайних значения длительности сигнала ШИМ – нуль и $t_{\text{АИМ}}$. Если в формуле (10) $t_{\text{ШИМ}} = 0$, тогда $R_d = R_{\text{min}}$. При $t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$ сопротивление термодатчика $R_d = R_{\text{max}}$. Следовательно, R_{max} и R_{min} определяют соответственно нижнюю и верхнюю границы диапазона измерений. Регулируя сопротивления R_{max} и R_{min} , можно настраивать произвольный температурный диапазон термометра в процессе калибровки.

Калибровка термометра. Калибровку термометра разбивают на два этапа. В начале первого этапа датчик помещают в среду с известной температурой, определяющей нижнюю границу диапазона температур. На этом этапе сигнал ШИМ не вырабатывается ($t_{\text{ШИМ}} = 0$). Регулируют сопротивление R_{min} до исчезновения на входе компаратора сигнала с частотой АИМ (на выходе фильтра верхних частот в оба полупериода АИМ сигналы будут нулевыми). При этом логический пробник, подключённый к выходу компаратора, фиксирует случайно повторяющиеся переходы между логическим нулём и единицей.

На втором этапе датчик помещают в среду с температурой, определяющей верхнюю границу шкалы измерений. На протяжении всего этапа длительность сигнала ШИМ устанавливают равной длительности управляющего импульса АИМ ($t_{\text{ШИМ}} = t_{\text{АИМ}}$). Регулировку сопротивления R_{max} выполняют аналогично регулировке сопротивления R_{min} на первом этапе до момента исчезновения сигнала АИМ на входе компаратора.

При регулировке сопротивления R_{max} выходное напряжение операционного усилителя не должно превышать значение, выше которого усилитель ОУ переходит в нелинейный режим. Ограничение выходного сигнала связано со значением

напряжения $U_{\text{ИП}}$ биполярного источника питания усилителя (на рис. 1 не показан), и наступает при превышении выходным напряжением порогового значения, равного $U_{\text{ИП}} - 1,5$ В. Чтобы этого не происходило, подключаемое на вход операционного усилителя сопротивление R должно отвечать условию

$$R \geq R_{\text{max}} |U_{\text{оп}}| / (U_{\text{ИП}} - 1,5).$$

От сопротивления R зависит сила тока, протекающего через резистивный термодатчик. Увеличение силы тока приводит к дополнительному разогреву активной зоны датчика и появлению погрешностей. Поэтому требуется выбирать как можно меньшую силу тока, но не ниже значения, при котором влияние аддитивных тепловых шумов становится существенным.

По схеме рис. 1 был собран цифровой термометр с миниатюрным резистивным термодатчиком из платины. В процессе калибровки термометра с использованием термопечи настроили исследуемый температурный диапазон 100–250 °С. В микроконтроллере длительность сигнала ШИМ преобразовывалась в цифровой код. Температуру рассчитывали по формуле

$$T = T_{\text{min}} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) N_{\text{вых}} / (N_{\text{max}} + 1),$$

где T_{min} , T_{max} – значения хранящихся в микроконтроллере минимальной и максимальной температур измерительной шкалы в градусах Цельсия; $N_{\text{вых}}$ – цифровой код длительностью $t_{\text{ШИМ}}$; N_{max} – максимальный цифровой код длительностью сигнала ШИМ, когда все разряды кода установлены в состояние логической единицы (эквивалент длительности $t_{\text{АИМ}}$).

Для двенадцатиразрядного цифрового кода выходного сигнала термометра разрешение составило 0,037 °С. Максимальное отклонение характеристики измерителя от прямой линии во всём диапазоне измеряемых температур не превысило 0,1 °С. Погрешность термометра определяли методом сравнения с показаниями принятого за эталон измерителя СТН6200 (АО «ВИКА МЕРА», Россия) в процессе прогрева внутреннего объёма печи от минимальной до максимальной температуры.

Работа термометра основана на импульсных модуляциях, поэтому проверяли влияние переходных процессов в измерительных цепях в процессе коммутации ключей. Аperiodический характер переходных процессов обеспечивали соответствующим конструктивным исполнением и разводкой печатной платы схемы термометра, уменьшающими влияние распределённых реактивностей.

Необходимо отметить, что чувствительный элемент датчика можно изготавливать из различных материалов, например, из никеля, меди и т. д. [6]. Выбор материала резистора датчика зависит от диапазона измеряемых температур и необходимой точности измерений, которая в первую очередь связана с линейностью градуировочной характеристики датчика.

Заключение. Предложенный в статье принцип модификации нулевого метода измерений можно использовать при создании приборов, например, для измерения освещённости,

влажности, механических деформаций (в тензометрии), применяемых в газовом анализе и других областях. В состав таких приборов входит датчик с чувствительным элементом — электрическим сопротивлением, изменяющимся под воздействием неэлектрической величины.

Список литературы

1. Клаассен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
2. Джонс М. Х. Электроника — практический курс: Пер. с англ. М.: Постмаркет, 1999. 528 с.
3. Филатов А. В. Анализ источников погрешностей входного блока модифицированного нулевого микроволнового радиометра // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 40–43.
4. Filatov A. V., *Modern Instrumentation*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 1931. <https://doi.org/10.4236/mi.2015.43003>
5. Пат. № 2485462 РФ / А. В. Филатов, А. Г. Лощилов, А. В. Убайчин // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 17.

6. Шахов Э. К. Об одной возможности терморезистивного измерения температуры // Датчики и системы. 2005. № 3. С. 13–15.

References

1. Klaassen K. B., *Electronic measurement and instrumentation*, Cambridge University Press, 1996. 528 p.
2. Jones M. H., *A practical introduction to electronic circuits*, Cambridge University Press, 1998. 352 p.
3. Filatov A. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 266271. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0956-7>
4. Filatov A. V., *Modern Instrumentation*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 1931. <https://doi.org/10.4236/mi.2015.43003>
5. Filatov A. V., Lochilov A. G., Ubaichin A. V., RF Patent no. 2485462, *Byull. Izobret.*, no. 17 (2013)
6. Shakhov E. K., *Datchiki i Sistemyi*, 2005, no. 3, pp. 1315 (in Russian).

Дата поступления: 12.02.2020.

Дата принятия: 28.04.2020.

Prospects for the use of a modified zero method for measuring temperature with resistance sensors

Alexander V. Filatov, Konstantin A. Serdyukov, Anastasiya A. Novicova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: filmsash@mail.ru, konstantinserdyukov@gmail.com, nerra-nerra@mail.ru

The issues of the use of linear measuring devices for measuring temperature are considered. A method for measuring temperature by resistive temperature sensors based on a modification of the zero method is described. This modification ensures the invariance of the meter to changes in the gain of the measuring path. Zero balance in the measuring path is automatically supported by the synchronous execution of pulse-amplitude and pulse-width modulation and using a tracking circuit for adjusting the width of the latitudinal signal. When reaching zero balance, the pulse width of the latitude modulation control is connected linearly with the resistance of the temperature sensor. The errors of temperature measurements by the modified zero method are considered. The calibration of the manufactured digital thermometer with a miniature resistive temperature sensor made of platinum is described. The proposed modification of the zero measurement method can be used to create devices containing a sensor with a sensitive element — electrical resistance, changing under the influence of a non-electric quantity.

Key words: temperature measurement, resistive temperature sensors, modification of the zero measurement method.

Влияние точности оценивания частотных характеристик радиолокационных целей на результаты идентификации геометрической формы локальных отражателей

В. В. Неёлов, С. Е. Шалдаев

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: lopedevego@yandex.ru, shs99@yandex.ru

Рассмотрены вопросы внедрения широкополосных технологий в радиолокационные системы гражданского и специального назначения. Популярность указанных технологий для решения ряда практических задач обуславливает актуальность исследований, связанных с детальным анализом дальностных портретов наблюдаемых объектов на новом качественном уровне. Исследовано влияние систематической погрешности измерительного канала на достоверность идентификации геометрической формы локальных отражателей объекта наблюдения с использованием результатов широкополосного радиолокационного зондирования. Описан созданный широкополосный радиолокационный измерительный канал с линейной частотной модуляцией сигнала на основе метода обобщённого гетеродинирования. Предложена методика компенсации систематических погрешностей измерений для канала данного вида с использованием калибровочных сфер. Оценена систематическая погрешность измерений частотной характеристики сферы и предложен показатель погрешности оценивания частотных характеристик объектов. Приведена зависимость статистических показателей результатов идентификации геометрической формы локальных отражателей от указанного показателя. Экспериментально подтверждена возможность идентификации геометрической формы локальных отражателей объектов по параметрам их частотных характеристик. Полученные результаты можно применять для оценки достоверности идентификации геометрической формы локальных отражателей на этапе калибровки измерительного канала, а также для принятия решения о целесообразности реализации алгоритмов идентификации геометрической формы локальных отражателей на существующей радиолокационной станции.

Ключевые слова: частотная характеристика, идентификация геометрической формы радиолокационной цели, калибровка измерительного канала, широкополосные измерения.

Введение. Метод измерения характеристик рассеяния цели с использованием линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов известен [1–3] и неоднократно реализован в зарубежных радиолокационных станциях радиовидения различного назначения [4–7]. Характерной особенностью данного метода является возможность реализации высокого разрешения по дальности. Это позволяет наблюдать объекты как распределённые цели, и использовать полученную информацию для решения ряда прикладных задач. Одна из таких прикладных задач – идентификация геометрической формы локальных отражателей цели с использованием модели, разработанной на основе геометрической теории дифракции [8]. Такая модель позволяет идентифицировать поверхность двойной и одинарной кривизны, плоскость и кромку. Достоверность идентификации определяется погрешностью оценивания частотной характеристики (ЧХ) цели. Погрешность оценивания ЧХ цели определяет целесообразность реализации алгоритмов идентификации геометрической формы локальных отражателей в конкретной радиолокационной системе.

В публикациях, посвящённых геометрической теории дифракции, идентификация геометрической формы локальных

отражателей производится с использованием ЧХ, рассчитанных аналитически [9, 10] или в программных пакетах электродинамического моделирования [11, 12]. В работах [8, 13] описаны результаты измерений без анализа влияния погрешности оценивания ЧХ на результаты идентификации.

Цели данного исследования – разработка методики компенсации систематических погрешностей радиолокационного широкополосного измерительного канала для решения задачи идентификации геометрической формы локальных отражателей и оценка влияния погрешности оценивания ЧХ радиолокационных целей на достоверность идентификации геометрической формы локальных отражателей.

Для достижения указанных целей на базе радиолокационного измерительного комплекса «Цунами-3» Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского создан широкополосный измерительный канал с ЛЧМ-сигналом, разработана методика идентификации геометрической формы локальных отражателей цели, проведено экспериментальное исследование её практического применения.

Широкополосный измерительный канал с ЛЧМ-сигналом. Упрощённая функциональная схема измерительного канала

приведена на рис. 1. Канал функционирует следующим образом. От сверхвысокочастотного генератора 1 ЛЧМ-сигнал через направленный ответвитель 2 поступает на излучающую антенну 3 и в качестве опорного сигнала на гетеродинный вход смесителя 7. Сигнал, отражённый от объекта 4, размещённого на малоотражающей опоре 5, через приёмную антенну 6 поступает на сигнальный вход смесителя 7. В результате умножения опорного и отражённого объектом сигналов на выходе смесителя появляется сигнал разностных частот, который поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 8. Бланкирование входа АЦП управляется через синхронизирующий канал от генератора. Низкочастотная составляющая сигнала разностных частот, содержащая искомую ЧХ объекта, в цифровом виде сохраняется на персональном компьютере 9.

