

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-473-479>

УДК 531.713.8-022.532:620.3

Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц

Инж. А. А. Багдюн^{1,2)}, докт. техн. наук, проф. В. Л. Соломахо²⁾

¹⁾Белорусский государственный институт метрологии (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Предлагается набор технических средств для решения задачи единообразия измерений размеров микро- и наночастиц. Для этого необходимо обеспечивать прослеживаемость измерений размеров частиц к единице длины – метру, а также эквивалентных диаметров, применяемых при измерениях в различных дисперсных средах (аэрозолях и взвесах). Чтобы обеспечить прослеживаемость измерений диаметра частиц к метру, следует использовать наноизмерительную машину с атомно-силовым микроскопом в качестве зондирующей системы. В статье показана схема измерительной системы, описаны принцип действия машины и метод измерения размеров частиц. Для обеспечения прослеживаемости измерений гидродинамического диаметра наночастиц, характеризующего частицы, находящиеся в жидкости (взвеси), предложено использовать анализатор размера наночастиц, реализующий метод динамического рассеяния света. Приведена схема анализатора с описанием принципа измерения размера наночастиц методом динамического рассеяния света. Представлена схема колонны анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц для обеспечения прослеживаемости измерений их диаметра, эквивалентного по электрической подвижности. Диаметр обычно применяется для характеристики частиц, находящихся в состоянии аэрозоля. Приведена схема анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц с описанием принципа действия, выведена формула расчета диаметра частиц.

Ключевые слова: наночастица, диаметр, динамическое рассеяние света, анализатор электрической подвижности частиц, наноизмерительная машина

Для цитирования: Багдюн, А. А. Методы и технические средства обеспечения единства измерений размера наночастиц / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 6. С. 473–479. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-473-479>

Methods and Technical Means for Ensuring Uniformity of Nanoparticle Size Measurements

A. A. Bagdun¹⁾, V. L. Solomakho²⁾

¹⁾Belarusian State Institute of Metrology (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper proposes a set of technical tools for solving the problem of ensuring the uniformity of measurements of micro- and nanoparticles. To do this, it is necessary to ensure the traceability of particle size measurements to a unit of length –

Адрес для переписки

Соломахо Владимир Леонтьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-11-20
v.solomakho@gmail.com

Address for correspondence

Solomakho Vladimir L.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-11-20
v.solomakho@gmail.com

a meter, as well as equivalent diameters used in measurements in various dispersed media (aerosols and suspensions). To ensure traceability of particle diameter measurements to the meter, it is proposed to use a nanomeasuring machine with an atomic force microscope as a probing system. The paper presents a diagram of the measuring system, describes the principle of operation of the machine and the method for measuring particle sizes. The main alleged sources of errors in particle measurement by this method are also identified. To ensure the traceability of measurements of the hydrodynamic diameter of nanoparticles, which characterizes particles in a liquid (suspension), it is proposed to use a nanoparticle size analyzer that implements the method of dynamic light scattering. The scheme of the analyzer with a description of the principle of measuring the size of nanoparticles by the method of dynamic light scattering is presented in the paper. The scheme of the column of the analyzer of the differential electrical mobility of particles is presented to ensure the traceability of measurements of their diameter, which is equivalent in electrical mobility. Diameter is usually used to characterize particles in the aerosol state. A diagram of an analyzer for the differential electric mobility of particles is given with a description of the operating principle, a formula for calculating the particle diameter is derived.

Keywords: nanoparticle, diameter, dynamic light scattering, particle electrical mobility analyzer, nanomeasuring machine

For citation: Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2022) Methods and Technical Means for Ensuring Uniformity of Nanoparticle Size Measurements. *Science and Technique*. 21 (6), 473–479. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-6-480-473-479> (in Russian)

Введение

Размер наночастиц – базовый параметр, влияющий на механические, физико-химические, электрические, оптические и другие свойства конечного продукта нанотехнологий. Поэтому важно оперативно и точно контролировать размерные параметры наночастиц, что возможно при наличии системы обеспечения метрологической прослеживаемости измерений их геометрических размеров. В зависимости от применяемых технологий наночастицы могут пребывать в различных исходных состояниях (например, в виде аэрозоля, взвеси, порошка), что делает процедуру обеспечения прослеживаемости измерений размеров наночастиц сложной многовекторной задачей. В [1] изучены мировой опыт обеспечения прослеживаемости измерений размеров наночастиц, методики и технические средства, позволяющие фрагментарно решать эту сложную метрологическую задачу.

