

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 006.915.1-531.715.1

БАГДЮН
Александр Андреевич

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.15 – метрология и метрологическое обеспечение

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный
руководитель

СОЛОМАХО Владимир Леонтьевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Стандартизация, метрология и ин-
формационные системы» Белорусского наци-
онального технического университета

Официальные
оппоненты

ЖАГОРА Николай Адамович,
доктор технических наук, доцент

САВКОВА Евгения Николаевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электротехника и электроника» Белорусского
национального технического университета

Оппонирующая
организация

Учреждение образования «Белорусский государ-
ственный университет информатики и радио-
электроники»

Защита состоится «19» декабря 2024 г. в 14¹⁵ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 В Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря: (017) 293-96-18, e-mail: D.02.05.17@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национально-го технического университета.

Автореферат разослан «18» ноября 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



Н. Н. Ризноокая

ВВЕДЕНИЕ

Анализ тенденций мирового экономического развития свидетельствует, что в ближайшие десятилетия одними из определяющих направлений глобального научно-технического развития будет производство наноматериалов и совершенствование нанотехнологии. Контроль качества нанопроизводства на любом этапе жизненного цикла продукции, среды, в которой они производятся и применяются, анализ его влияния на биологические объекты, в частности, человека, остро нуждается в высокоточных измерениях размеров, концентраций и других параметров наночастиц в дисперсных системах (аэрозоли, взвеси и т. д.).

Одной из основных характеристик дисперсной среды является размер частиц, выраженный в единицах длины. Сложность измерения этого параметра связана с зависимостью механических, электрических, магнитных, оптических свойств наночастиц от их размера и формы. Из-за малых размеров и, соответственно, большой удельной поверхности, наночастицы веществ не только обладают высокой химической активностью, но и имеют физические, химические и биологические свойства, существенно отличающиеся от свойств объемных количеств этих веществ.

«Квантовый характер» нанотехнологий определяет их существенную зависимость от точности количественной оценки параметров нанообъектов, входящих в состав исходных материалов, физико-химический состав технологических сред во всем диапазоне их использования, а также получаемых технологических продуктов. Наночастицы по условиям их производства и существования, как правило, не бывают монодисперсными. Информация об их фракционном составе, т. е. распределении наночастиц по размерам, является важнейшей научно-технической задачей, решение которой обеспечивает эффективность применения нанотехнологий, способствуют прогрессу в развитии исследований, связанных с применением нанообъектов. Обеспечить валидность измерений в масштабе времени, близком к реальному, невозможно без решения проблемы метрологического обеспечения измерений размеров наночастиц. Отсюда возникает задача метрологического обеспечения единства измерений параметров дисперсных сред (аэрозоли и взвеси).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы соответствует:

– подразделу 4.10 «Наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика» раздела 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156;

– разделу 3 «Промышленные и строительные технологии и производство» и разделу 6 «Био- и наноиндустрия» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166;

– разделу 7 «Системы и комплексы машин» и разделу 8 «Многофункциональные материалы и технологии» перечня приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190.

Проведенные в диссертационной работе исследования выполнялись в рамках Государственной научно-технической программой «Эталоны и научные приборы» на 2016–2020 годы (подпрограмма «Эталоны Беларуси»), в соответствии с заданиями:

– 2.19 «Создать и оснастить лабораторию эталонов в нанометровом диапазоне измерений»;

– 2.20 «Создать эталонный комплекс метрологического контроля средств измерений параметров дисперсных сред».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является развитие системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь путем создания эталонного оборудования для измерения геометрических параметров наночастиц, определения его метрологических характеристик и разработки схем метрологической прослеживаемости результатов измерений наночастиц находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Конкретизировать термины и определения, связанные с понятием размера наночастиц; для анализа и однозначной количественной оценки размеров реальных нанообъектов в линейных величинах, установить базовую модель наночастицы и дать определение ее размера.

2. Провести классификацию методов измерений, базирующихся на различных физических принципах и реализующих различные методы измерений размеров наночастиц; установить базовые методы измерений размеров наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе.

3. Создать необходимую эталонную базу, позволяющую определять действительный диаметр частиц, находящихся на подложках, в линейных величинах; размер частиц, находящихся в растворах в виде взвесей, соответствующий их гидродинамическому диаметру; размер частиц, находящихся в виде аэрозолей по электрической подвижности частиц; для всех методов измерений разработать методики измерений.

4. С целью определения метрологических характеристик эталонных средств измерений, разработать методику теоретико-экспериментального расчета погрешности измерения размеров наночастиц и определения погрешности передачи размера единицы величины.

5. Сформулировать основные принципы обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц; для всех рассматриваемых методов разработать схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц.

Объектом исследования является система обеспечения единства измерений Республики Беларусь в области измерений размеров наночастиц.

Предметом исследования являются эталонное оборудование для измерения размеров наночастиц, его метрологические характеристики и схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц.

Научная новизна

1. Разработана классификационная схема методов и средств измерений размеров, применяемых для единичных наночастиц и их ансамблей, позволившая выделить методы и средства, обеспечивающие наибольшую точность измерений для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе, и впервые применив комплексный подход, создать, на их основе, эталонный комплекс средств измерений размеров наночастиц, включенный в состав «Национального эталона единицы длины – метра в нанометровом диапазоне» и «Эталонного комплекса метрологического обеспечения средств измерений параметров дисперсных сред», с диапазоном измерений размеров от 50 нм до 50 мкм для частиц, находящихся на подложке, от 50 нм до 2 мкм для частиц, находящихся в жидкости, и от 20 нм до 1 мкм для частиц, находящихся в воздухе.