Технические характеристики измерительного канала с ЛЧМ-сигналом

Рабочий диапазон частот.....	8,5–10,5 ГГц
Излучаемая мощность.....	20 дБм
Время свипирования.....	50 мс
Ширина полосы частот.....	2 ГГц
Разрешение по дальности.....	7,5 см
Поляризация.....	Линейная
Вид зондирующего сигнала.....	ЛЧМ, непрерывный гармонический
Динамический диапазон измерительного канала.....	100 дБ

Тепловые шумы подавляются с помощью когерентного накопления реализаций при многократном облучении статичного объекта.

Сигнал разностных частот представляет собой двукратное обратное преобразование Фурье от искомой усечённой ЧХ объекта (в диапазоне зондирующего сигнала). Следовательно, однократное преобразование Фурье указанного сигнала позволяет получить сглаженную импульсную характеристику. Модуль сглаженной импульсной характеристики далее будем называть дальностным портретом объекта. На рис. 2 приведён дальностный портрет двухгранного уголкового отражателя в следующих координатах: σ – эффективная площадь рассеяния, f – промежуточная частота смесителя.

Отклик от цели в спектральной области находится на частоте, определяемой по формуле [2]:

$$\Delta f = 2BR / (ct_{\text{имп}}), \quad (1)$$

где B – девиация частоты; R – расстояние до цели; c – скорость света, $t_{\text{имп}}$ – длительность импульса.

При подстановке в уравнение (1) расстояния $R = 16$ м, на котором находится наблюдаемый объект от антенн, девиации частоты $B = 2$ ГГц и времени излучения $t_{\text{имп}} = 0,05$ с величина Δf принимает значение, равное 4,25 кГц. Как видно из рис. 2, отклик от объекта находится на указанной частоте.

Методика калибровки широкополосного измерительного канала. Усечённая ЧХ объекта измерений определяется относительным методом математической обработки результатов измерений. Для этого выполняют следующие операции:

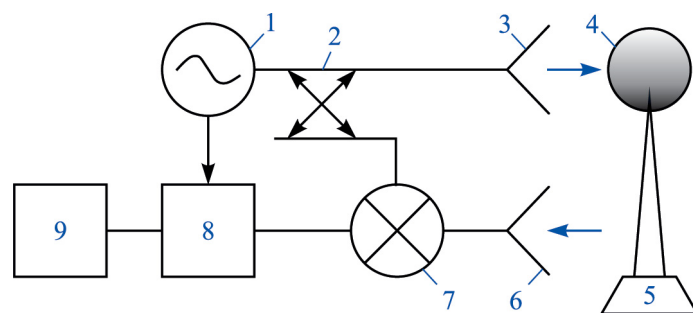


Рис. 1. Упрощённая схема измерительного канала:
1 – сверхвысокочастотный генератор ЛЧМ-сигнала; 2 – направленный ответвитель; 3, 6 – излучающая и приёмная антенны соответственно; 4 – объект измерений; 5 – малоотражающая опора; 7 – смеситель; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – персональный компьютер

Fig. 1. Simplified scheme of the measuring channel:
1 – microwave generator chirp signal; 2 – directional coupling; 3 – transmitting antenna; 4 – object of measurement; 5 – pylon; 6 – receiving antenna; 7 – mixer; 8 – analog to digital converter; 9 – PC

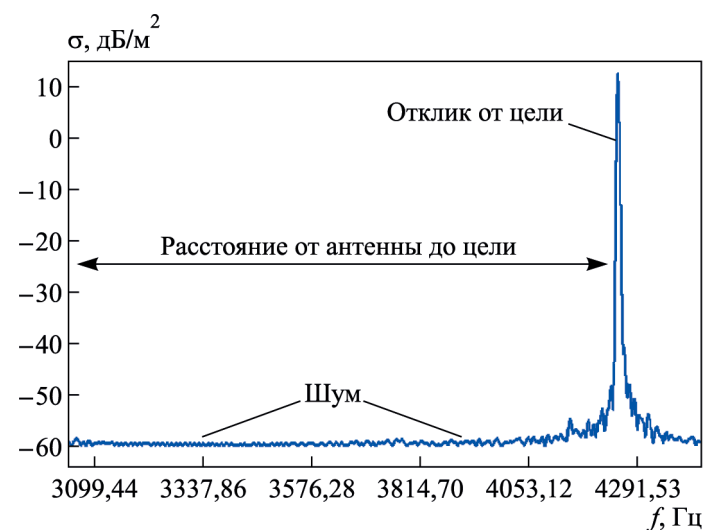


Рис. 2. Дальностный портрет двухгранного уголкового отражателя с квадратными гранями длиной 100 мм

Fig. 2. Range portrait of the two-sided corner reflector with square facets length 100 mm

калибровку приёмно-передающего тракта измерительного канала, которая заключается в измерении радиолокационных характеристик калибровочного объекта;

оценивание ЧХ приёмно-передающего тракта сравнением результатов измерений радиолокационных характеристик калибровочных объектов и их известных расчётных значений;

коррекцию искажений характеристик приёмно-передающего тракта.

В операторном виде уравнение измерительного канала радиолокационной станции (рис. 3) запишем как

$$\dot{e}^R = \dot{R} \{ (\dot{L}_1 \dot{S}_1 \dot{L}_1 + \dot{L}_2 \dot{I} \dot{L}_2) \dot{T} \dot{e}^T \} + \dot{N}, \quad (2)$$

где $\dot{e}^R$ – принятый сигнал; $\dot{R}, \dot{T}$ – матрицы ЧХ приёмного и передающего трактов соответственно; $\dot{L}, \dot{L}'$ – матрицы ЧХ среды распространения; до цели и обратно соответственно $\dot{S}$ – поляризационная матрица ЧХ объекта; $\dot{I}$ – матрица ЧХ пассивных помех (остаточные отражения безэховой экранированной камеры); $\dot{e}^T$ – зондирующий сигнал; $\dot{N}$ – матрица ЧХ шума; индексы 1, 2 – обозначение поляризации сигнала; знак «штрих» обозначает направление распространения сигнала.

В модели радиолокационного канала, учитывающей векторный характер электромагнитного поля, адекватным математическим описанием операторов является применение матриц ЧХ (или импульсных характеристик). Из уравнения (2) следует, что потенциальные технические характеристики радиолокационного измерителя определяются структурой операторов $\dot{R}, \dot{T}$, типом зондирующего сигнала $\dot{e}^T(\omega)$, а также полнотой использования априорных сведений о пассивных помехах (оператор $\dot{I}$), трассе распространения (операторы $\dot{L}$), шуме (оператор $\dot{N}$) и объекте (оператор $\dot{S}$). Оператор $\dot{S}$ отображает параметры преобразования падающего электромагнитного поля в рассеянное. В таком случае адекватным описанием оператора $\dot{S}$ с учётом векторного характера электромагнитного поля является поляризационная матрица частотных характеристик объекта. Соответственно, каждый компонент этой матрицы размерностью 2×2 является комплексной функцией частоты.

В лабораторных условиях (в условиях безэховой экранированной камеры) влиянием трассы распространения на результаты измерения можно пренебречь, поэтому выражение (2) запишем в следующем виде:

$$\dot{e}^R = \dot{R} \dot{S} \dot{e}^T + \dot{R} \dot{I} \dot{e}^T + \dot{N}.$$

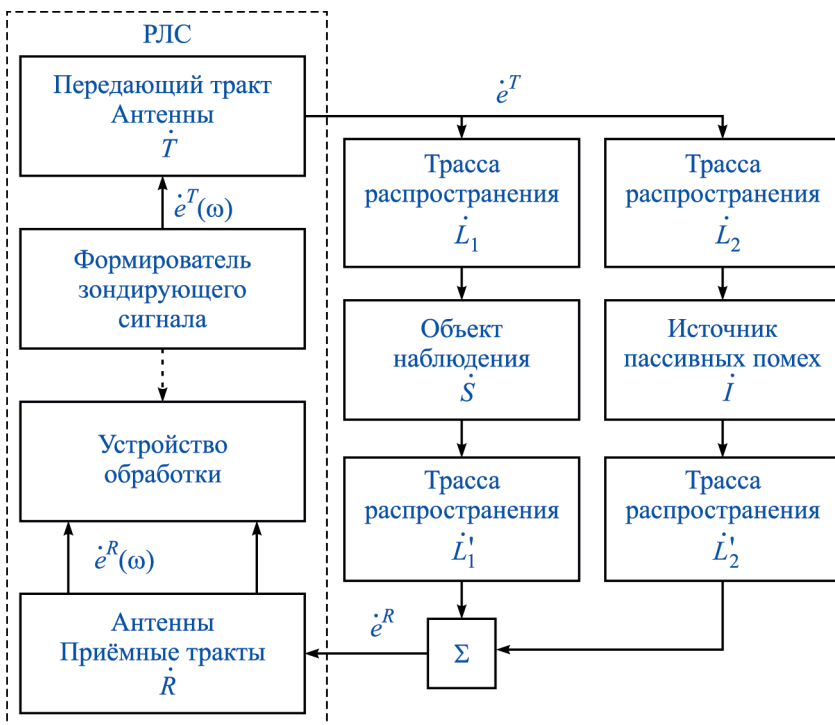


Рис. 3. Схема измерительного канала радиолокационной станции (РЛС)

Fig. 3. Scheme of the radar measuring channel

Для компенсации пассивных фоновых отражений (остаточных отражений безэховой экранированной камеры) регистрируется фоновый сигнал (без объекта измерений). С учётом подавления шума $\dot{N}$ путём когерентного накопления сигнал на выходе АЦП представим как

$$\dot{e}^R = \dot{R} \dot{I} \dot{e}^T.$$

После вычитания фона принятый от цели сигнал запишем в виде

$$\dot{e}^R = \dot{R} \dot{S} \dot{e}^T. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что в результатах измерений неявно присутствует матрица рассеяния цели $\dot{S}$.

Определение элементов матрицы рассеяния $\dot{S}$ называется восстановлением матрицы рассеяния радиолокационного отражателя по данным измерений $\dot{M}$. Его суть состоит в определении элементов матрицы погрешностей $\dot{C}$ по данным калибровочных измерений с последующей коррекцией искажений приёмо-передающего тракта путём обращения матрицы погрешностей:

$$\dot{S} = \dot{C}^{-1} \dot{M}. \quad (4)$$

Выражение (4) является обобщённой постановкой задачи восстановления матрицы рассеяния $\dot{S}$ по данным измерений $\dot{M}$. Рассмотрим процедуру восстановления в случае измерения ЧХ объекта измерительной установкой с линейно поляризованными антеннами.

В качестве калибровочного отражателя, позволяющего вычислить ЧХ восстанавливающего фильтра, используем сферу диаметром 200 мм. Для данного калибровочного отражателя рассчитаем ЧХ и дальностный портрет в частотном диапазоне измерительного канала.

Для контроля восстановления используем калибровочную сферу диаметром 152 мм. Для восстановления ЧХ цели вычислим коэффициенты восстанавливающего фильтра:

$$\dot{h} = \dot{S}_{200} / \dot{M}_{200},$$

где $\dot{h}$ – коэффициенты восстанавливающего фильтра; $\dot{S}_{200}, \dot{M}_{200}$ – соответственно рассчитанные и измеренные значения ЧХ сферы диаметром 200 мм.