Для системного решения проблемы необходимо создать комплекс оборудования, предназначенный для определения размеров наночастиц в дисперсных средах, который позволяет обеспечивать измерения частиц тремя методами – с помощью: наноизмерительной машины, определяющей действительный диаметр частиц в линейных величинах (прослеживаемый к единице длины – метру); анализатора размера наночастиц, позволяющего определять методом динамического рассеяния света гидродинамический диаметр частиц, находящихся в растворах в виде взвесей; анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц, позволяющего по их электрической подвижности определять размер частиц, находящихся в аэрозолях.

Физические принципы построения и конструктивные особенности оборудования, применяемого для контроля размеров наночастиц

Технические средства и методика измерения линейных размеров наночастиц. Основой оборудования, применяемого для измерения линейных размеров наночастиц, является наноизмерительная машина (NMM), реализующая интерферометрический метод измерения в полном соответствии со стандартным определением единицы длины – метра. Необходимая точность измерения наноизмерительной машины достигается за счет принципа компаратора Аббе по всем трем измерительным осям.

В конструкции NMM (рис. 1) зондирующая система и три средства измерения длины – интерферометры 1, 2, 3 – крепятся на корпусе, представляющем собой жесткую рамную конструкцию. Материал рамы – ситалл, имеющий малый коэффициент теплового расширения, что позволяет минимизировать погрешность измерения длины из-за изменений температуры. Корпус с измерительными интерферометрами и зондирующей системой установлен на гранитном основании. Температурные коэффициенты расширения рамы и гранитного основания существенно различаются. Для предотвращения возможных дополнительных механических напряжений и деформации в случае соединения двух частей в «единую» сборочную конструкцию и, как следствие, возникновения погрешности измерения размера наночастиц рама и гранитное основание соединяются между собой только в трех точках опоры. Направляюще-приводная система жестко закреплена на базирующей плоскости гранитного основания. Корпус и соединительные элементы

направляюще-приводной системы сконструированы отдельно и, таким образом, механически отделены друг от друга. Использование данной компоновки предотвращает механическую обратную связь от системы направляющих приводов к корпусу, на котором установлены измерительные интерферометры. Интерферометры установлены таким образом, что точка пересечения их оптических осей, совпадающих с линиями измерений по осям X , Y , Z , совмещена с точкой контакта зондирующей системы и объекта измерения.

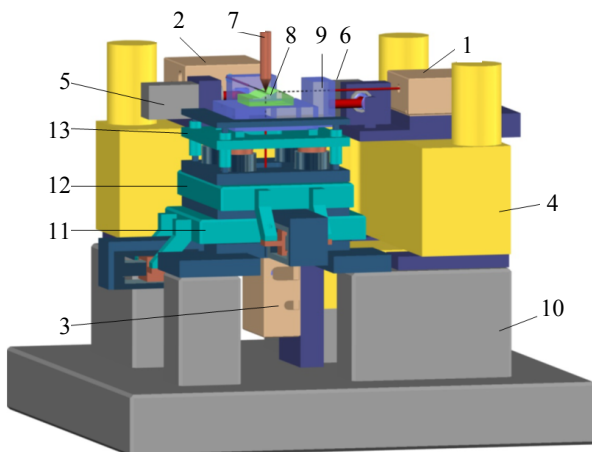


Рис. 1. Схема измерительной системы NMM: 1, 2, 3 – X -, Y - и Z -интерферометр; 4 – корпус; 5, 6 – угловой датчик; 7 – зондирующая система; 8 – объект измерения; 9 – угловое зеркало; 10 – гранитное основание; 11, 12, 13 – платформа, перемещающаяся по осям X , Y , Z соответственно