2. Разработан алгоритм комплексной теоретико-экспериментальной оценки погрешности измерений размеров наночастиц при использовании разработанных средств измерений, предполагающий создание универсальной классификационной схемы источников погрешностей измерений размеров наночастиц, количественную оценку выделенных источников погрешностей, построение аналитических моделей формирования погрешности для каждого эталонного средства измерений, что позволило впервые установить погрешность передачи единицы длины – метра измерительной системой, реализующей интерферометрический метод измерения, составившую 2,0 % при измерении частиц на подложке в вертикальной плоскости и 0,6 %, при измерении частиц на подложке в латеральной плоскости, измерительной системой, реализующей метод динамического рассеяния света, составившую 1,1 % при измерении частиц в жидкости, измерительной системой, реализующей метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, составившую 2,4 % при измерении частиц в воздухе.

3. Разработаны принципы построения и, созданные на их основе, схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц, включающие в себя процедуры испытания рабочих эталонов на основе стандартных образцов размеров наночастиц на созданном эталонном комплексе средств измерений размеров наночастиц и обеспечивающие прослеживаемость к единицам Международной системы (СИ), что в совокупности решает сложную научно-практическую задачу метрологического обеспечения измерений размеров наночастиц и способствует развитию Системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь, расширяющая ее на нанометровый диапазон.

Положения, выносимые на защиту

1. Эталонный комплекс средств измерений размеров наночастиц, созданный на основании проведенных исследований и включенный в состав «Национального эталона единицы длины – метра в нанометровом диапазоне» и «Эталонного комплекса метрологического обеспечения средств измерений параметров дисперсных сред» с диапазоном измерений размеров частиц: от 50 нм до 50 мкм для частиц нахо-

дящихся на подложке, от 50 нм до 2 мкм для частиц, находящихся в жидкости, от 20 нм до 1 мкм для частиц находящихся в воздухе, отличающийся комплексным подходом к обеспечению единства измерений и предназначенный для реализации схем метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц в различных дисперсных средах, путем установления метрологических характеристик рабочих эталонов.

2. Методика теоретико-экспериментальной оценки погрешности измерения размеров наночастиц с помощью эталонных средств измерений, основанная на применении унифицированной классификационной схемы источников погрешностей и позволившая впервые установить погрешность передачи единицы длины – метра измерительной системой, реализующей интерферометрический метод измерения, составившую 2,0 % при измерении частиц на подложке в вертикальной плоскости и 0,6 %, при измерении частиц на подложке в латеральной плоскости, измерительной системой, реализующей метод динамического рассеяния света, составившую 1,1 % при измерении частиц в жидкости, измерительной системой, реализующей метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, составившую 2,4 % при измерении частиц в воздухе.

3. Схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц, построенные на основании сформулированных принципов, включающие в себя процедуры испытания рабочих эталонов на основе стандартных образцов размеров наночастиц на созданном эталонном комплексе средств измерений размеров наночастиц и позволяющие обеспечить прослеживаемость измерений размеров наночастиц оборудованием предприятий реального сектора экономики к единицам Международной системы единиц (СИ).

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, получены соискателем лично или в соавторстве с научным руководителем д. т. н., профессором В. Л. Соломахо. Автором проведен анализ и обоснование выбора высокоточных методов и средств измерений размеров наночастиц, положенных в основу технических средств, входящих в состав эталонного измерительного комплекса, проведены теоретические и экспериментальные исследования, анализ и научная интерпретации их результатов, разработка комплекса методик измерений и схем метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Совместно с начальником ПИО измерений геометрических величин БелГИМ Макаревичем В. Б. и инженером по метрологии 1 категории Ивашенко Д. В. проводились работы по созданию эталонного комплекса метрологического контроля средств измерений параметров дисперсных сред и разработке проекта методики выполнения измерений размеров частиц. Совместно с ведущим инженером Горошковой А. Н. разработаны схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XII Международная научно-техническая конференция

«Приборостроение-2019» (Минск, 13–15 ноября 2019 г.); XIII Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2020» (Минск, 18–20 ноября 2020 г.); XX Международная научно-техническая конференция «Качество, стандартизация, контроль – теория и практика» (Одесса, 7–11 сентября 2020 г.); XIV Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2021» (Минск, 17–19 ноября 2021 г.); V Международная научно-техническая конференция «Метрология физико-химических измерений» (Москва, 14–16 сентября 2021 г.); XXXV Международная научно-техническая конференция «Технология–Оборудование–Инструмент–Качество» (Минск, 6–9 апреля 2021 г.); XV Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2022» (Минск, 15–17 ноября 2022 г.); Международная научно-техническая конференция «Метрология-2022» (Минск, 5–6 апреля 2022 г.); VI Международная научно-техническая конференция «Метрология физико-химических измерений» (Москва, 5–8 сентября 2023 г.); Материалы диссертации докладывались и обсуждались на заседаниях научно-технического совета республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии» (БелГИМ) и в рамках участия соискателя в IX Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КООМЕТ», 21–22 апреля 2021 г.

Опубликование результатов диссертации с указанием количества публикаций по теме диссертации и их объема в авторских листах

По результатам исследований, представленным в диссертации, опубликовано 18 работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, 6 статей в сборниках материалов конференций, 3 тезиса докладов. Получены 2 патента Республики Беларусь на полезную модель. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 5,18 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и 3 приложения. Полный объем диссертации составляет 139 страниц; из них 97 страниц занимает текст, 17 страниц занимают 40 иллюстраций, на 9 страницах приведены 24 таблицы, 6 страниц занимают 3 приложения. Библиографический список состоит из 106 наименований на 10 страницах, из которых 20 – публикации соискателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассматриваются современные подходы к трактовке термина «размер наночастиц». Проведенный обзор нормативной и научно-технической литературы показал, что для решения задачи метрологического обеспечения измерений размера твердых наноразмерных частиц необходимо создать комплекс эталонного оборудования, разработать методику теоретико-экспериментальной оценки погрешности представленного оборудования и определить его метрологические характеристики, разработать схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений и обеспечить возможность их технической реализации.