Оценим истинную ЧХ сферы диаметром 152 мм методом восстанавливающей фильтрации:

$$\hat{\dot{S}}_{152} = \dot{h} \times \dot{M}_{152}.$$

где $\hat{\dot{S}}_{152}$ – оценка ЧХ сферы диаметром 152 мм; $\dot{M}_{152}$ – измеренные значения ЧХ сферы диаметром 152 мм.

По аналогии с критерием Колмогорова [14] в качестве показателя погрешности оценивания ЧХ использовано максимальное значение модуля разности расчётной $\hat{\dot{S}}_{152}(f)$ и восстановленной $\hat{\dot{S}}_{152}(f)$ ЧХ, приведённое к среднему значению расчётанной ЧХ сферы диаметром 152 мм $\hat{\dot{S}}_{152cp}(f)$:

$$D = \frac{\max(|\dot{S}_{152}(f) - \hat{S}_{152}(f)|)}{|\dot{S}_{152cp}(f)|} \cdot 100.$$

На рис. 4 показаны восстановленная и расчётная ЧХ эффективной площади рассеяния (ЭПР) σ в зависимости от частоты зондирующего сигнала f сферы диаметром 152 мм. Анализ ЧХ показывает, что погрешность восстановления ЧХ сферы в данном случае составила 10,51 %. Указанная погрешность восстановления обусловлена следующими факторами:

- погрешностью изготовления калибровочных отражателей;
- погрешностью численных алгоритмов расчёта ЧХ калибровочных сфер;
- остаточным фоном измерительного стенда после вычитания фонового сигнала и временного стробирования отражателей;
- влиянием шума;
- нелинейностью приёмного тракта;
- нестабильностью генератора ЛЧМ-сигнала и др.

Идентификация геометрической формы локального отражателя. Для идентификации геометрической формы локального отражателя и оценки его геометрических размеров использована модель геометрической теории дифракции, в соответствии с которой при квазиоптическом рассеянии, отражённое электромагнитное поле можно описать следующим выражением [8, 9]:

$$\dot{E}(f) = \sum_{m=1}^M A_m (jf/f_s)^{\alpha_m} \exp(-j4\pi f r_m/c), \quad (5)$$

где f – частота зондирующего сигнала; M – количество локальных отражателей; A_m – амплитуда m -го локального отражателя; r_m – дальность m -го локального отражателя; α_m – показатель степени, определяющий геометрическую форму отражателя; f_s – начальная частота зондирующего сигнала.

Параметр α определяет изменение амплитуды ЧХ с ростом частоты зондирующего сигнала. Типовые значения параметра α : -1 – дифракция на клине; $-0,5$ – дифракция на криволинейной кромке; 0 – отражение от поверхности двойной кривизны; $0,5$ – отражение от поверхности одинарной кривизны; 1 – отражение от плоской пластины или двухгранного уголкового отражателя.

Перепишем выражение (5) для случая дискретной перестройки частоты зондирующего сигнала:

$$\dot{E}(n) = \sum_{m=1}^M A_m (j f_n / f_s)^{\alpha_m} \exp(-j4\pi f_n r_m / c), \quad n \in [0, N-1], \quad (6)$$

где n – номер отсчёта частоты зондирующего сигнала; f_n – частота зондирующего сигнала.

Учтём, что

$$\begin{aligned} f_n^{\alpha_m} &= \exp(\alpha_m \ln(f_n)) = \exp(\alpha_m \ln(f_s f_n / f_s)) = \\ &= \exp(\alpha_m \ln(f_s)) \exp(\alpha_m \ln(1 + n \Delta f / f_s)), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\ln(1 + n \Delta f / f_s) \approx n \Delta f / f_s,$$

где Δf – шаг частоты зондирующего сигнала.

С учётом (7) перепишем выражение (6) следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{E}(n) &= \sum_{m=1}^M [A_m (j/f_s)^{\alpha_m} \exp(\alpha_m \ln(f_s)) \exp(-j4\pi f_s r_m / c)] \times \\ &\times [\exp(\alpha_m \Delta f / f_s) \exp(-j4\pi \Delta f r_m / c)]^n. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) эквивалентно модели затухающих экспонент [8], т. е.

$$\dot{E}(n) = \sum_{m=1}^M \dot{D}_m \dot{p}_m^n,$$

где $\dot{p}_m$ – полюс сигнала;

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_m &= A_m (j/f_s)^{\alpha_m} \exp(\alpha_m \ln(f_s)) \exp(-j4\pi f_s r_m / c), \\ \dot{p}_m &= \exp(\alpha_m \Delta f / f_s) \exp(-j4\pi \Delta f r_m / c). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Параметры $\dot{D}_m$, $\dot{p}_m$ можно количественно оценить с использованием алгоритма Root-MUSIC и метода наименьших квадратов [11–13].

Анализ выражения (8) показывает, что полюс $\dot{p}_m$ содержит информацию об относительной дальности до локального отражателя и о характере изменения амплитуды ЧХ с ростом частоты зондирующего сигнала. Оценка параметра α_m выражается как

$$\hat{\alpha}_m = \frac{(N-1) \ln(|\dot{p}_m|)}{\ln[1 + (N-1) \Delta f / f_s]},$$

где N – количество отсчётов частоты зондирующего сигнала.

При квазиоптическом рассеянии ЭПР сферы рассчитывается по формуле [15, 16]:

$$\sigma_m = \pi r^2 \Rightarrow \hat{r} = \sqrt{\sigma_m / \pi}, \quad (10)$$

где σ_m – ЭПР сферы; $\hat{r}$ – оценка радиуса сферы.

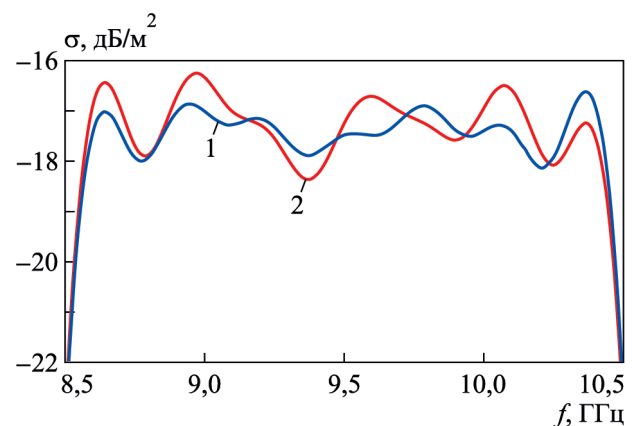


Рис. 4. Расчётная (1) и восстановленная (2) частотные зависимости ЭПР сферы диаметром 152 мм

Fig. 4. Calculated (1) and recovered (2) frequency dependence of the sphere RCS with a diameter 152 mm

Для исследования влияния погрешности оценивания ЧХ на оценку параметра α для отражателя сферической формы проведён статистический расчёт методом Монте-Карло. К частотной характеристике пассивных помех $\hat{I}$ аддитивно добавляется белый шум, компенсируются систематические погрешности измерительного канала, восстанавливается ЧХ сферы диаметром 152 мм, вычисляется погрешность оценивания ЧХ и оценивается параметр $\hat{\alpha}$. Результаты оценки сохраняются в персональном компьютере. Для каждого фиксированного соотношения сигнал–шум проведено 5000 статистических испытаний. Результаты испытаний приведены на диаграмме Тьюки, которая показывает зависимость статистических характеристик погрешности оценивания параметра α от погрешности оценивания частотной характеристики цели D (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что оценку параметра α можно использовать для идентификации геометрической формы радиолокационных отражателей при погрешности оценивания ЧХ не более 20 %. Для измеренной ЧХ (см. рис. 4) параметр $\hat{\alpha} = 0,029$. Зная опорные значения параметра α , идентифицируем геометрическую форму отражателя как сферу. Среднее значение ЭПР в полосе частот 0,018 м². Оценка радиуса сферы с использованием выражения (10) составила $\hat{r} = 0,76$ м, погрешность оценки радиуса сферы составляет 0,13 %.

Закключение. Результаты апробации предложенной методики свидетельствуют о возможности её применения для компенсации систематических погрешностей радиолокационного широкополосного измерительного канала. Достижимая при этом погрешность восстановления частотной характеристики объекта позволяет идентифицировать геометрическую форму локальных отражателей и оценивать их геометрические размеры.

Зависимость оценки параметра α от погрешности компенсации систематических погрешностей измерительного канала необходимо учитывать при принятии решения о целесообразности реализации алгоритмов идентификации геометрической формы локальных отражателей в конкретной радиолокационной системе.

Необходимым условием данного подхода является квазиоптический характер рассеяния. Для исследованных объектов

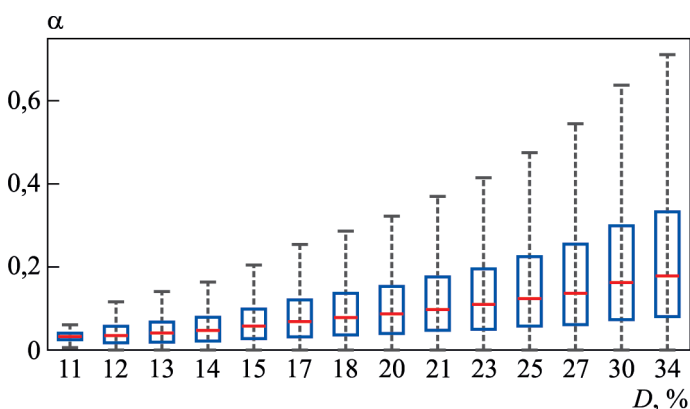


Рис. 5. Зависимость оценки параметра α от показателя D систематической погрешности измерительного канала

Fig. 5. Dependence of systematic errors compensation in the measuring channel on the parameter α estimation

и указанных условий измерений погрешность оценивания радиуса сферы не превышает 5 % и обеспечивает решение ряда прикладных задач, таких как радиолокационное распознавание целей и удалённый контроль технического состояния объектов.

Список литературы

1. Eaves J., Reedy E., *Principles of Modern Radar*, Springer US, 2012, 720 p.
2. Skolnik M., *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
3. Jankiraman M., *FMCW Radar Design*, Artech House, 2018, 390 p.
4. Çetiner R., Çetintepe Ç., Demir Ş., Hizal A., *Prospects of FMCW-based frequency diverse array radar*, *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 11, no. 21, pp. 7299–7303. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.0458>
5. Kang M., Kim B., Kim H., Park S., *A Study on Pulsed-LFM and Pulsed-NLFM waveforms for Radar systems*, 2019 *International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, Jeju Island, Korea (South), 2019, pp. 983–985. <https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8940010>
6. Klotz M., Rohling H., *24 GHz Radar Sensors for Automotive Applications*, *International Conference on Microwaves and Radar*, MIKON2000, Wroclaw, Poland, 2000, pp. 359–362. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2000.913944>
7. Rohling H., Meinecke M., Mende R., *A 77 GHz Automotive Radar System for AICC Applications*, *International Conference on Microwaves and Radar*, Krakow, Poland, 1998, pp. 273–277. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2000.851845>
8. Junya L., Yue L., *Data Augmentation Based on Attributed Scattering Centers to Train Robust CNN for SAR ATR*, *Access IEEE*, 2019, vol. 7, pp. 25459–25473. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900522>
9. Zou Y., Gao X., *A high precision GTD parameter estimation method*, *8th International Congress on Image and Signal Processing*, Shenyang, China, 14–16 October, 2015, pp. 1220–1224. <https://doi.org/10.1109/CISP.2015.7408067>
10. Yan H., Sheng L., *Monostatic GTD Model for Double Scattering due to Specular Reflections or Edge Diffractions*, *IEEE International Conference on Computational Electromagnetics*, Chengdu, China, 26–28 March, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/COMPEN.2018.8496539>
11. Dai D., Zhang J., *Superresolution Polarimetric ISAR Imaging Based on 2D CP-GTD Model*, *Journal of Sensors*, 2015, vol. 1, no. 11, pp. 4–16. <https://doi.org/10.1155/2015/293141>
12. Wang J., Shaoming E., *A GTD model and state space approach based method for extracting the UWB scattering center of moving target*, *Science China*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 182–196. <https://doi.org/10.1007/s11432-010-4137>
13. Cong Y., Chen B., *Nonparametric Bayesian Attributed Scattering Center Extraction for Synthetic Aperture Radar Targets*, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, vol. 64, no. 18, pp. 4723–4736. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2569463>
14. Barrio D., Matrán C., *On approximate validation of models: a Kolmogorov–Smirnov-based approach*, *TEST*, no. 1 2019, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1007/s11749-019-00691-1>

15. Knott E., Shaeffer J., Tuley M., *Radar Cross Section Measurements*, SciTech Publishing, 2006, 546 p.
16. Knott E., Shaeffer J., Tuley M., *Radar Cross Section*, Sci-Tech Publishing, 2004, 611 p.

