



Методы и средства исследования микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозольных образований для снижения заметности

В.Д. Иванов✉, В.П. Хантов, Р.С. Лошманов

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации
156013, Российская Федерация, Костромская область, г. Кострома, ул. Горького, д. 16
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Основные моменты

- Определение геометрических параметров, количественной концентрации и статистического распределения частиц в аэрозольных завесах позволяет оптимизировать влияние микрофизических характеристик дисперсной фазы (ДФ) специальных маскирующих аэрозолей, применяемых для скрытия военных объектов и техники.

- Достоверный контроль дисперсного состава частиц ДФ обеспечивается комплексным применением прямых и косвенных методов диагностики с различной чувствительностью, что критически важно для оценки эффективности маскировочных комплексов.

Актуальность. Разнообразие методов исследования микрофизических характеристик аэрозолей и технических средств их реализации затрудняет выбор тех из них, которые позволяют получить полные сведения о характеристиках ДФ.

Цель работы – выбор методов и средств исследований микрофизических характеристик ДФ аэрозолей искусственного происхождения, которые могут использоваться для снижения заметности.

Источниковая база исследования. Научная и техническая литература, доступная через глобальную сеть Интернет.

Метод исследования. Аналитический.

Результаты. Предложены оригинальные классификации основных микрофизических параметров ДФ аэрозоля, разделенных на три основные группы (статические, динамические и электрические параметры), и методов дисперсного анализа аэрозолей на основе представлений о прямых и косвенных измерениях, рассмотрены особенности измерений размерных параметров частиц ДФ, методы и технические средства дисперсного анализа. Определена применимость этих методов для исследований аэрозольных образований для снижения заметности.

Заключение. Для анализа аэрозольных маскирующих средств, предназначенных для снижения заметности, рекомендуется комбинированный подход с использованием как прямых, так и косвенных методов измерений. Это включает статический анализ изображений и лазерный дифракционный анализ. Минимальный, но достаточный набор методик измерений – с учетом конструктивных ограничений аппаратуры – должен включать: фазово-разделительную фильтрацию (аспирационный отбор проб частиц); гравиметрический анализ (высокоточные лабораторные весы); статический анализ изображений (оптическая микроскопия со специализированным ПО для анализа дисперсности); лазерный дифракционный анализ (конфигурация с пространственно разнесенным и излучателем и приемником для повышения разрешающей способности).

Ключевые слова: аэрозоль; дисперсный анализ; диаметр частицы; дисперсный состав; дисперсная фаза; распределение частиц по размеру; средства снижения заметности

Для цитирования: Иванов В.Д., Хантов В.П., Лошманов Р.С. Методы и средства исследования микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозольных образований для снижения заметности. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):240–262. EDN:uvygr.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-240-262>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации.

Поступила 25.07.2024 г. После доработки 12.03.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Methods and tools of researching some microphysical features of disperse phase of reducing visibility aerosols

Vladimir D. Ivanov✉, Vyacheslav P. Khantov, Roman S. Loshmanov

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union
S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation
16, Gorky Street, Kostroma 156015, Russian Federation
✉ e-mail: varhbz@mil.ru

Highlights

- Measuring the shape, size, particle concentration, and statistical distribution within an aerosol formation allows for the optimization of influence from the microphysical properties of the dispersed phase (DP) in aerosol obscuration.
- The reliability of particle dispersion analysis results for the DP can be achieved through the simultaneous or sequential application of various direct and indirect measurement methods, including those with different sensitivity thresholds.

Relevance. The variety of methods for studying the microphysical characteristics of aerosols and the technical means of their implementation complicates the selection of those that provide comprehensive data on DP characteristics.

Purpose of the study is to select methods and means for studying the microphysical characteristics of artificially generated aerosol DP that can be used for signature reduction.

Study base sources. Scientific and technical literature, including sources available via the global Internet.

Method. Analytical.

Results. Original classifications of the main microphysical parameters of aerosol DP were proposed, divided into three main groups (static, dynamic, and electrical parameters), along with methods for aerosol dispersion analysis based on direct and indirect measurement principles. The specifics of measuring particle size parameters, as well as methods and technical means for dispersion analysis, were examined. The applicability of these methods for studying aerosol formations in signature reduction applications was determined.