Fig. 1. Diagram of the measuring system NMM: 1, 2, 3 – X -, Y - and Z -interferometer; 4 – frame; 5, 6 – angle sensor; 7 – probing system; 8 – measurement object; 9 – corner mirror; 10 – granite base; 11, 12, 13 – platform moving along the axes X , Y , Z respectively

Большая масса корпуса и зондирующей системы может сильно ограничить динамику позиционирования и измерения. Во время измерений необходимое взаимное положение друг относительно друга объекта измерения, зондирующей системы и корпуса достигается путем последовательных перемещений одного из указанных узлов при неподвижном состоянии двух других. Одновременное перемещение зондирующей системы и корпуса не допускается, поскольку последний, обладая большой массой, из-за возникающих постоянно изменяющихся динамических нагрузок может деформироваться во время движения, что неизбежно приведет к погрешности измерения. По этим причинам измерительные перемещения осуществляются

путем позиционирования объекта измерения, обладающего наименьшей массой.

В качестве средств измерений длины в наноизмерительной машине используются интерферометры, которые обладают необходимой разрешающей способностью и точностью измерения и позволяют обеспечивать прослеживаемость измерений к единице длины – метру. Объект измерения устанавливается на приспособление в виде углового зеркала, внешние грани которого служат оптическими отражателями для измерительных интерферометров. Объект лежит поверх углового зеркала и перемещается вместе с ним. Угловое зеркало установлено на трехкоординатном столе, представляющем собой комбинацию установочных платформ и систем приводов, обеспечивающих независимое перемещение платформ по осям X , Y , Z . В основу конструкции положена установочная платформа, которая крепится к основанию и обеспечивает перемещение узла по оси X . На ней крепится платформа, обеспечивающая перемещение узла по оси Y , к которой, в свою очередь, – платформа, обеспечивающая перемещение узла по оси Z . Платформы имеют технологические каналы для прохождения лучей интерферометра. Поскольку измерительный луч не должен прерываться, размеры каналов соответствуют рабочему диапазону перемещений.

Конструкция направляющих для каждой из осей X и Y представляет собой комбинацию роликовой направляющей и электромагнитного привода. Для оси Z используются три круглых коротких роликовых направляющих и четыре электромагнитных привода. Из-за малой длины направляющих риски возникновения дополнительных погрешностей, вызванных неточностью их угловой установки при монтаже, значительно выше, чем погрешности по другим осям. Дополнительно угловые датчики 5, 6 (рис. 1), установленные на корпусе, измеряют наклон углового зеркала на его обеих боковых сторонах. Управление углом наклона относительно осей X и Y возможно с помощью данных измерения угловых датчиков и использования четырех отдельных приводов. Вся система направляющих и приводов имеет канал для луча интерферометра оси Z . Поскольку измерительный луч не должен прерываться, размер канала соответствует рабочему диапазону перемещений. Основные технические характеристики наноизмерительной машины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики
наноизмерительной машины
Specifications of nanomeasuring machine

| | |
|------------------------|---|
| Диапазон измерений, мм | 25×25×5 |
| Разрешение, нм | 0,1 |
| Встраиваемые датчики | Атомно-силовой микроскоп, лазерный фокусный микроскоп, интерферометр белого света, щуп для 3D-измерений |

Как видно из табл. 1, в NMM можно встраивать широкий спектр контактных и бесконтактных датчиков (зондирующих систем). Для измерения диаметра наночастиц в качестве зондирующей системы применяется атомно-силовой микроскоп (АСМ). После контакта с объектом измерений сигнал АСМ используется для регулирования вертикального положения стола, что дает возможность сканировать поверхность объекта измерения. Применение NMM с АСМ позволяет реализовать два способа измерения размера наночастиц – в вертикальной и латеральной плоскостях.

При измерении наночастиц в вертикальной плоскости определяется расстояние между вершиной одиночной частицы и подложкой (рис. 2), в латеральной плоскости – расстояние между двумя вершинами двух соседних частиц (рис. 3).