References

1. Eaves J., Reedy E., *Principles of Modern Radar*, Springer US, 2012, 720 p.
2. Skolnik M., *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 2008, 1328 p.
3. Jankiraman M., *FMCW Radar Design*, Artech House, 2018, 390 p.
4. Çetiner R., Çetintepe Ç., Demir Ş., Hizal A., *Prospects of FMCW-based frequency diverse array radar*, *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 11, no. 21, pp. 7299-7303. <https://doi.org/10.1049/joe.2019.0458>
5. Kang M., Kim B., Kim H., Park S., *A Study on Pulsed-LFM and Pulsed-NLFM waveforms for Radar systems*, 2019 *International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, Jeju Island, Korea (South), 2019, pp. 983–985. <https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8940010>
6. Klotz M., Rohling H., *24 GHz Radar Sensors for Automotive Applications*, *International Conference on Microwaves and Radar*, MIKON2000, Wroclaw, Poland, 2000, pp. 359–362. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2000.913944>
7. Rohling H., Meinecke M., Mende R., *A 77 GHz Automotive Radar System for AICC Applications*, *International Conference on Microwaves and Radar*, Krakow, Poland, 1998, pp. 273–277. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2000.851845>
8. Junya L., Yue L., *Data Augmentation Based on Attributed Scattering Centers to Train Robust CNN for SAR ATR*, *Access IEEE*, 2019, vol. 7, pp. 25459–25473. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2900522>
9. Zou Y., Gao X., *A high precision GTD parameter estimation method*, 8th *International Congress on Image and Signal Processing*, Shenyang, China, 14–16 October, 2015, pp. 1220–1224. <https://doi.org/10.1109/CISP.2015.7408067>
10. Yan H., Sheng L. *Monostatic GTD Model for Double Scattering due to Specular Reflections or Edge Diffractions*, *IEEE International Conference on Computational Electromagnetics*, Chengdu, China, 26–28 March, 2018, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/COMPEM.2018.8496539>
11. Dai D., Zhang J., *Superresolution Polarimetric ISAR Imaging Based on 2D CP-GTD Model*, *Journal of Sensors*, 2015, vol. 1, no. 11, pp. 4–16. <https://doi.org/10.1155/2015/293141>
12. Wang J., Shaoming E., *A GTD model and state space approach based method for extracting the UWB scattering center of moving target*. *Science China*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 182–196. <https://doi.org/10.1007/s11432-010-4137>
13. Cong Y., Chen B., *Nonparametric Bayesian Attributed Scattering Center Extraction for Synthetic Aperture Radar Targets*, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, vol. 64, no. 18, pp. 4723–4736. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2569463>
14. Barrio D., Matrán C., *On approximate validation of models: a Kolmogorov–Smirnov-based approach*, *TEST*, no. 1 2019, pp. 23–28. <https://doi.org/10.1007/s11749-019-00691-1>
15. Knott E., Shaeffer J., Tuley M., *Radar Cross Section Measurements*, SciTech Publishing, 2006, 546 p.
16. Knott E., Shaeffer J., Tuley M., *Radar Cross Section*, Sci-Tech Publishing, 2004, 611 p.

Дата поступления: 23.03.2020.

Дата принятия: 14.04.2020.

Influence of accuracy estimation of frequency characteristics of radar targets on the results of identifying the geometric shape of local reflectors

Vladimir V. Neelov, Sergey E. Shaldaev

A. F. Mozhaysky's Military-space Academy, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: lopedevego@yandex.ru, shs99@yandex.ru

The issues of introducing broadband technologies in civil and special purpose radar systems are considered. The popularity of these technologies for solving a number of practical problems determines the relevance of research related to a detailed analysis of long-range portraits of observed objects at a new qualitative level. The influence of the systematic error of the measuring channel on the reliability of the identification of the geometric shape of the local reflectors of the observation object using the results of broadband radar sounding is studied. The created broadband radar measuring channel with linear frequency modulation of the signal based on the method of generalized heterodyning is described. A technique is proposed for compensating systematic measurement errors for a channel of a given type using calibration spheres. The systematic error in measuring the frequency characteristics of the sphere is estimated, and an error indicator for estimating the frequency characteristics of objects is proposed. The dependence of the statistical indicators of the identification results of the geometric shape of local reflectors on the specified indicator is given. The possibility of identifying the geometric shape of local reflectors of objects by the parameters of their frequency characteristics has been experimentally confirmed. The results can be used to assess the reliability of identifying the geometric shape of local reflectors at the stage of calibration of the measuring channel, as well as to decide on the feasibility of implementing algorithms for identifying the geometric shape of local reflectors on an existing radar.

Key words: frequency characteristics, identifying the geometric shape of radar target, measurement channel calibration, wideband measurement.

Диэлектрические свойства эритроцита человека

В. М. Генералов¹, А. С. Сафатов¹, М. В. Кручинина², А. А. Громов²,
Г. А. Буряк¹, К. В. Генералов¹, В. Н. Кручинин³

¹Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, р. п. Кольцово, Новосибирская обл., Российская Федерация, e-mail: general@vector.nsc.ru, safatov@vector.nsc.ru, buryak@vector.nsc.ru, gkv@vector.nsc.ru

²Научно-исследовательский институт терапии и профилактической медицины – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: kruchmargo@yandex.ru, gromov.center@rambler.ru

³Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, Сибирское отделение Российской академии наук, Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: vladd.kruch@yandex.ru

Исследованы диэлектрические свойства эритроцита. Приведены экспериментальная методика и результаты измерения диэлектрических свойств отдельных эритроцитов человека. Методика обоснована теоретически. Установлено, что значения комплексной диэлектрической проницаемости эритроцита, электрической ёмкости, тангенса угла диэлектрических потерь остаются практически постоянными, несмотря на значительные изменения удельной проводимости и содержания NaCl в клеточной суспензии. Эти значения отражают стабильность исследованных параметров эритроцитов в условиях изменения в широких пределах среды, в которой клетки находятся. Комплексная диэлектрическая проницаемость клетки, тангенс диэлектрических потерь клетки – перспективные параметры для объективной диагностики заболеваний человека. Введение измерений диэлектрической проницаемости клетки и тангенса диэлектрических потерь клетки в медицинскую практику, вероятно, позволит характеризовать процесс индивидуальной клеточной саморегуляции более детально.

Ключевые слова: эритроцит, диэлектрическая проницаемость, электрическая ёмкость, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрофорез.

Введение. Одна из фундаментальных функций клетки, приобретённая в процессе эволюции, – непрерывная адаптация к внешним условиям [1–3]. Клетка чутко реагирует на изменения внешних условий. В ответ на воздействия со стороны вирусов, бактерий, ионной силы клеточной суспензии изменяются водно-солевой баланс, трансмембранный потенциал, морфология и другие свойства клетки [4–9]. Важнейшим свойством совокупности клеток является их гетерогенность (неоднородность). Клетки отличаются по множеству параметров в одних и тех же условиях, например по распределению эритроцитов по радиусу, объёму [10]. Утрата адаптации клеток к внешним условиям, отсутствие гетерогенности в клеточной популяции приводит к прекращению их существования [1].

Клетка обладает диэлектрической проницаемостью, зависящей от совокупности физико-химических свойств (проводимости, плотности, вязкости, изотропности, агрегатного состояния, температуры) сложно структурированных мембран, цитоплазмы, эндоплазматической сети, поляризации свободных и связанных ионов, белков и др. [2, 6, 10, 12]. В случае утраты клеткой физической и биологической сущности, например, в случае разрыва мембраны с последующей диффузией внутриклеточного содержимого во внешнюю

среду, диэлектрическая проницаемость, как показатель единого целого клетки, теряет смысл.

Диэлектрические свойства вещества, их дисперсия в широком диапазоне частот используются в фундаментальных исследованиях, при разработке практических технологий, приборов, конструкций и т. д. [13]. Однако в большинстве биологических исследований оценивается диэлектрическая проницаемость тканей или клеточной суспензий. Причиной такого подхода является микрометровый размер клетки. Данное обстоятельство определяет инженерные трудности в части создания конструкции измерительных камер микрометрового масштаба, что исключает возможность использовать широко известные приборы и методы для измерения диэлектрической проницаемости вещества в гораздо больших объёмах. Электрофорез и диэлектрофорез – основа для изучения диэлектрической проницаемости эритроцитов [14, 15]. Исследование диэлектрических свойств клетки открывает широкие возможности в оценке различных патологических состояний живых организмов, в разработке новых технологий в области медицины, вирусологии, биотехнологии [15].

Цель настоящей работы – исследование стабильности диэлектрических свойств эритроцита в ответ на изменения условий внешней среды.

Материалы и методы. Для определения относительной диэлектрической проницаемости эритроцита использовали кровь условно здоровых обследуемых с одобрения Этического комитета Научно-исследовательского института терапии и профилактической медицины (протокол заседания от 01.11.2016). Все обследованные подписали информированное согласие на участие в работе в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения медицинских исследований с участием людей в качестве субъектов исследования» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утверждёнными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266.

Кровь объёмом 2 мл забирали из вены вакутейнерами в 3,7 % цитратный буфер в соотношении 9:1, через 1 час кровь вносили в 0,3 М раствор сахарозы (температура 22 °С, $pH=7,4$) в соотношении 1:10, 1:20, 1:40, 1:60. Сразу после разведения измеряли удельное электрическое сопротивление и температуру клеточной суспензии. Разведённую суспензию эритроцитов помещали в измерительную ячейку измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) и накрывали прозрачным покровным стеклом (рис. 1). Оптическую систему микроскопа фокусировали на клетках. Включали видеокамеру в режим записи. Экспериментатор с помощью микроскопа наблюдал характер течения потока суспензии эритроцитов между электродами измерительной ячейки. Как только прекращалось течение суспензии и эритроциты приходили в состояние покоя, т. е. не испытывали поступательное движение, на электроды Э1, Э2 по команде экспериментатора с генератора подавали зондирующее гармоническое напряжение (без постоянной составляющей). Напряжение на электродах контролировали осциллографом. В электрическом поле эритроциты между электродами приходили в поступательное движение. Управляя частотой и напряжением на электродах, эритроциты подводили в пространство между электродами и удерживали их там с помощью неоднородного переменного электрического поля. После того как отдельно выбранный эритроцит оказывался между электродами в неподвижном состоянии, измеряли его равновесную частоту с помощью частотомера.