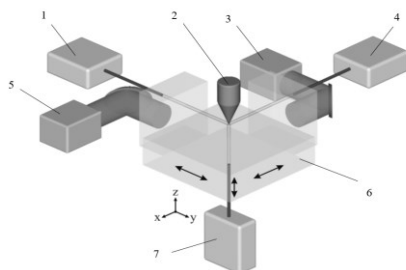
Во **второй** главе предложен и описан комплекс эталонного оборудования, созданный для измерения размеров наночастиц в дисперсных средах, на основе:

– интерферометрического метода измерений, позволяющего определять действительный диаметр частиц, находящихся на подложках, в линейных величинах (прослеживаемый к единице длины – метру);

– метода динамического рассеяния света, позволяющего определять гидродинамический диаметр частиц, находящихся в растворах в виде взвесей;

– метода анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, позволяющего по электрической подвижности частиц определять размер частиц, находящихся в составе аэрозолей.

Основой измерительной системы, базирующейся на интерферометрическом методе измерений, является наноизмерительная машина (НИМ). В конструкции, представленной на рисунке 1, зондирующая система 2 и три средства измерения длины (интерферометры 1, 4, 7) крепятся на корпусе, представляющем собой жесткую рамную конструкцию.



1 – Y-интерферометр; 2 – зондирующая система; 3, 5 – угловые датчики;
4 – X-интерферометр; 6 – угловое зеркало; 7 – Z-интерферометр

Рисунок 1 – Схема конструкции измерительной системы, использующей интерферометрический метод измерения

Материал рамы – ситалл. Интерферометры 1, 4, 7 установлены таким образом, что точка пересечения их оптических осей, совпадающих с линиями измерений по осям X, Y, Z, совмещена с точкой контакта зондирующей системы 2 и объекта измерения.

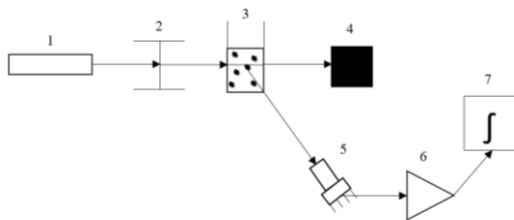
Объект измерения устанавливается в приспособление в виде углового зеркала 6, внешние грани которого служат оптическими отражателями для измерительных интерферометров. Приспособление лежит на трехкоординатном столе, представляющем собой комбинацию установочных платформ и систем приводов, обеспечивающих независимое перемещение платформ по осям X, Y, Z. Угловые датчики 3, 5, установленные на корпусе, измеряют наклон боковых поверхностей углового зеркала. Необходимая точность измерения достигается за счет соблюдения принципа Аббе по всем трем измерительным осям.

В качестве зондирующей системы, используется атомно-силовой микроскоп (АСМ). После контакта с объектом измерений сигнал АСМ используется для регулирования вертикального положения стола, что позволяет осуществлять измерения

в вертикальной (измеряется расстояние между вершиной одиночной частицы и подложкой) и латеральной плоскостях (измеряется расстояние между вершинами двух соседних частиц).

Измерительная система, работающая на основе метода динамического рассеяния света, базируется на анализаторе размеров наночастиц (SZ-100), схема которого представлена на рисунке 2, и предназначена для измерения размеров наночастиц, находящихся в жидкости.

Источник излучения 1, в качестве которого использован He-Ne лазер, генерирует когерентное, монохроматическое оптическое излучение, которое проходит через аттенюатор 2. Это позволяет ослабить интенсивность излучения до уровня, приемлемого для приемника излучения, не искажая при этом форму сигнала. Излучение попадает в ячейку 3, содержащую образец наночастиц, после взаимодействия с которым часть света преломляется, а часть рассеивается.



1 – источник излучения; 2 – аттенюатор; 3 – ячейка, содержащая объект измерения;
4 – фотоловушка; 5 – ФЭУ, 6 – усилитель-дискриминатор;
7 – коррелятор

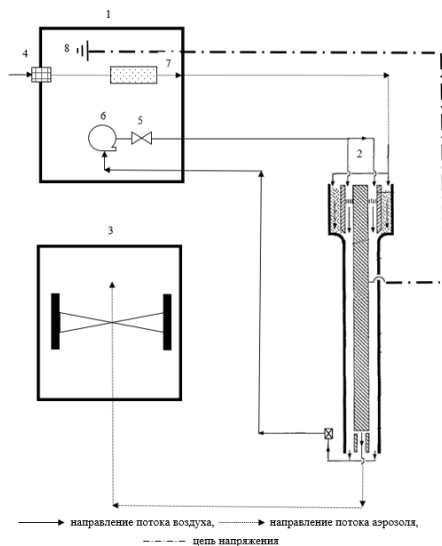
Рисунок 2 – Схема конструкции измерительной системы, использующей метод динамического рассеяния света

Преломленный свет собирается фотоловушками 4, а рассеянный, под определенным углом собирается фотодетектором 5, в качестве которого выступает фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал. Электрический сигнал с ФЭУ обрабатывается усилителем-дискриминатором 6, после чего попадает в коррелятор 7, который вычисляет автокорреляционную функцию и строит ее зависимость от времени задержки.

Измерительная система, предназначенная для измерения размеров наночастиц, находящихся в воздухе, использует метод разделения частиц на основании их электрической подвижности и формирует на выходе поток монодисперсных частиц, обеспечивая их счет и определение размера. Измерительная система, представленная на рисунке 3, включает три основных устройства: электростатический классификатор 1, колонну анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц 2 и конденсационный счетчик частиц 3.

Электростатический классификатор включает входной импактор 4, который фильтрует частицы размером более 2 мкм, расходомер воздуха 5, предназначенный для стабилизации скорости истечения потока обдува, формируемого насосом 6, биполярный нейтрализатор аэрозолей 7 – устройство, в котором частицы сталкива-

ются с биполярными ионами, что приводит к формированию равновесного распределения их заряда.