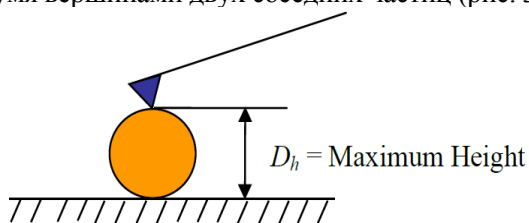


Рис. 2. Схема измерения наночастицы в вертикальной плоскости

Fig. 2. Scheme of measurement of nanoparticles in the vertical plane

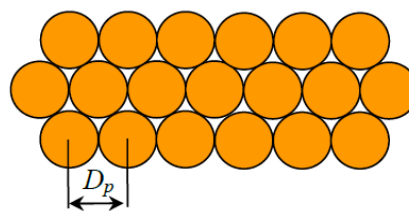


Рис. 3. Схема измерения наночастицы в латеральной плоскости

Fig. 3. Scheme for measuring a nanoparticle in the lateral plane

В [2] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц с помощью наноизмерительной машины, а в [3–6] – методы их количественной оценки.

Технические средства и методика измерения эквивалентного диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света. Динамическое рассеяние света (ДРС) – физический принцип, положенный в основу метода определения свойств и размера наночастиц (их гидродинамического диаметра) в жидкой фазе, который является эталонным для такого вида измерений в соответствии со стандартом ISO 2241:2017 «Гранулометрический анализ. Динамическое рассеяние света (DLS)». Техническое средство реализации этого метода – анализатор размера наночастиц, схема которого представлена на рис. 4.

Источник излучения, в качестве которого выступает лазер, обеспечивающий когерентность и монохроматичность генерируемого светового потока, испускает оптическое излучение, попадающее в аттенуатор. Это устройство ослабляет интенсивность оптических колебаний (испускаемого излучения) до уровня, подходящего для приемника излучения, не искажая при этом форму сигнала. Падающее излучение попадает в ячейку, содержащую образец наночастиц, после контакта с которыми часть света преломляется, а часть рассеивается.

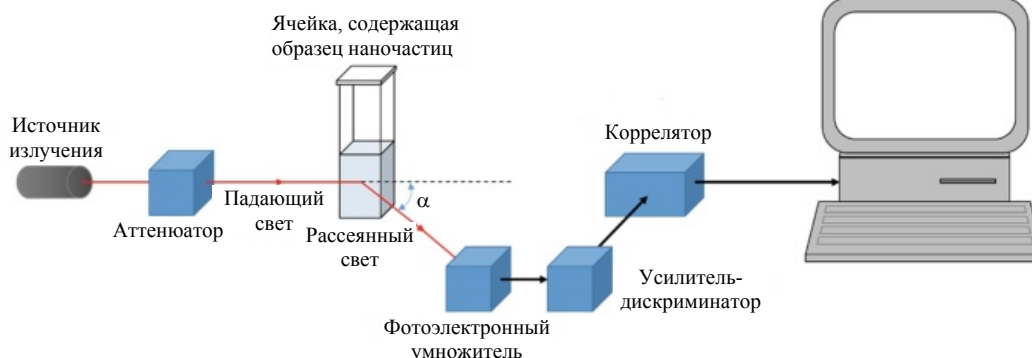


Рис. 4. Схема анализатора размера наночастиц

Fig. 4. Diagram of nanoparticle size analyzer

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

Гидродинамический диаметр выражается аналитически путем решения уравнения

$$d = \frac{k_B T \left[4\pi n \sin\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \right]^2}{3\pi\Gamma\eta\lambda^2}, \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана; T – температура; n – показатель преломления частиц и дисперсионной среды; ϑ – угол сбора рассеянного излучения; Γ – скорость затухания автокорреляционной функции; η – вязкость дисперсионной среды; λ – длина волны лазерного излучения.