На рис. 2. представлена функциональная схема ИВК для определения комплексной диэлектрической проницаемости биологической клетки в суспензии. ИВК включает следующие приборы и устройства:

компьютер для регистрации потока видеоизображения и обработки потока информации от видеокамеры, расчёта характеристик электрического поля в измерительной

камере, хранения видеофайлов и результатов расчёта параметров клетки, управления работой (включение/выключение) видеозаписи по заданной программе;

осциллограф Aktakom ADS2111MV для регистрации переменного напряжения на электродах измерительной ячейки;

кондуктометр, термометр EC/TDS/Temp COM-100 0–50 °С для измерения удельного сопротивления и температуры клеточной суспензии;

генератор переменного напряжения ГЗ-112/1, обеспечивающий управляемую генерацию переменного напряжения U с заданной амплитудой и частотой в ручном режиме;

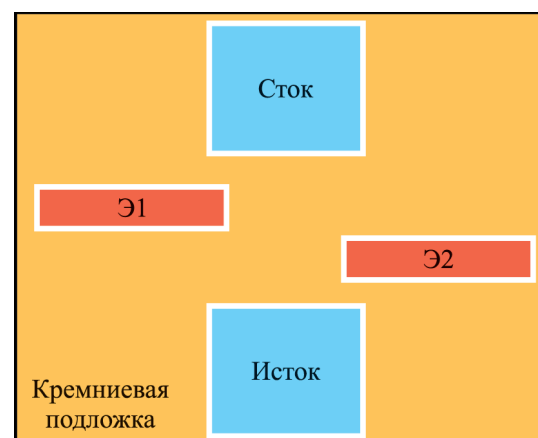


Рис. 1. Измерительная ячейка:
Э1, Э2 – электроды для диэлектрфореза

Fig. 1. Measuring device:
E1, E2 – electrodes for dielectrophoresis

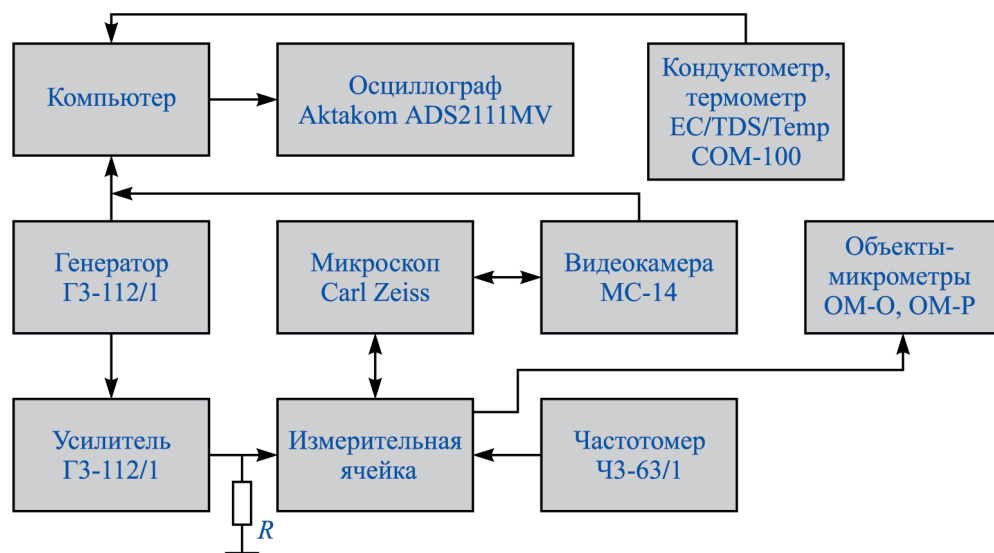


Рис. 2. Измерительно-вычислительный комплекс для измерения диэлектрической проницаемости клетки в клеточной суспензии

Fig. 2. Measuring and computing complex for measuring the cell permittivity in a cell suspension

микроскоп Carl Zeiss для наблюдения за клеткой и её реакцией в измерительной камере в ответ на действие НПЭП; комплекс визуализации (видеокамера) MC-14 для трансляции потока видеоизображения клетки (динамика движения в измерительной камере) через микроскоп в компьютер;

объекты-микрометры OM-O, OM-P для калибровки ИВК и измерения линейных размеров клетки, расстояния между электродами измерительной камеры;

усилитель переменного напряжения ГЗ-112/1, обеспечивающий генерацию переменного напряжения U с заданной амплитудой от генератора ГСПФ-053;

измерительную ячейку на кремневой подложке с металлическими электродами Э1, Э2, между которыми расположена измерительная камера. Ячейку изготавливали методом стандартной оптической фотолитографии (см. рис. 1);

частотомер ЧЗ-63/1 для измерения равновесной частоты клетки в неоднородном переменном электрическом поле измерительной ячейки.

Измерение действительной части относительной диэлектрической проницаемости клеточной среды $\varepsilon_{\text{ср}}$ осуществляли прецизионным анализатором компонентов WK6430B

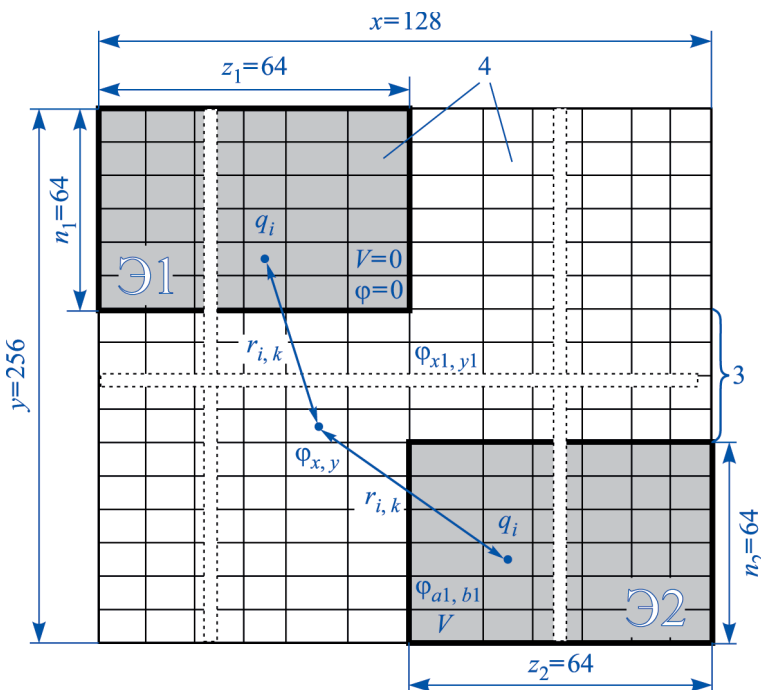


Рис. 3. Модель измерительной камеры:

Э1, Э2 – электроды для диэлектрофореза; 3 – щель между электродами измерительной камеры; 4 – виртуальные ячейки (в плоскости координат n, z), образующие условную сеть ячеек на поверхности электродов и в измерительной камере (в плоскости координат x, y) для расчёта параметров электрического поля

Fig. 3. Model of the measuring chamber:

E1, E2 – electrodes for dielectrophoresis; 3 – gap between the electrodes is a measuring chamber; 4 – virtual boxes are network on the surface of the electrodes (coordinates n, z) and in the measuring chamber (coordinates x, y) for calculating the parameters of the electric field

(Wayne Kerr Electronics, Великобритания). Базовая погрешность измерения сопротивления анализатором составляет не более 0,02 %. Суспензию клеток перед измерением размещали в стеклянной измерительной трубке в форме цилиндра длиной 77,4 мм и радиусом 4 мм.

Результаты и обсуждение. Теоретическая часть. Сила $F_{\text{кл}}$, которая приводит клетку в поступательное движение в НПЭП, равна нулю при условии равенства комплексных величин $\varepsilon_{\text{ср}}^* = \varepsilon_{\text{кл}}^*$ [15]:

$$F_{\text{кл}} = 2\pi\varepsilon_{\text{ср}}\varepsilon_0 r_{\text{кл}}^3 \left(\frac{\varepsilon_{\text{кл}}^* - \varepsilon_{\text{ср}}^*}{\varepsilon_{\text{кл}}^* + 2\varepsilon_{\text{ср}}^*} \right) \nabla E_{\text{ср}}^2; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{кл}}^* = \varepsilon_{\text{кл}} + i(\rho_{\text{кл}}\omega\varepsilon_0)^{-1};$$

$$\varepsilon_{\text{ср}}^* = \varepsilon_{\text{ср}} + i(\rho_{\text{ср}}\omega\varepsilon_0)^{-1},$$

где $\pi = 3,14$ – постоянная величина; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – диэлектрическая проницаемость среды (суспензии); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая постоянная; $r_{\text{кл}}$ – радиус клетки; $\varepsilon_{\text{кл}}^*, \varepsilon_{\text{ср}}^*$ – комплексная диэлектрическая проницаемость соответственно клетки и среды; $\rho_{\text{кл}}, \rho_{\text{ср}}$ – удельное сопротивление соответственно клетки и среды; $\nabla E_{\text{ср}}^2$ – градиент квадрата напряжённости электрического поля среды.

Момент силы, который приводит клетку во вращательное движение вокруг собственной оси в НПЭП, равен нулю при условии равенства комплексных величин $\varepsilon_{\text{ср}}^* = \varepsilon_{\text{кл}}^*$ [15]:

$$\langle H(t) \rangle = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{кл}}r_{\text{кл}}^3 \left(\frac{\varepsilon_{\text{кл}}^* - \varepsilon_{\text{ср}}^*}{\varepsilon_{\text{кл}}^* + 2\varepsilon_{\text{ср}}^*} \right) E_{\text{ср}}^2; \quad (2)$$

где выражение в скобках – фактор Клаузиуса–Мосотти.

Таким образом, в случае равенства $\varepsilon_{\text{ср}}^* = \varepsilon_{\text{кл}}^*$, поступательное и вращательное движения клетки в НПЭП прекращаются. Частота, на которой поступательное и вращательное движения клетки в НПЭП прекращаются, называется равновесной ω_p [1]. Это равенство позволяет измерить диэлектрические свойства клеточной суспензии и перенести их величины на аналогичные параметры наблюдаемой клетки на равновесной частоте. Такой подход ценен тем, что клеточную суспензию можно подготовить в объёме, достаточном для измерения её диэлектрической проницаемости, удельного сопротивления любым доступным методом (замещения, мостовым, нулевого биения). Для определения комплексной диэлектрической проницаемости отдельно наблюдаемой клетки $\varepsilon_{\text{кл}}^*$ согласно (1), (2) необходимо:

измерить действительную относительную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{\text{ср}}$ и удельное сопротивление $\rho_{\text{ср}}$ клеточной суспензии на равновесной частоте $\omega_p = 2\pi f_p$, где f_p – циклическая равновесная частота;

рассчитать минимую относительную диэлектрическую проницаемость среды

$$\varepsilon'_{cp} = i(\rho_{cp} \omega_p \varepsilon_0)^{-1}; \quad (3)$$

рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость клетки согласно выражению

$$\varepsilon_{кл}^* = \sqrt{\varepsilon_{cp}^2 + \left(\frac{1}{\rho_{cp} \omega_p \varepsilon_0} \right)^2}. \quad (4)$$

Потенциал, напряжённость и градиент напряжённости электрического поля между электродами в измерительной камере рассчитывали на основе принципа суперпозиции. Модель измерительной камеры представлена на рис. 3. Полный потенциал поля $\varphi_{x,y}$ для каждой виртуальной ячейки в камере рассчитывали из решения уравнения:

$$\varphi_{x,y} = \sum_{i=(x,y)}^{i=(n,z)} \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_m \varepsilon_0 r_{i,k}},$$

где $r_{i,k}$ – расстояние между центрами ячеек i и k , ячейка i расположена на поверхности электрода, ячейка k – в измерительной камере; n – полное число ячеек на поверхности двух электродов; q_i – заряд в ячейке i , выраженный в числе элементарных зарядов электродов ($q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

В процессе расчёта число зарядов (электронов) в ячейках q_i увеличивали до достижения равенств:

$$V = \varphi_{x1,y1} - \varphi_{a1,b1};$$

$$V = \varphi_{x1,y1} - 0,$$

где V – напряжение генератора на электродах (рис. 3); $\varphi_{x1,y1}$ – потенциал поля в ячейке $x=1, y=1$ измерительной камеры; $\varphi_{a1,b1}$ – потенциал поля в ячейке на поверхности электрода с координатами $a=1, b=1$.