- 1 – электростатический классификатор; 2 – колонна анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц;
 3 – конденсационный счетчик частиц; 4 – входной импактор;
 5 – расходомер воздуха; 6 – насос; 7 – нейтрализатор аэрозоля;
 8 – источник высокого напряжения

Рисунок 3 – Схема конструкции измерительной системы, использующей метод анализа дифференциальной электрической подвижности

Колонна анализатора 2, представляет собой длинную цилиндрическую камеру с радиусом 19,58 мм. Внутри камеры установлен стержень радиусом 9,37 мм, концентричный стенкам камеры. Поток аэрозоля, попадая в образованное стержнем и стенками камеры кольцевое пространство, соединяется с потоком чистого воздуха обдува. Напряжение на стержне регулируется в диапазоне от 0 до 10000 В. Заряженные частицы движутся к центральному стержню из-за разности потенциалов. Малый радиальный зазор и высокая равномерность электрического поля создают необходимые условия, позволяющие проводить измерения электрической подвижности с высоким разрешением.

Поток, состоящий из моноразмерных заряженных частиц, направляется в конденсационный счетчик частиц 3. Остальной поток отводится из анализатора 2 и попадает в систему рециркуляции.

Так как созданный комплекс является эталонным для данного вида измерений, для определения его метрологических характеристик в **третьей главе** проведен теоретико-экспериментальный расчет погрешности измерений размеров наночастиц.

Предложена общая, для всех измерительных систем, методика теоретико-экспериментального анализа погрешности измерения размеров наночастиц, которая предполагает: структурирование источников неисключенной систематической погрешности измерений; построение метрологической модели; количественную оценку источников систематической погрешности в рамках представленной модели; экспериментальное определение случайной составляющей погрешности измерения каждой измерительной системы; определение погрешности передачи размера единицы величины.

Для оптимизации процесса расчета неисключенной систематической погрешности и недопущения неучтенных источников, нами была разработана классификационная схема, объединяющая источники погрешностей средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и воздухе, представленная на рисунке 4.



Рисунок 4 – Классификационная схема источников погрешностей для различных типов средств измерений, используемых для наночастиц, находящихся на подложке, в жидкости и воздухе

Метрологическая модель, используемая для расчета неисключенной систематической составляющей погрешности измерения **размеров наночастиц в вертикальной плоскости интерферометрическим методом**, выглядит следующим образом:

$$\theta_{dz} = f(\theta_r, \theta_{\text{freq}}, \theta_{ri}, \theta_{\text{Abbe}}, \theta_{\text{drift}}, \theta_{\text{noise}}, \theta_{\text{nonlin}}, \theta_{TE}, \theta_{pd}), \quad (1)$$

Структурные составляющие модели и данные для расчета элементарных составляющих неисключенной систематической погрешности при измерении размеров наночастиц с номинальным размером $L = 100$ нм, находящихся на подложке, в вертикальной плоскости приведены в таблице 1.

Случайную составляющую погрешности измерений определяем путем многократных измерений одной и той же физической величины и последующей статистической обработки результатов измерений.

В работе измерение размеров в вертикальной плоскости осуществлялось по мере высоты ступени (МБС) SHS-880. Рассчитанное значение среднего квадратического отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности составляет 0,2 %.

Таблица 1 – Основные источники неисключенных систематических погрешностей при измерении размеров наночастиц в вертикальной плоскости

Обозначение погрешности	Источник неисключенной систематической погрешности	Значение погрешности θ_i , нм
θ_r	Разрешение лазерного интерферометра	0,019
θ_{freq}	Нестабильность частоты He-Ne-лазера	$4,343 \cdot 10^{-9} \cdot L$
θ_{ri}	Коэффициент преломления воздуха	$1,54 \cdot 10^{-7} \cdot L$
θ_{Abbe}	Несоблюдение принципа Аббе	0,097
θ_{drift}	Дрейф системы	1,0
θ_{noise}	Уровень шума вдоль оси сканирования	1,0
θ_{nonlin}	Нелинейность лазерного интерферометра	0,5
θ_{TE}	Тепловое расширение измеряемого объекта	$7,0 \cdot 10^{-6} \cdot L$
θ_{pd}	Расчет пластической деформации	1,03
Неисключенная систематическая погрешность θ_{dt}		2,00 %

Погрешность передачи размера единицы длины при измерении размера наночастиц в вертикальной плоскости $S_{\Sigma dz}$, %, составила 2,0 % при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $K = 1,1$.

В связи с тем, что базовые источники неисключенной систематической составляющей при измерении размеров наночастиц в вертикальной и латеральной плоскостях совпадают, для расчета неисключенной систематической составляющей погрешности измерения **размеров наночастиц в латеральной плоскости** была использована ранее примененная модель, которая, с учетом адаптации к новой схеме измерений, выглядит следующим образом:

$$\theta_{dxy} = f(\theta_r, \theta_{\text{freq}}, \theta_{ri}, \theta_{\text{Abbe}}, \theta_{\text{drift}}, \theta_{\text{noise}}, \theta_{\text{nonlin}}, \theta_{TE}, \theta_{ag}, \theta_{RK}), \quad (2)$$

Данные расчета элементарных составляющих неисключенной систематической погрешности при измерении размеров наночастиц, находящихся на подложке, в латеральной плоскости приведены в таблице 2.

Для определения случайной составляющей погрешности при измерении размеров наночастиц интерферометрическим методом в латеральной плоскости использовалась мера ширины шага (МШШ) 2D100. Измерения проводились путем построения профиля, проходящего через измерительную область МШШ.