Технические характеристики анализатора размера наночастиц приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики анализатора размера наночастиц

Specifications of nanoparticle size analyzer

| | | |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Диапазон измерений | диаметров частиц, нм | От 0,6 до 4000 |
| | дзета-потенциала, мВ | От –200 до 200 |
| Диапазон молекулярного веса, г/моль | | $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^7$ |
| Величина пробы для измерения, мл | | От 0,012 до 4,000 |

В [7] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц методом динамического рассеяния света. Методики количественной оценки параметров, входящих в (1), изложены в [8–11].

Технические средства и методика измерения наночастиц путем анализа их дифференциальной электрической подвижности. Система анализа дифференциальной электрической подвижности позволяет разделять частицы аэрозоля на основании их электрической подвижности и формировать на выходе поток монодисперсных частиц, обеспечивая их счет и соответственно определение размеров. Система включает три основных устройства: электростатический классификатор, колонну анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц и конденсационный счетчик частиц.

Электростатический классификатор включает входной импактор, отфильтровывающий

частицы размером более 2 мкм, расходомер, предназначенный для стабилизации скорости истечения потока обдува, нейтрализатор аэрозолей – биполярное зарядное устройство, в котором частицы сталкиваются с биполярными ионами, что приводит к равновесному распределению заряда, зависящего от размера частицы и источника высокого напряжения.

Колонна анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц (рис. 5) представляет собой длинную цилиндрическую камеру радиусом 1,958 см. Внутри ее находится стержень радиусом 0,937 см, концентричный стенкам камеры, расположенный таким образом, чтобы между стержнем и стенками камеры образовалось кольцевое пространство. Поток аэрозоля попадает в верхнюю часть камеры и соединяется с потоком чистого воздуха обдува, который создается насосом, помещенным в электростатический классификатор, фильтруется и контролируется термометром, гигрометром, манометром и высокоточным расходомером. Для достижения максимальной точности скорость потока воздуха обдува должна быть минимум в десять раз больше скорости потока входящего аэрозоля, измеренного входным импактором.

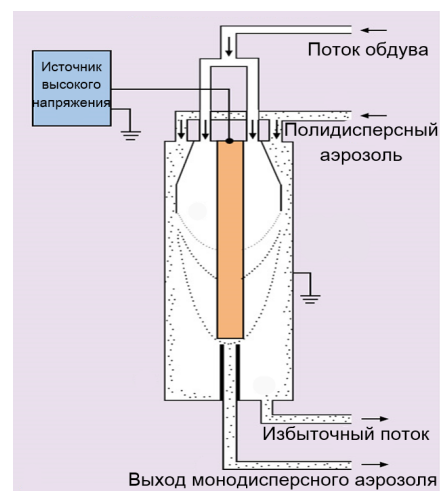


Рис. 5. Схема колонны анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц

Fig. 5. Scheme of the column of the analyzer for differential electrical mobility of particles

Объединенный поток поступает в зазор между коаксиально расположенными центральным стержнем и наружным цилиндром. Напряжение на стержень подается от источника высокого напряжения, находящегося в классификаторе, и регулируется в диапазоне от 0 до 10000 В. Внешняя цилиндрическая камера поддерживается потенциалом земли, что позволяет электрическому полю равномерно распространять-

ся в кольцевом пространстве ко дну камеры. По пути заряженные частицы движутся к центральному стержню из-за разности потенциалов напряжения. Малый радиальный зазор и высокая равномерность электрического поля создают необходимые условия, позволяющие проводить измерения электрической подвижности с высоким разрешением.

Небольшая щель в стержне дает возможность классифицировать частицы с электрической подвижностью Z , вычисляемой по формуле

$$Z = \frac{q_{sh}}{2\pi UL} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (2)$$

где q_{sh} – скорость потока воздуха обдува; U – напряжение на стержне; L – длина от входа аэрозоля до щели; r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы кольцевого пространства соответственно.