Значения компонент напряжённости электрического поля для ортогональных координат x, y рассчитывали следующим образом:

$$E_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; E_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y},$$

а квадрат полной напряжённости электрического поля – как сумму квадратов

ортогональных компонент напряжённости электрического поля:

$$E_{cp}^2 = E_x^2 + E_y^2.$$

Градиент квадрата напряжённости электрического поля определяли как

$$\nabla E_{cp}^2 = \frac{\partial E_{cp}^2}{\partial x} i + \frac{\partial E_{cp}^2}{\partial y} j.$$

Напряжённость и градиент квадрата напряжённости электрического поля в измерительной камере не превосходили $E = 10^5$ В/м и $\nabla E^2 = 10^{12}$ В²/м³.

Экспериментальная часть. Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{кл}^*$ эритроцита человека представлены в таблице. Ёмкость $C_{кл, cp}$, сопротивление $R_{кл, cp}$, тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}(\gamma_{кл, cp})$ сферической клетки (сфероцита) и клеточной суспензии, равной ей по объёму, рассчитаны соответственно по формулам

$$C_{кл, cp} = (2\pi f_p R_{кл})^{-1}; \quad (5)$$

$$R_{кл, cp} = 2\rho_{кл} / (\pi r_{кл}); \quad (6)$$

$$\text{tg} \gamma_{кл, cp} = \varepsilon'_{кл, cp} / \varepsilon_{кл, cp}. \quad (7)$$

Анализ экспериментальных результатов показал, что с увеличением содержания соли NaCl в клеточной суспензии возрастает циклическая равновесная частота f_p , но уменьшается удельное сопротивление клетки и клеточной суспензии $\rho_{кл}, \rho_{cp}$. При этом значение комплексной диэлектрической

Комплексная диэлектрическая проницаемость эритроцита человека (радиус эритроцита $3,2 \cdot 10^{-6}$ м)

Параметр	Содержание соли NaCl в клеточной суспензии, мМ				Примечание
	2,5	4,0	8,0	15,0	
f_p , Гц	$1,6 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	Измерена экспериментально ИВК Ч-63/1
$\rho_{кл}, \rho_{cp}$, Ом·м	44	26	13	7	ρ_{cp} измерена экспериментально кондуктометром EC/TDS/Temp COM-100
$\varepsilon_{кл}, \varepsilon_{cp}$, б/р	79	79	79	79	ε_{cp} измерена экспериментально анализатором компонентов 6430B
$\varepsilon'_{кл}, \varepsilon'_{cp}$, б/р	$2,6 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	Рассчитана по (3)
$\varepsilon_{кл}^*, \varepsilon_{cp}^*$, б/р	$2,6 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	Рассчитана по (4)
$C_{кл}, C_{cp}$, Ф	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	Рассчитана по (5)
ε_0 , Ф/м	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	Справочная величина [13]
$R_{кл}, R_{cp}$, Ом	$8,8 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	Рассчитана по (6) [18]
$\text{tg}(\gamma_{кл, cp})$, б/р	32	33	32	30	Рассчитана по (7)

проницаемости $\varepsilon_{\text{кл}}^*$ с учётом погрешности измерения практически неизменно. Известно, действительная ε и мнимая ε' составляющие диэлектрической проницаемости описывают физический процесс электрической поляризации, диссипации энергии в любом диэлектрике. Относительно большое значение тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\gamma = 32$ косвенно характеризует количество теплоты, выделяемое в единицу объёма диэлектрика за единицу времени, и указывает, что в клеточном объёме накопление энергии, а также резонансные явления в частотном диапазоне $(1,6-11) \cdot 10^6$ Гц исключены.

Приведённые в таблице параметры клетки $\text{tg}\gamma_{\text{кл}} = 32$, $\varepsilon_{\text{кл}}$, $\varepsilon_{\text{кл}}'$ практически не зависят от циклической равновесной частоты f_p . Как отмечено в [18], даже небольшие изменения в свойствах клетки могут приводить к развитию патологий организма. Наблюдаемая стабильность диэлектрических свойств эритроцита, вероятно, связана с процессами клеточной саморегуляции, структурами целого организма, а также гомеостазом [17]. Введение измерений $\text{tg}\gamma_{\text{кл}}$, $\varepsilon_{\text{кл}}$, $\varepsilon_{\text{кл}}^*$ эритроцита в медицинскую практику позволит характеризовать процесс индивидуальной клеточной саморегуляции более детально и стать основой новой объективной диагностики патологии крови.

Заключение. Диэлектрические параметры и их дисперсия в широком диапазоне частот – фундаментальные характеристики эритроцитов. Комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{кл}}^*$ тангенс диэлектрических потерь $\text{tg}\gamma_{\text{кл}}$ характеризуют стабильность эритроцитов и являются перспективными параметрами для объективной диагностики способности организма сохранять постоянство внутреннего состояния в результате скоординированных реакций.

Для использования рассмотренных диэлектрических параметров на практике необходимы клинические исследования, а также новые разработки в области инструментальной биомедицинской электроники.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ (грант № 18-29-02091\18) и Государственного задания ГЗ-11/16 ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора.

Список литературы

1. Brito M. A., Silva R. F., Brites D., *Cell Biol. Toxicol.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1023/A:1015563704551>
2. Gimsa J., Schnelle T., Zechel G., Glaser R., *Biophys. J.*, 1994, vol. 66, no. 4, 1244–1253. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(94\)80908-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(94)80908-7)
3. Krueger M., Thom F., *Biophys. J.*, 1997, vol. 73, no. 5, pp. 2653–2666. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(97\)78294-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(97)78294-8)
4. Engelhardt H., Gaub H., Sackmann E., *Nature*, 1984, vol. 307, pp. 378–380. <https://doi.org/10.1038/307378a0>
5. Donath E., Pastushenko V., *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 1980, vol. 7, no. 1, pp. 31–40. [https://doi.org/10.1016/0302-4598\(80\)87029-2](https://doi.org/10.1016/0302-4598(80)87029-2)
6. Kononenko V. L., Shimkus J. K., *Bioelectrochemistry*, 2002, vol. 55, no. 1-2, pp. 97–100. [https://doi.org/10.1016/S1567-5394\(01\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S1567-5394(01)00129-3)
7. Hughes M. P., Morgan H., Rixon F. J., *Biochim. Biophys. Acta*, 2002, vol. 1571, no. 1, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(02)00161-7)

8. Gascoyne P., Pethig R., Satayavivad J., Becker F. F., Ruchirawat M., *Biochim. Biophys. Acta*, 1997, vol. 1323, no. 2, pp. 240–252. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(96\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(96)00191-5)
9. Ratanachoo K., Gascoyne P. R., Ruchirawat M., *Biochim. Biophys. Acta*, 2002, vol. 1564, no. 2, pp. 449–458. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(02\)00494-7](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(02)00494-7)
10. Рубцова Л. Ю., Потолицына Н. Н., Монгалев Н. П. Значение изменения диаметра клеток крови у спортсменов при физической нагрузке // Сибирский журнал наук о жизни и сельском хозяйстве. 2017. Т. 9. № 2. С. 121–141. <https://doi.org/10.12731/wsd-2017-2-121-141>
11. Kinosita K. Jr., Tsong T. Y., *Biochim. Biophys. Acta*, 1977, vol. 471, no. 2, pp. 227–242. [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(77\)90252-8](https://doi.org/10.1016/0005-2736(77)90252-8)
12. Gopala K. G., Anwar A. A. K., Mohan D. R., Ahmad A., *J. Biomed. Eng.*, 1989, vol. 11, no. 5, pp. 375–380. [https://doi.org/10.1016/0141-5425\(89\)90099](https://doi.org/10.1016/0141-5425(89)90099)
13. Ахадоев Ю. Х. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Национальное стандартное справочное руководство по обслуживанию данных. М.: Стандарты, 1972. 412 с.
14. Харамоненко С. С., Ракитянская Д. Д. Электрофорез клеток крови в норме и патологии. Минск, 1974. 143 с.
15. Hughes M. P., *Nanoelectromechanics in Engineering and biology*, Boca Raton, London, N. Y., Washington, D.C., CRC PRESS Boca Raton, 2003, 320 p.
16. Kaisti M., *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, no. 98, pp. 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.07.010>
17. Recordati G., Bellini T. G., *Exp. Physiol.*, 2004, vol. 89, no. 1, pp. 27–38. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2003.002633>
18. Генералов В. М., Кручинина М. В., Дурыманов А. Г., Медведев А. А., Сафатов А. С., Сергеев А. Н., Буряк Г. А., Курилович С. А., Громов А. А. Диэлектрофорез в диагностике инфекционных и неинфекционных заболеваний. Новосибирск: Церис, 2011. 172 с.