Таблица 2 – Основные источники неисключенных систематических погрешностей при измерении наночастиц в латеральной плоскости

Обозначение погрешности	Источник неисключенной систематической погрешности	Значение погрешности θ_i , нм
θ_r	Разрешение лазерного интерферометра	0,019
θ_{freq}	Нестабильность частоты He-Ne-лазера	$4,343 \cdot 10^{-9} \cdot L$
θ_{ri}	Коэффициент преломления воздуха	$1,54 \cdot 10^{-7} \cdot L$
θ_{Abbe}	Ошибка Аббе	0,097
θ_{drift}	Дрейф системы	1,0
θ_{noise}	Уровень шума вдоль оси сканирования	1,0
θ_{nonlin}	Нелинейность лазерного интерферометра	0,5
θ_{TE}	Тепловое расширение измеряемого объекта	$7,0 \cdot 10^{-6} \cdot L$
θ_{ag}	Воздушные зазоры	1,0
θ_{RK}	Радиус кривизны зонда	5,0
Неисключенная систематическая погрешность θ_{dxy} , с учетом количества n упорядоченных в линию частиц, на которых проводится измерение, при расчете принято $n = 10$		0,58 %

Расчитанное значение СКО случайной составляющей погрешности составляет 0,00088 %. Погрешность передачи размера единицы длины при измерении размера наночастиц в латеральной плоскости $S_{\Sigma_{\text{dxy}}}$, % составляет 0,6 % при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $K = 1,1$.

Измерительная система, предназначенная для измерения диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света (ДРС), базируется на расчете гидродинамического размера на основании уравнения Стокса-Эйнштейна, соответственно и метрологическая модель, используемая для расчета неисключенной систематической составляющей погрешности измерения, формируется из составляющих вышеуказанного уравнения:

$$\theta_w = f(\theta_{k_B}, \theta_T, \theta_n, \theta_g, \theta_{\Gamma}, \theta_{\eta}, \theta_{\lambda}), \quad (3)$$

Основные источники неисключенных систематических погрешностей и их значения приведены в таблице 3.

Для проведения эксперимента по оценке СКО случайной составляющей погрешности при измерении размера частиц методом ДРС использовалась суспензия на основе дистиллированной воды со стандартными образцами размера частиц *PSL (Polystyren Latex Particles)*, номинальным значением 100 нм.

На основании проведенных экспериментальных исследований случайная составляющая погрешности S_w составляет 0,36 %, а погрешность передачи размера единицы длины при измерении размера наночастиц в жидкости S_{Σ_w} , % составляет 1,1 % при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $K = 1,1$.

Таблица 3 – Источники неисключенных систематических погрешностей

Обозначение погрешности	Источник неисключенной систематической погрешности	Значение погрешности θ_i , %
θ_{k_B}	Погрешность, обусловленная постоянной Больцмана	0,00017
θ_T	Погрешность, обусловленная измерением температуры	0,4348
θ_η	Погрешность, обусловленная вязкостью дисперсионной системы	0,0849
θ_λ	Погрешность, обусловленная длиной волны лазера	0,1880
θ_ϑ	Погрешность, обусловленная измерением угла рассеяния	0,0175
θ_n	Погрешность, обусловленная показателем преломления дисперсионной среды	0,7490
θ_Γ	Погрешность, обусловленная скоростью затухания автокорреляционной функции	0,1675
Неисключенная систематическая погрешность θ_w		1,00

Метрологическая модель неисключенной систематической погрешности измерительной системы, предназначенной для измерения диаметра наночастиц на основе метода анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, выглядит следующим образом:

$$\theta_w = f(\theta_e, \theta_\mu, \theta_{C(D_p)}, \theta_{L,r_1,r_2}, \theta_V, \theta_{q_{sh}}), \quad (4)$$

Основные источники неисключенных систематических погрешностей и их значения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Источники неисключенных систематических погрешностей

Обозначение погрешности	Источник неисключенной систематической погрешности	Значение погрешности θ_i , %
θ_e	Погрешность, обусловленная определением величины заряда электрона	0,0003
θ_μ	Погрешность, обусловленная определением значения вязкости газа	0,089
$\theta_{C(D_p)}$	Погрешность, обусловленная определением поправочного коэффициента Каннинггема	0,1
θ_{L,r_1,r_2}	Погрешность, обусловленная измерением геометрических параметров анализатора	0,79
θ_V	Погрешность, обусловленная измерением напряжения на центральном стержне анализатора	0,3
$\theta_{q_{sh}}$	Погрешность, обусловленная измерением скорости потока воздуха обдува в оболочке анализатора	2,0
Неисключенная систематическая погрешность θ_a		2,40

СКО случайной составляющей погрешности анализатора при измерении размера частиц в воздухе определяли по стандартным образцам размера частиц *PSL* номинальным значением 100 нм. На основании проведенных экспериментальных исследований случайная составляющая погрешности S_a составляет 0,04 %, а погрешность передачи размера единицы длины при измерении размера наночастиц в воздухе $S_{\Sigma a}$, %, составляет 2,4 % при доверительной вероятности $P = 0,95$ и $K = 1,1$

В четвертой главе, сформулированы основные принципы обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц:

- результаты измерений должны прослеживаться к единицам Международной системы единиц (СИ), что реализуется путем международных сличений эталонов;
- неотъемлемым элементом цепи прослеживаемости являются стандартные образцы размера частиц, измеренные эталонными средствами измерений с задокументированной погрешностью (неопределенностью);
- для утверждения типа стандартного образца необходимо определять размер и погрешность (неопределенность) измерений размера стандартных образцов в ходе испытаний.

Следя сформулированным принципам, с учетом разработанного эталонного измерительного комплекса представлены схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений линейных размеров наночастиц, наночастиц в жидкости и наночастиц в воздухе (рисунки 5–7).