При регулировании напряжение отбираются частицы с узким диапазоном подвижности. Выход практически моноразмерных частиц достигается путем выбора частиц на основании их подвижности. Поток, состоящий из моноразмерных частиц, проходит через отверстие стержня и выходит из классификатора, затем направляется в конденсационный счетчик частиц, где подсчитывается их количество. Остальной поток покидает классификатор через отвод избыточного потока и попадает в систему рециркуляции, которая прокачивает поток через классификатор, обеспечивая его необходимый объем и кондиционируя перед возвратом в виде потока воздуха обдува. Основные технические характеристики анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц
Technical characteristics of differential electrical particle mobility analyzer

| | | |
|---|---|----------------|
| Диапазон измерений диаметров частиц, нм | | От 2 до 1000 |
| Диапазон | скорости потока измеряемого аэрозоля, л/мин | От 0,2 до 2,1 |
| | скорости потока воздуха обдува, л/мин | От 2 до 30 |
| | напряжений анализатора, В | От 10 до 10000 |

Электрическая подвижность частицы Z равна скорости v заряженной частицы, деленной на напряженность электрического поля E :

$$Z = \frac{v}{E}. \quad (3)$$

Электрическая подвижность вычисляется из баланса электрических сил, возникающих

из-за заряда на частице, и силы сопротивления, определяемой законом Стокса:

$$neE = \frac{3\pi\mu v D_p}{C(D_p)}, \quad (4)$$

где n – количество зарядов; e – заряд электрона; μ – вязкость газа; D_p – диаметр частицы; $C(D_p)$ – коррекция скольжения Каннингема.

Из уравнений (2) и (4) можно определить диаметр частицы

$$D_p = \frac{eC(D_p)2UL}{q_{sh}3\mu \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (5)$$

В [12] выделены основные источники погрешностей, возникающих при измерении размеров частиц с помощью анализатора дифференциальной электрической подвижности частиц, а в [13–15] – методы их количественной оценки.

ВЫВОДЫ

1. По используемым методикам измерений и предварительно полученным техническим и метрологическим характеристикам описанный комплекс средств измерений соответствует мировым аналогам.

2. После проведения юридических и административных процедур комплекс средств измерений может быть принят в качестве эталона в области определения размеров наночастиц. Это означает возможность использования комплекса для метрологической оценки государственных стандартных образцов размеров наночастиц и обеспечения прослеживаемости их измерений к единице длины – метру.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 Международ. науч.-техн. конф. Киев: АТМ Украины, 2020. С. 15–17.
2. 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 фізіка-тэхнічных навук. 2022. Т. 67, № 1. С. 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>.
3. Leach, R. Abbe Error/Offset / R. Leach // CIRP Encyclopedia of Production Engineering / R. Leach, eds. L. Laperrière, G. Reinhart. Springer, 2014. P. 1–4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1.