References

1. Brito M. A., Silva R. F., Brites D., *Cell Biol. Toxicol.*, 2002, vol. 18, no. 3, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1023/A:1015563704551>
2. Gimsa J., Schnelle T., Zechel G., Glaser R., *Biophys. J.*, 1994, vol. 66, no. 4, 1244–1253. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(94\)80908-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(94)80908-7)
3. Krueger M., Thom F., *Biophys. J.*, 1997, vol. 73, no. 5, pp. 2653–2666. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(97\)78294-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(97)78294-8)
4. Engelhardt H., Gaub H., Sackmann E., *Nature*, 1984, vol. 307, pp. 378–380. <https://doi.org/10.1038/307378a0>
5. Donath E., Pastushenko V., *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 1980, vol. 7, no. 1, pp. 31–40. [https://doi.org/10.1016/0302-4598\(80\)87029-2](https://doi.org/10.1016/0302-4598(80)87029-2)
6. Kononenko V. L., Shimkus J. K., *Bioelectrochemistry*, 2002, vol. 55, no. 1-2, pp. 97–100. [https://doi.org/10.1016/S1567-5394\(01\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S1567-5394(01)00129-3)
7. Hughes M. P., Morgan H., Rixon F. J., *Biochim. Biophys. Acta*, 2002, vol. 1571, no. 1, pp. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(02\)00161-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(02)00161-7)
8. Gascoyne P., Pethig R., Satayavivad J., Becker F. F., Ruchirawat M., *Biochim. Biophys. Acta*, 1997, vol. 1323, no. 2, pp. 240–252. [https://doi.org/10.1016/S0005-2736\(96\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0005-2736(96)00191-5)

9. Ratanachoo K., Gascoyne P. R., Ruchirawat M., *Biochim. Biophys. Acta*, 2002, vol. 1564, no. 2, pp. 449–458.
[https://doi.org/10.1016/s0005-2736\(02\)00494-7](https://doi.org/10.1016/s0005-2736(02)00494-7)
 10. Rubtsova L. Yu., Potolitsyna N. N., Mongalev N. P., *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 121–141.
<https://doi.org/10.12731/wsd-2017-2-121-141>
 11. Kinoshita K. Jr., Tsong T. Y., *Biochim. Biophys. Acta*, 1977, vol. 471, no. 2, pp. 227–242.
[https://doi.org/10.1016/0005-2736\(77\)90252-8](https://doi.org/10.1016/0005-2736(77)90252-8)
 12. Gopala K. G., Anwar A. A. K., Mohan D. R., Ahmad A., *J. Bio-med. Eng.*, 1989, vol. 11, no. 5, pp. 375–380.
[https://doi.org/10.1016/0141-5425\(89\)90099](https://doi.org/10.1016/0141-5425(89)90099)
 13. Akhadow Y. H. *Dielectric Properties of Pure Fluids. National Standard Reference Data Service Guide*, Moscow, Standards, 1972, 412 p. (in Russian).
 14. Charomonenko S. S., Rakitjansky, D. D. *Electrophoresis blood cells in norm and a pathology*, Minsk, 1974, 143 p. (in Russian).
 15. Hughes M. P., *Nanoelectromechanics in Engineering and biology*, Boca Raton, London, N. Y., Washington, D.C., CRC PRESS Boca Raton, 2003, 320 p.
 16. Kaisti M., *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, no. 98, pp. 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.07.010>
 17. Recordati G., Bellini T. G., *Exp. Physiol.*, 2004, vol. 89, no. 1, pp. 27–38. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2003.002633>
 18. Generalov V. M., Kruchinina M. V., Durimanov A. G., Medvedev A. A., Safatov A. S., Sergeev A. N., Buryak G. A., Kurilovich S. A., Gromov A. A., *Dielectrophoresis in the diagnosis of infectious and non-infectious diseases*, Novosibirsk, Tseris, 2011, 172 p. (in Russian).
- Дата поступления: 02.04.2020.
Дата принятия: 22.05.2020.

Dielectric properties of the human red blood cell

Vladimir M. Generalov¹, Alexander S. Safatov¹, Margarita V. Kruchinina² Andrey A. Gromov², Galina A. Buryak¹, Konstantin V. Generalov¹, Vladimir N. Kruchinin³

¹Federal State Research Institution State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector" Rospotrebnadzor, Koltsovo, Novosibirsk region, Russian Federation, e-mail: general@vector.nsc.ru, safatov@vector.nsc.ru, buryak@vector.nsc.ru, gkv@vector.nsc.ru

²Research Institute of Internal and Preventive Medicine – Branch of the Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: kruchmargo@yandex.ru, gromov.center@rambler.ru

³Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: vladd.kruch@yandex.ru

The dielectric properties of the erythrocyte were studied. Experimental methods and results of measuring the dielectric properties of individual human erythrocyte are presented. The method is theoretically justified. It is established that values of the complex permittivity of the erythrocyte, capacitance, tangent of dielectric losses remains almost constant despite significant changes in conductivity, the content of NaCl of the cell suspension. These values reflect the stability of the studied parameters of erythrocytes under conditions of changes within a wide range of the environment in which the cells are located. Complex cell permittivity and cell dielectric loss tangent are promising parameters for objective diagnostics of human diseases. The introduction of measurements of cell permittivity and cell dielectric loss tangent into medical practice will probably allow us to characterize the process of individual cell self-regulation in more detail.

Key words: erythrocyte, dielectric constant, electrical capacitance, dielectric loss tangent, dielectrophoresis.

Разработка и исследование метода разделения клеток при сегментации лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов

В. Г. Никитаев¹, А. Н. Проничев¹, В. В. Дмитриева¹, Е. В. Поляков¹, А. Д. Самсонова¹,
Н. Н. Тупицын², В. Ю. Сельчук^{1, 3}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация, e-mail: vgnikitayev@mephi.ru, anpronichev@mephi.ru, vvdmitriyeva@mephi.ru, evpolyakov@mephi.ru, samsonova183@gmail.com

²Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, Российская Федерация, e-mail: nntca@yahoo.com

³Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, Москва, Российская Федерация, e-mail: selvu@mail.ru

Рассмотрены вопросы применения информационно-измерительных систем для решения масштабных задач автоматизации диагностики острых лейкозов. Принцип действия информационно-измерительных систем основан на обработке цифровых изображений микроскопических препаратов костного мозга, особенностью которых является высокая плотность лейкоцитарных клеток в препарате (гиперклеточность), что обуславливает близость клеток друг к другу и зачастую их соприкосновение, в результате чего образуются конгломераты. Измерение характеристик клеток костного мозга в таких условиях приводит к недопустимым погрешностям (более 50 %).

Работа посвящена сегментации соприкасающихся клеток на изображениях препаратов костного мозга. Разработан метод разделения клеток при сегментации лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга в условиях гиперклеточности препарата. Особенность предложенного метода – использование подхода к сегментации изображений клеток на основе метода водораздела с маркерами. Ключевые этапы метода: формирование начальных маркеров, построение линий водораздела, пороговая бинаризация, заливка внутри контура. Определены параметры, обеспечивающие стабильность разделения соприкасающихся клеток. Проведён эксперимент и подтверждена эффективность предложенного метода. Относительная погрешность сегментации составила 5 %. Применение предложенного метода в информационно-измерительных системах компьютерной микроскопии для автоматизированного анализа препаратов костного мозга позволит повысить точность диагностики острых лейкозов.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, распознавание клеток крови, сегментация изображений, разделение соприкасающихся клеток, диагностика острых лейкозов.

Введение. Анализ костного мозга играет ключевую роль в диагностике различных заболеваний крови, среди которых особое место занимают острые лейкозы.

Острые лейкозы – опасные злокачественные заболевания системы крови, быстро приводящие к летальному исходу при отсутствии лечения. Если выявить заболевание на ранней стадии, то при правильно поставленном диагнозе и соответствующем лечении исход заболевания в большинстве случаев положительный (от 65 до 90 %). При острых лейкозах в костном мозге происходит нарушение нормального кроветворения, изменяются пропорции разных типов клеток, увеличивается количество бластных клеток, часть которых при развитии заболевания попадает в периферическую кровь. Диагностика острых лейкозов требует комплексного исследования костного мозга – морфологического, цитохимического,

иммунофенотипического, цитогенетического. Это позволяет определить конкретный подвариант острого лейкоза, так как при лечении разных подвариантов острых лейкозов существуют принципиальные отличия [1].

Одним из признаков острых лейкозов является избыточное количество бластных клеток в костном мозге. Поэтому обязательным в диагностике острых лейкозов и минимально остаточной болезни является подсчёт доли бластных клеток в костном мозге [1–4].

Один из этапов диагностики острых лейкозов – микроскопическое исследование препаратов костного мозга. Обычно его выполняет врач клинической лабораторной диагностики. Данная работа требует большой концентрации внимания, оказывает сильную нагрузку на зрение, а для достижения необходимого уровня точности необходима

высокая квалификация врача с большим опытом анализа патологических клеток. В научных публикациях отмечается, что классификация клеток костного мозга при микроскопическом исследовании врачами сопряжена со значительным количеством ошибок (до 30 % и более) [5].

В этой связи актуальна задача повышения точности классификации клеток костного мозга при микроскопическом исследовании. Одним из направлений её решения является применение систем компьютерной микроскопии [6, 7].

В цифровой обработке изображения можно выделить ряд этапов, относящихся к распознаванию образов, – предобработка, описание, классификация. На этапе предобработки выполняется выделение на изображении областей, соответствующих отдельным клеткам. Обычно эту операцию называют сегментацией изображения. Сегментация является важным этапом, от её точности зависит точность классификации клеток. На этапе описания измеряют характеристики выделенных клеток, и на этапе классификации на основе измеренных характеристик клетки относят к одному из известных типов.

Особенностью микроскопических изображений препаратов костного мозга является обычная близость клеток друг к другу, группы соприкасающихся клеток образуют конгломераты (рисунок *а*). При сегментации конгломераты выделяются как единая область. На этапе описания это приводит к большим погрешностям измерений характеристик клеток (более 50 %) и, как следствие, к неправильной их классификации.

Вопросы сегментации клеток крови на изображениях мазков крови давно уже привлекают внимание исследователей. Широко применяют методы порогового ограничения яркости, К-средних, Otsu, водораздела [8–12]. Однако задача сегментации клеток в препаратах костного мозга исследована недостаточно, нерешённой проблемой является разделение

соприкасающихся клеток. Лучшие результаты достигнуты при разделении слипшихся клеток методом водораздела с маркерами [12], но в ряде случаев контуры клеток выделяются некорректно.

Цель статьи – разработка метода разделения лейкоцитарных клеток в препаратах костного мозга в условиях соприкасающихся клеток.

Материалы и методы. Исходными данными для рассматриваемой задачи являются изображения препаратов костного мозга, которые содержат различные типы лейкоцитарных клеток, в том числе и бластные клетки.

Предлагаемый метод разделения соприкасающихся клеток представлен моделью

$$M = \{A, P, C, D, E, F, L, H\},$$

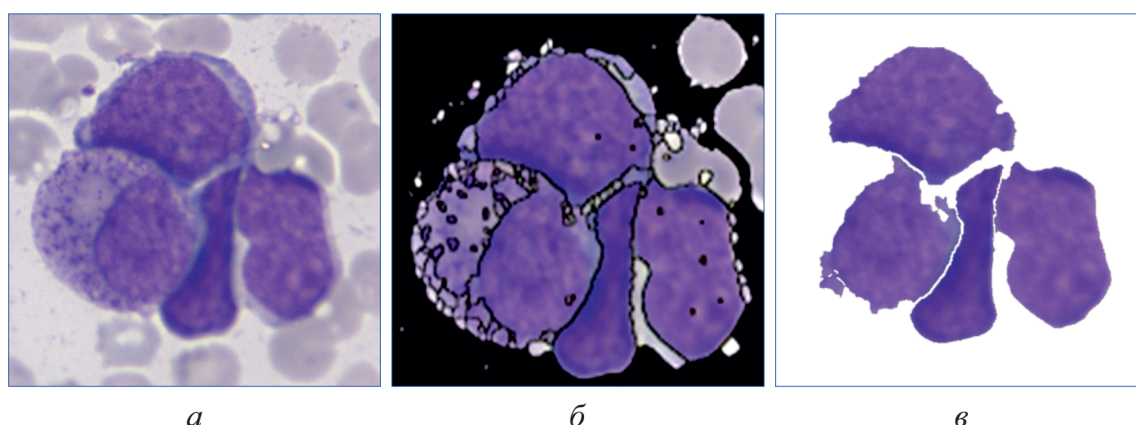
где A – исходное цифровое цветное изображение; P – преобразование исходного изображения в оттенки серого; C – сглаживание изображения в оттенках серого; D – формирование начальных маркеров; E – построение линий водораздела; F – очищение изображения от областей, соответствующих эритроцитам и мелким объектам; L – заливка внутри контура ядра клетки; H – выходное сегментированное изображение с выделенными ядрами клеток костного мозга.

Рассмотрим элементы вышеприведённой модели.