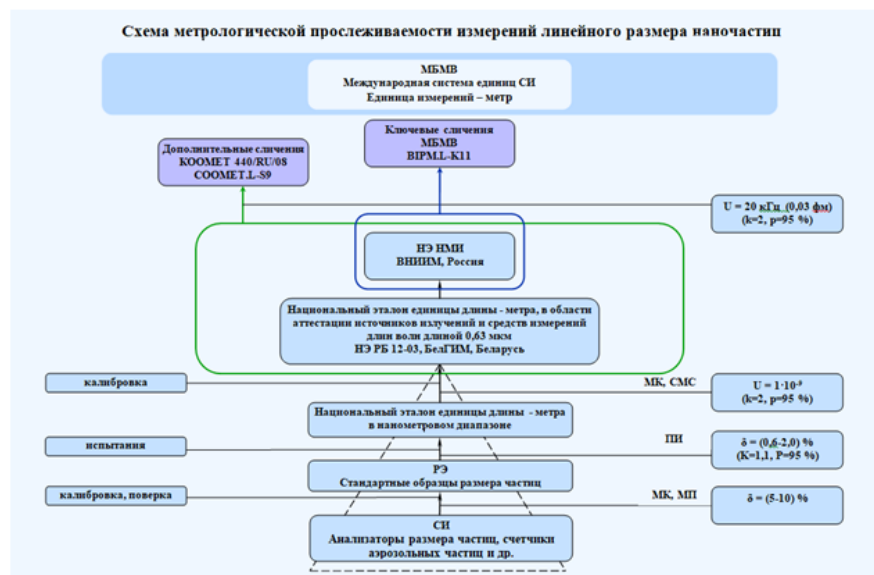


Рисунок 5 – Схема метрологической прослеживаемости результатов измерений линейного размера наночастиц



Рисунок 6 – Схема метрологической прослеживаемости результатов измерений размера наночастиц в жидкости



Рисунок 7 – Схема метрологической прослеживаемости результатов измерений размера аэрозольных наночастиц

В приложениях представлены копия акта о практическом использовании результатов диссертационной работы, копия свидетельства об утверждении национального эталона, копии патентов на полезную модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Для анализа, описания и однозначной количественной оценки размеров реальных нанообъектов принята базовая модель наночастицы в виде сферы, размером которой является диаметр описанной сферы минимального радиуса; для сравнения результатов измерений, основанных на любых иных возможных физических принципах, не предполагающих непосредственную оценку в единицах длины, определяется эквивалентный размер частицы, который приводится к линейному [6, 10, 13].

1. Создан эталонный комплекс средств измерений размеров наночастиц, созданный на основании проведенных исследований и включенный в состав «Национального эталона единицы длины – метра в нанометровом диапазоне» и «Эталонного комплекса метрологического обеспечения средств измерений параметров дисперсных сред» с диапазоном измерений размеров частиц: от 50 нм до 50 мкм для частиц находящихся на подложке, от 50 нм до 2 мкм для частиц находящихся в жидкости, от 20 нм до 1 мкм для частиц находящихся в воздухе, отличающийся комплексным подходом к обеспечению единства измерений и предназначенный для реализации схем метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц в различных дисперсных средах, путем установления метрологических характеристик рабочих эталонов [3, 7, 11, 15, 16, 19, 20].

2. Создана методика теоретико-экспериментальной оценки погрешности измерения размеров наночастиц с помощью эталонных средств измерений, основанная на применении унифицированной классификационной схемы источников погрешностей и позволившая впервые установить погрешность передачи единицы длины – метра измерительной системой, реализующей интерферометрический метод измерения, составившую 2,0 % при измерении частиц на подложке в вертикальной плоскости и 0,6 %, при измерении частиц на подложке в латеральной плоскости, измерительной системой, реализующей метод динамического рассеяния света, составившую 1,1 % при измерении частиц в жидкости, измерительной системой, реализующей метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, составившую 2,4 % при измерении частиц в воздухе [1, 2, 4, 5, 8, 12, 18].

3. Разработаны схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц, построенные на основании сформулированных принципов, включающие в себя процедуры испытания рабочих эталонов на основе стандартных образцов размеров наночастиц на созданном эталонном комплексе средств измерений размеров наночастиц и позволяющие обеспечить прослеживаемость измерений размеров наночастиц оборудованием предприятий реального сектора экономики к единицам Международной системы единиц (СИ) [9, 14, 17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанный эталонный комплекс может быть использован для воспроизведения и передачи размера единицы длины – метра в области измерения размеров частиц менее точным средствам измерений, для утверждения типа ГСО размера микро- и наночастиц национальным метрологическим институтом и организациями, выполняющими метрологическую оценку средств измерений размеров микро- и наночастиц. Разработанные проекты методик выполнения измерений размеров

частиц могут быть утверждены и допущены к применению для утверждения типов ГСО размеров микро- и наночастиц, находящихся на подложках, в жидкости и в воздухе. Разработанные схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц могут быть использованы национальным метрологическим институтом и организациями, выполняющими метрологическую оценку средств измерений размеров микро- и наночастиц, для обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц в соответствии с требованиями Закона об обеспечении единства измерений Республики Беларусь.

2. Основные результаты работы внедрены в БелГИМ при:

– разработке и исследованиях Национального эталона единицы длины – метра в нанометровом диапазоне НЭ РБ 65-22; утвержден постановлением Госстандарта от 22.04.2022 № 37;

– разработке и исследованиях Эталонного комплекса метрологического контроля средств измерений параметров дисперсных сред;

– разработке структуры Стенда испытания газовых фильтроэлементов, предназначенного для проведения стендовых испытаний газовых фильтроэлементов, имеющих различную структуру и предназначенных для использования в фильтрах очистки сжатого воздуха, газов (в том числе природного и попутного) от механических примесей и жидких аэрозолей и разработке методики аттестации испытательного оборудования МА.МН 798-2022 «Стенд испытаний газовых фильтроэлементов»;

– разработке методик калибровки МРП МК 41 01.680-2021 «Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика калибровки»; МРП МК 41 01.682-2021 «Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика калибровки»; МРП МК 41 01.684 -2021 «Меры высоты ступени. Методика калибровки»; МРП МК 41 01.683 -2021 «Меры ширины шага. Методика калибровки»; МРП МК 41 09.668-2021 «Анализаторы пыли. Методика калибровки»; МРП МК 41 01.666-2021 «Счетчики аэрозольных частиц. Методика калибровки».