4. Edlén, B. The Refractive Index of Air / B. Edlén // *Metrologia*. 1966. No 2. P. 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>.
5. Jones, F. E. The Refractivity of Air / F. E. Jones // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1981. Vol. 86, No 1. P. 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>.
6. Schmidt, I. Beiträge zur Verringerung der Positionierunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine / I. Schmidt. Ilmenau University of Technology, 2009. 25 p.
7. Багдун, А. А. Определение погрешности измерения диаметра наночастиц методом динамического рассеяния света / А. А. Багдун, В. Л. Соломахо // *Неразрушающий контроль и диагностика*. 2021. № 4. С. 32–37.
8. Garnæs, J. Diameter Measurements of Polystyrene Particles with Atomic Force Microscopy / J. Garnæs // *Measurement Science and Technology*. 2011. Vol. 22, Iss. 9. P. 22–094001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094001>.
9. Measuring Sub Nanometre Sizes Using Dynamic Light Scattering / M. Kaszuba [et al.] // *Journal of Nanoparticle Research*. 2008. No 10. P. 823–829. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9317-4>.
10. Uncertainty Analysis of Measurements of the Size of Nanoparticles in Aqueous Solutions Using Dynamic Light Scattering / S. Y. Kwon [et al.] // *Metrologia*. 2011. Vol. 48, Iss. 5. P. 417–425. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/024>.
11. Mohr, P. J. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998 / P. J. Mohr, B. N. Taylor // *Reviews of Modern Physics*. 2000. Vol. 72, No 2. P. 351–495. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.72.351>.
12. 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. Т. 12, № 3. P. 194–201. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2021-12-3-194-201>.
13. Precise Measurement of the Size of Nanoparticles by Dynamic Light Scattering with Uncertainty Analysis / K. Takahashi [et al.] // *Particle & Particle Systems Characterization*. 2008. Vol. 25, No 1. P. 31–38. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700015>.
14. Bipolar Charge Distribution of a Soft X-Ray Diffusion Charger / L. Tigges [et al.] // *Journal of Aerosol Science*. 2015. Vol. 90. P. 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.002>.
15. Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0.5 to 83 / J. H. Kim [et al.] // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2005. Vol. 110, No 1. P. 31–54. <https://doi.org/10.6028/jres.110.005>.
2. Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2022) The Error of Transferring the Size of a Unit of Length – a Meter in the Nanometer Range Using the Nanomeasuring Machine. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 67 (1), 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93> (in Russian).
3. Leach R. (2014) Abbe Error/Offset. Laperrière L., Reinhart G. (eds.) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 1–4. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1.
4. Edlén B. (1966) The Refractive Index of Air. *Metrologia*, (2), 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>.
5. Jones F. E. (1981) The Refractivity of Air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 86 (1), 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>.
6. Schmidt I. (2009) *Beiträge Zur Verringerung der Positionierunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine*. Ilmenau University of Technology. 25 (in German).
7. Bagdun A. A., Solomakho V. L. (2021) Determination of the Measurement Error of the Diameter of Nanoparticles by the Method of Dynamic Light Scattering. *Nerazrushayushchiy Kontrol i Diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], (4), 32–37 (in Russian).
8. Garnæs J. (2011) Diameter Measurements of Polystyrene Particles with Atomic Force Microscopy. *Measurement Science and Technology*, 22 (9), 22–094001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/9/094001>.
9. Kaszuba M., McKnight D., Connah M. T. [et al.] (2008) Measuring Sub Nanometre Sizes Using Dynamic Light Scattering. *Journal of Nanoparticle Research*, 10, 823–829. <https://doi.org/10.1007/s11051-007-9317-4>.
10. Kwon S. Y., Kim Y.-G., Lee S. H., Moon J. H. (2011) Uncertainty Analysis of Measurements of the Size of Nanoparticles in Aqueous Solutions Using Dynamic Light Scattering. *Metrologia*, 48 (5), 417–425. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/5/024>.
11. Mohr P. J., Taylor B. N. (2000) CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998. *Reviews of Modern Physics*, 72 (2), 351–495. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.72.351>.
12. Solomakho V. L., Bagdun A. A. (2021) Determination of the Error in Transferring of Length Unit's Size when Measuring the Nanoparticles' Diameter Using an Analyzer of Particles' Differential Electrical Mobility. *Pribery i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, 12 (3), 194–201. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2021-12-3-194-201>.
13. Takahashi K., Kato H., Saito T., Matsuyama S., Kinugasa S. (2008) Precise Measurement of the Size of Nanoparticles by Dynamic Light Scattering with Uncertainty Analysis. *Particle & Particle Systems Characterization*, 25 (1), 31–38. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700015>.
14. Tigges L., Wiedensohler A., Weinhold K., Gandhi J., Schmid H.-J. (2015) Bipolar Charge Distribution of a Soft X-Ray Diffusion Charger. *Journal of Aerosol Science*, 90, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.07.002>.
15. Kim J. H., Mulholland G. W., Kukuck S. R., Pui D. Y. H. (2005) Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number from 0.5 to 83. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 110 (1), 31–54. <https://doi.org/10.6028/jres.110.005>.

Поступила 06.06.2022

Подписана в печать 09.08.2022

Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Solomakho V. L., Bagdun A. A. (2020) Current State of Traceability in the Field of Nanoparticle Measurement. *Kachestvo, Standartizatsiya, Kontrol' – Teoriya i Praktika: Mater. XX Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Quality, Standardization, Control – Theory and Practice: Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference]. Kyiv, ATM Ukraine, 15–17 (in Russian).

Received: 06.06.2022

Accepted: 09.08.2022

Published online: 30.11.2022