Преобразование исходного изображения в оттенки серого выполняется по формуле

$$I(x, y) = 0,299R(x, y) + 0,587G(x, y) + 0,114B(x, y),$$

где $I(x, y)$ – яркость цифрового изображения в градациях серого цвета в пикселе с координатами (x, y) ; $R(x, y)$, $G(x, y)$,



Применение метода разделения соприкасающихся клеток лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга:

a – исходное микроскопическое цифровое цветное изображение; *b* – изображение, полученное на этапе построения линий водораздела; *c* – выходное сегментированное изображение с выделенными ядрами клеток костного мозга

Application of the method of separation of touching leukocyte cells in images of bone marrow preparations:

a – the original microscopic digital color image; *b* – the image obtained at the stage of constructing the watershed lines; *c* – the output segmented image with isolated nuclei of bone marrow cells

$B(x, y)$ – яркость цветовых компонентов в пикселе исходного изображения с координатами (x, y) .

Сглаживание изображения в оттенках серого. Сглаживание происходит с помощью фильтра размером 5×5 пикселей с матрицей коэффициентов:

$$\frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix}.$$

Формирование начальных маркеров. Начальные маркеры формируются построением градиентного изображения с применением оператора Собеля, использующего для операций свертки две матрицы:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Полученное градиентное изображение подвергается операции бинаризации по порогу начальной заливки, задаваемому при настройке системы. Пиксели с яркостью ниже порога являются начальными маркерами для алгоритма водораздела.

Построение линий водораздела. Сформированные маркеры объявляются начальными группами связанных пикселей. В дальнейшем выполняется ряд итераций добавления к указанным группам прилежащих к ним пикселей. Точки соприкосновения пикселей различных групп отмечаются как граничные (совокупность граничных точек образует линии водораздела), в этих точках новые прилежащие пиксели не добавляются. Итерационный процесс прекращается, как только все пиксели изображения будут отнесены к одной из групп или к граничным точкам. На исходное цифровое изображение накладываются линии водораздела чёрного цвета. Области, ограниченные линиями водораздела и соответствующие фону, закрашиваются чёрным цветом (см. рисунок б).

Очищение изображения от областей, соответствующих эритроцитам и мелким объектам. Операция выполняется с помощью пороговой бинаризации изображения, полученного на предыдущем этапе. «Порог фильтрации эритроцитов» – параметр, определяющий результаты бинаризации, который выбирается таким образом, чтобы области соответствующие эритроцитам не выделялись. Для полученных связанных областей рассчитываются площади. Мелкие области с площадью меньше параметра «площадь ядра» удаляются. Для корректного выделения сегментированных ядер предусмотрена процедура анализа связанных сегментов. Если область меньше параметра «площадь одиночного сегмента», то она фиксируется как возможная часть сегментированного ядра. В этом случае производится поиск соседних сегментов ядра. Если суммарная площадь обнаруженных сегментов ядра не превышает значения параметра «площадь для

продолжения поиска сегментов», то поиск соседних сегментов ядра продолжается.

Заливка внутри контура ядра клетки. Внутри выделенных контуров могут образовываться мелкие полости. Для их устранения выполняется процедура заливки полостей – присоединение полостей к окружающей области внутри контура. Это обеспечивается выполнением ряда операций дилатации и эрозии, задаваемого параметром «количество итераций дилатации/эрозии».

Выходное сегментированное изображение с выделенными ядрами клеток костного мозга получается в результате выполнения вышеописанных операций. Результат работы алгоритма представлен на рисунке с.

Экспериментальные исследования. В эксперименте оценивали точность сегментации лейкоцитов на изображениях препаратов костного мозга. Препараты предоставлены лабораторией гемопозза Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина.

Объекты измерения в проводимом эксперименте – лейкоциты на изображениях препаратов костного мозга.

Препараты костного мозга фиксировались и окрашивались по методу Май–Грюнвальд–Романовского (в результате ядра клеток приобрели фиолетовый цвет). Изображения препаратов получены с помощью роботизированного микроскопа Olympus BX43 и цифровой фотокамеры Imperx IPX-4M15T-GCFB.

Съёмку изображений клеток выполняли серией не менее 200 кадров, представляющих непересекающиеся области на препарате, в каждом кадре наблюдалось от 1 до 30 клеток. Из полученных изображений отобрали 93, в которых наблюдались конгломераты соприкасающихся клеток.

В результате экспериментальных исследований определены следующие параметры обработки изображений:

- порог начальной заливки – 15;
- порог фильтрации эритроцитов – 140;
- площадь ядер – 3000 пикселей;
- площадь одиночного сегмента – 9000 пикселей;
- количество итераций дилатации/эрозии – 3;
- площадь для продолжения поиска сегментов – 11000 пикселей.

Точность сегментации оценивали методом определения доли правильно разделённых клеток на изображениях препаратов костного мозга к общему числу клеток на изображениях, использованных в эксперименте.

Относительная погрешность сегментации в проведённом эксперименте составила 5 %.

Заключение. Предложен метод выделения клеток костного мозга, основанный на алгоритме водораздела с маркерами. По результатам эксперимента получена относительная погрешность сегментации 5 %. Предложенный метод можно рекомендовать к использованию в информационно-измерительных системах диагностики острых лейкозов и минимально остаточной болезни, в системах классификации клеток костного мозга и автоматизированного анализа миелограмм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-29-09115).

Список литературы

References

1. Гематология: руководство для врачей / Под ред. Н. Н. Мамаева. СПб.: СпецЛит, 2019. 639 с.
2. Румянцев А. Г., Масчан А. А., Румянцева Ю. В., Карачунский А. И. Федеральные клинические рекомендации по диагностике и лечению острого лимфобластного лейкоза у детей и подростков. М.: НОДГО, 2015. 71 с.
3. Безнос О. А. Диагностика минимальной остаточной болезни при острых лимфобластных лейкозах у детей: автореф. дис. канд. мед. наук. (НМИЦ онкологии им. Н. Н. Блохина, Москва, 2017).
4. Bain B. J., Bates I., Laffan M. A., *Dacie and Lewis Practical Haematology*, Elsevier Health Sciences, 2017. 600 p.
5. Amin M. M., Kermani S., Talebi A., etc., *Journal of Medical Signals and Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58. <https://doi.org/10.4103/2228-7477.186885>
6. Никитаев В. Г. Высотехнологичные информационно-измерительные комплексы онкологической диагностики: проблемы и ключевые положения методологии построения // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 68–70.
7. Никитаев В. Г. Современные принципы измерений в интеллектуальных системах гистологической диагностики онкологических заболеваний // Измерительная техника. 2015. № 4. С. 68–70.
8. Dhal K. G., Gálvez J., Ray S., et al., *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 12227–12255. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08417-z>
9. Поляков Е. В. Состояние и перспективы развития систем автоматизации световой микроскопии при диагностике острых лейкозов. // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2018. Т. 17. № 2. С. 407–420.
10. Mohapatra S., Patra D., Kumar S., Satpathy S., *Biomedical Engineering Letters*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 100–110. <https://doi.org/10.1007/s13534-012-0056-9>
11. Nikitaev V. G., Polyakov E. V., Matveeva I. I., Blindar V. N., *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 798, no. 1, p. 012129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012129>
12. Mishra S., Majhi B., Sa P. K., Sharma L., *Biomedical Signal Processing and Control*, 2017, no. 33, pp. 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.11.021>

1. *Gematologiya: rukovodstvo dlya vrachej*, Ed. N. N. Mamaeva, St. Peterburg, SpecLit Publ, 2019. 639 p. (in Russian).
2. Rumyancev A. G., Maschan A. A., Rumyanceva Yu. V., Karachunskii A. I., *Federal'nye klinicheskie rekomendacii po diagnostike i lecheniyu ostrogo limfoblastnogo lejkoza u detej i podrostkov*, Moscow, NODGO Publ., 2015, 71 p. (in Russian).
3. Beznos O. A., Extended abstract of candidate's dissertation in medicine science. (N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology Moscow, 2017).
4. Bain B. J., Bates I., Laffan M. A., *Dacie and Lewis Practical Haematology*, Elsevier Health Sciences, 2017. 600 p.
5. Amin M. M., Kermani S., Talebi A., etc., *Journal of Medical Signals and Sensors*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 49–58. <https://doi.org/10.4103/2228-7477.186885>
6. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 214–218. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0688-0>
7. Nikitaev V. G., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 68–70. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0736-9>
8. Dhal K. G., Gálvez J., Ray S., et al., *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 12227–12255. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08417-z>
9. Polyakov E. V., *System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 407–420.
10. Mohapatra S., Patra D., Kumar S., Satpathy S., *Biomedical Engineering Letters*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 100–110. <https://doi.org/10.1007/s13534-012-0056-9>
11. Nikitaev V. G., Polyakov E. V., Matveeva I. I., Blindar V. N., *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 798, no. 1, p. 012129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012129>
12. Mishra S., Majhi B., Sa P. K., Sharma L., *Biomedical Signal Processing and Control*, 2017, no. 33, pp. 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.11.021>

Дата поступления: 08.05.2020.

Дата принятия: 18.05.2020.

Development and study of a method for cell separation during white blood cell segmentation on images of bone marrow preparations in information and measurement systems for diagnostics of acute leukemia

Valentin G. Nikitaev¹, Aleksandr N. Pronichev¹, Valentina V. Dmitrieva¹, Evgenii V. Polyakov¹, Aleksandra D. Samsonova¹, Nikolai N. Tupitsyn², Vladimir Yu. Selchuk^{1,3}

¹National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation, e-mail: vgnikitayev@mephi.ru, anpronichev@mephi.ru, vvdmitriyeva@mephi.ru, evpolyakov@mephi.ru, samsonova183@gmail.com

²N. N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russian Federation, e-mail: nntca@yahoo.com

³A. I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russian Federation, e-mail: selvu@mail.ru

The issues of using of information and measurement systems based on processing of digital images of microscopic preparations for solving large-scale tasks of automating the diagnosis of acute leukemia are considered. The high density of leukocyte cells in the preparation (hypercellularity) is a feature of microscopic images of bone marrow preparations. It causes the proximity of cells to each

other and their contact with the formation of conglomerates. Measuring of the characteristics of bone marrow cells in such conditions leads to unacceptable errors (more than 50%).

The work is devoted to segmentation of contiguous cells in images of bone marrow preparations. A method of cell separation during white blood cell segmentation on images of bone marrow preparations under conditions of hypercellularity of the preparation has been developed. The peculiarity of the proposed method is the use of an approach to segmentation of cell images based on the watershed method with markers. Key stages of the method: the formation of initial markers and builds the lines of watershed, a threshold binarization, shading inside the outline. The parameters of the separation of contiguous cells are determined. The experiment confirmed the effectiveness of the proposed method. The relative segmentation error was 5 %. The use of the proposed method in information and measurement systems of computer microscopy for automated analysis of bone marrow preparations will help to improve the accuracy of diagnosis of acute leukemia.

Key words: *information and measurement systems, blood cells recognition, image segmentation, separation of touching cells, acute leukemia diagnosis.*

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 +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 +7 (495) 974-11-11

«Измерительная техника» – индекс 38168

«Метрология» – индекс 38169

ООО «Информнаука»

www.informnauka.com +7 (495) 787-38-73

ООО «УП «Урал-Пресс»

www.ural-press.ru +7 (499) 700-05-07

ФГУП «ВНИИМС»

www.vniims.ru +7 (495) 430-28-02

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU

www.elibrary.ru +7 (495) 544-24-94

Электронно-библиотечная система РУКОНТ

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

www.izmt.ru