Выполнение перечисленных работ подтверждается актом о практическом использовании результатов исследований и справкой о внедрении результатов диссертационной работы в промышленности.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах

1. Багдюн, А. А. Обеспечение прослеживаемости измерений диаметров наночастиц методом атомно-силовой микроскопии на базе наноизмерительной машины NMM / А. А. Багдюн // Метрология и приборостроение. – 2021. – № 2. – С. 26–28.
2. Solomakho, V. L. Determination of the Error in Transferring of Length Unit's Size when Measuring the Nanoparticles' Diameter Using an Analyzer of Particles' Differential Electrical Mobility / V. L. Solomakho, A. A. Bagdun // Приборы и методы измерений. – 2021. – V. 12, No 3. – P. 194–201.
3. Багдюн, А. А. Эталонный комплекс для средств измерений параметров дисперсных сред / А. А. Багдюн, В. Б. Макаревич, Е. В. Филистович, А. Н. Горошкова, Д. В. Ивашенко // Метрология и приборостроение. – 2021. – № 4. – С. 3–8.
4. Багдюн, А. А. Определение погрешности измерения диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 32–37.
5. Багдюн, А. А. Погрешность передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений при использовании наноизмерительной машины / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізика-тэхнічных навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 86–93.
6. Багдюн, А. А. Современные подходы к определению размера наночастиц / А. А. Багдюн, В. Б. Макаревич // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 2. – С. 26–28.
7. Багдюн, А. А. Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Наука и техника. – 2022. – № 6. – С. 473–479.
8. Багдюн, А. А. Расчет погрешности измерения диаметра наночастиц при использовании в качестве средства измерений наноизмерительной машины NMM-1 / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Метрология и приборостроение. – 2023. – № 2. – С. 21–28.
9. Багдюн, А. А. Метрологическая прослеживаемость результатов измерений размеров наночастиц / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Метрология и приборостроение. – 2023. – № 2. – С. 29–34.

Статьи в сборниках материалов и трудов конференций

10. Соломахо, В. Л. Методы измерений наноразмерных частиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Приборостроение-2019 : материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 246–248.
11. Соломахо, В. Л. Современное состояние обеспечения прослеживаемости в области измерения наночастиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Качество, стандартизация, контроль – теория и практика: матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. Киев. – АТМ Украины, 2020. – С. 15–17.
12. Соломахо, В. Л. Экспериментальное исследование альтернативных методов создания стандартных образцов размера частиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Приборостроение-2020 : материалы 13-й Международной научно-технической

конференции, Минск, 18–20 ноября 2020 г. / редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 163–165.

13. Соломахо, В. Л. Современные подходы к определению размера наночастиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : тезисы докладов 35-ой Международной научно-технической конференции в рамках международной специализированной выставки «Машиностроение-2021», Минск, 8 апреля 2021 г. / редкол.: В. К. Шелег [и др.]. – Минск : Бизнесофсет, 2021. – С. 108–109.

14. Багдюн, А. А. Стандартные образцы как основа обеспечения прослеживаемости измерений диаметров наночастиц/ А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо, Д. В. Ивашенко // Тезисы докладов 14-й международной научно-технической конференции «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2021». – Минск: БНТУ, 2021. – С. 143–145.

15. Багдюн, А. А. Обеспечение единства измерений размеров твердых частиц в нанометровом диапазоне = Ensuring the unity of measurement of solid particles in the nanopmeter range / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо, В. Б. Макаревич // Приборостроение-2022 : материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16–18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 10–12.

Тезисы докладов конференций

16. Ивашенко, Д. В. Эталонный комплекс метрологического обеспечения средств измерений параметров дисперсных сред / Д. В. Ивашенко, А. А. Багдюн // Метрология физико-химических измерений : тезисы докладов 5-ой Международ. науч.-техн. конф., Менделеево, 14–16 сент. 2021 г. / ФГУП «ВНИИФТРИ» ; отв. за вып. Н. Г. Оганян. – Солнечногорск, 2021. – С. 40–45.

17. Багдюн, А. А. Схема прослеживаемости измерений диаметров наночастиц / А. А. Багдюн, А. Н. Горошкова, В. Л. Соломахо // Метрология-2022 : тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5–6 апреля 2022 г. / Белорус. госуд. инст-т метрологии ; редкол.: В. Б. Татарицкий [и др.]. – Минск, 2022. – С. 142–145.

18. Ивашенко, Д. В. Предварительные результаты испытаний стандартных образцов размера частиц / Д. В. Ивашенко, А. А. Багдюн // Метрология физико-химических измерений : тезисы докладов 6-ой Междунар. науч.-техн. конф., Менделеево, 5–8 сент. 2023 г. / ФГУП «ВНИИФТРИ» ; отв. за вып. Н. Г. Оганян. – Солнечногорск, 2023. – С. 186–187.

Патенты

19. Эталонный комплекс метрологического контроля средств измерений параметров дисперсных сред : полез. модель ВУ 12997 / В. Б. Макаревич, А. Н. Горошкова, А. А. Багдюн, Е. В. Филистович, Д. В. Ивашенко. – Оpubл. 30.08.2022.

20. Эталон единицы длины в нанометровом диапазоне измерений : полез. модель ВУ 13174 / В. Б. Макаревич, А. А. Багдюн, М. А. Горовая. – Оpubл. 30.04.2023.

РЭЗЮМЭ

Багдзюн Аляксандр Андрэвіч

Метралагічнае забеспячэнне вымярэнняў памераў наначасціц

Ключавыя словы: памер наначасціц, памылка перадачы адзінкі велічыні, схема метралагічнага прасочвання за вынікамі вымярэнняў.

Мэта работы: развіццё сістэмы забеспячэння адзінства вымярэнняў Рэспублікі Беларусь шляхам стварэння эталоннага абсталявання і распрацоўкі схем прасочвання за вынікамі вымярэнняў наначасціц, якія знаходзяцца на падкладцы, у вадкасці і ў паветры.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: эксперыментальна-аналітычны метад ацэнкі памылкі перадачы адзінкі памеру наначасціц вымяральных сістэм, якія прымяняюць інтэрфераметрычны метад вымярэння, метад дынамічнага рассейвання святла і метад аналізу дыферэнцыяльнай электрычнай рухомасці часціц.

Атрыманьня вынікі і іх навізна: распрацаваны эталонны комплекс, які складаецца з вымяральной сістэмы, які рэалізуе інтэрфераметрычны метад вымярэння, вымяральной сістэмы, якая рэалізуе метад дынамічнага рассейвання святла, вымяральной сістэмы, які рэалізуе метад аналізу дыферэнцыяльнай электрычнай рухомасці часціц, што дазваляе праводзіць вымярэнні на падкладцы, у вадкасці і ў паветры; разлічана памылка перадачы адзінкі даўжыні – метра для кожнай з вымяральных сістэм, якія ўваходзяць у склад эталоннага комплексу; распрацаваны схемы метралагічнага прасочвання за вынікамі вымярэнняў памераў наначасціц, якія знаходзяцца на падкладках, у паветры і ў вадкасці.

Ступень выкарыстання і вобласць ужывання: распрацаваны эталонны комплекс можа быць выкарыстаны для ўзнаўлення і перадачы памеру адзінкі даўжыні – метра ў вобласці вымярэння памераў часціц меней дакладным сродкам вымярэнняў, для зацвярджэння тыпу дзяржаўных стандартных узораў (ДСУ) памеру мікра- і наначасціц нацыянальным метралагічным інстытутам і арганізацыямі, якія выконваюць метралагічную ацэнку сродкаў вымярэнняў памераў мікра- і наначасціц. Распрацаваныя практычныя метады выканання вымярэнняў памераў часціц могуць быць зацверджаны і дапушчаны да ўжывання для зацвярджэння тыпаў ДСУ памераў мікра- і наначасціц, змешчаных на падкладках, у вадкасці і ў паветры.

РЕЗЮМЕ

Багдюн Александр Андреевич

Метрологическое обеспечение измерений размеров наночастиц

Ключевые слова: размер наночастиц, погрешность передачи единицы величины, схема метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Цель работы: развитие системы обеспечения единства измерений Республики Беларусь путем создания эталонного оборудования и разработки схем прослеживаемости результатов измерений наночастиц находящихся на подложке, в жидкости и в воздухе.

Методы исследования и использованная аппаратура: экспериментально-аналитический метод оценки погрешности передачи единицы размера наночастиц измерительных систем, применяющих интерферометрический метод измерения, метод динамического рассеяния света и метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц.

Полученные результаты и их новизна: разработан эталонный комплекс, состоящий из измерительной системы, реализующий интерферометрический метод измерения, измерительной системы, реализующей метод динамического рассеяния света, измерительной системы, реализующий метод анализа дифференциальной электрической подвижности частиц, позволяющий проводить измерения наночастиц находящихся на подложках, в жидкости и в воздухе; рассчитана погрешность передачи единицы длины – метра для каждой из измерительных систем, входящих в состав эталонного комплекса; разработаны схемы метрологической прослеживаемости результатов измерений размеров наночастиц, находящихся на подложках, в воздухе и в жидкости.

Степень использования и область применения: разработанный эталонный комплекс может быть использован для воспроизведения и передачи размера единицы длины – метра в области измерения размеров частиц менее точным средствам измерений, для утверждения типа государственных стандартных образцов (ГСО) размера микро- и наночастиц национальным метрологическим институтом и организациями, выполняющими метрологическую оценку средств измерений размеров микро- и наночастиц. Разработанные проекты методик выполнения измерений размеров частиц могут быть утверждены и допущены к применению для утверждения типов ГСО размеров микро- и наночастиц, находящихся на подложках, в жидкости и в воздухе.

SUMMARY

Bagdun Alexandr Andreevich

Metrological support for measuring nanoparticle sizes

Key words: nanoparticle size, transmission error of a unit of value, metrological traceability scheme for measurement results.

The purpose of the work: development of a system for ensuring the uniformity of measurements in the Republic of Belarus by creating reference equipment and developing traceability schemes for measurement results of nanoparticles located on a substrate, in liquid and in air.

Research methods and equipment used: experimental and analytical method for assessing the transmission error of a unit of size of nanoparticles of measuring systems using the interferometric measurement method, the method of dynamic light scattering and the method of analyzing the differential electrical mobility of particles.

Results obtained and novelty thereof: a reference complex has been developed, consisting of a measuring system that implements the interferometric measurement method, a measuring system that implements the method of dynamic light scattering, a measuring system that implements the method of analyzing the differential electrical mobility of particles, allowing measurements of nanoparticles located on substrates in liquids and in the air; the transmission error of a unit of length – a meter was calculated for each of the measuring systems included in the reference complex; schemes have been developed for metrological traceability of measurement results of the sizes of nanoparticles located on substrates, in air and in liquid.

Scope and application: the developed reference complex can be used to reproduce and transfer the size of a unit of length - a meter in the field of measuring particle sizes to less precise measuring instruments, for type approval of state standard samples (GSO) of the size of micro- and nanoparticles by the national metrological institute and organizations, performing metrological assessment of instruments for measuring the size of micro- and nanoparticles. The developed draft methods for measuring particle sizes can be approved and approved for use to approve types of GSO sizes of micro- and nanoparticles located on substrates, in liquids and in air.

Научное издание

БАГДЮН
Александр Андреевич

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.15 – метрология и метрологическое обеспечение

В авторской редакции

Подписано в печать 14.11.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 1,39. Тираж 65. Заказ 751.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.