Conclusions. For the study of aerosol formations intended for signature reduction, the combined use of direct and indirect measurement methods is advisable, including static image analysis and laser diffraction analysis. Among these, a minimal set of direct and indirect measurement methods – accounting for the design features of the implementing hardware – may consist of: Phase-separation filtration (aspirator); Weighing (special-class laboratory scales); Static image analysis (microscope with software for image dispersion analysis), and; Laser diffraction analysis (in a configuration with spatially separated emitters and receivers).

Keywords: aerosol; disperse analysis; dispersed composition; disperse phase; particle diameter; particle size distribution; tools for reducing visibility

For citation: Ivanov V.D., Khantov V.P., Loshmanov R.S. Methods and tools of researching some microphysical features of disperse phase of reducing visibility aerosols. *Journal of NBC Protection Corps*. 2025;9(3):240–262. EDN:uvygr. <https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-240-262>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: The authors declare no conflict of interest.

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Received 25 July 2024. Revised 12 March 2025. Accepted 27 September 2025.

Исторически первым и одним из самых распространенных способов снижения заметности является применение дымов, являющихся одной из разновидностей аэрозольных образований. Механизмы формирования и постановки аэрозольных завес изучаются на протяжении длительного времени. В последнее время проводятся также работы по математическому моделированию влияния размеров частиц и структуры аэрозолей на их маскирующую способность [1, 2]. Однако экспериментальных исследований, связанных с изучением микрофизических, в том числе морфологических, свойств аэрозольных образований для снижения заметности проводилось сравнительно немного.

Цель работы – провести анализ методов и средств исследований микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозолей искусственного происхождения, которые могут использоваться для снижения заметности и выбор наиболее подходящих из них для проведения перспективных исследований в этом направлении.

Источниковая база исследования. Научная и техническая литература, в том числе доступная через глобальную сеть Интернет.

Метод исследования. Аналитический.

Для достижения цели работы нами:

- изучено современное состояние исследований свойств аэрозолей;
- проведен обзор методов и средств исследований микрофизических характеристик дисперсной фазы аэрозолей;
- проанализированы достоинства и недостатки как самих методов, так и доступных в настоящее время технических средств их реализации;
- определены методы, наиболее подходящие для исследований микрофизических характеристик аэрозольных образований для снижения заметности военных объектов.

Современное состояние исследований свойств аэрозолей

В соответствии с общепринятой терминологией под аэрозолями понимаются дисперсные системы с газообразной непре-

рывной средой и с твердой или жидкой дисперсной фазой [3].

Существуют различные способы классификации аэрозолей. Некоторые зарубежные авторы, например, П. Райст [4] под пылью понимают аэрозоли с твердыми частицами, образующимися в процессе измельчения; под туманами – аэрозоли с твердыми частицами, образующимися в результате физико-химических процессов, таких как горение, сублимация или дистилляция; под дымом – аэрозоли с частицами, образующимися при некоторых процессах окисления, например горения, под смогом – смесь тумана и дыма. При этом автор признает, что эти определения взяты из повседневной жизни, поэтому в предлагаемых им классификационных признаках встречаются некоторые совпадения.

В отечественной практике чаще применяется несколько иная классификация. Аэрозоли с жидкими частицами дисперсной фазы (ДФ), образующимися при конденсации и распылении, независимо от их размера называются туманом. Аэрозоли с твердыми частицами ДФ, образующимися в результате механического измельчения твердых тел – пылью. Аэрозоли, которые не могут быть отнесены ни к пыли, ни к туману, и могут содержать как твердые, так и жидкие частицы ДФ – дымами [3]. Похожей классификации придерживаются также специалисты британской военно-химической службы Х. Грин и В. Лейн [5]. Фактически все классификации аэрозолей основаны на различии свойств ДФ, оказывающих основное влияние на свойства аэродисперсной системы в целом. Следует отметить, что для целей снижения заметности наибольший практический интерес с учетом приведенной классификации представляют дымы и туманы.

До сих пор одним из основных отечественных источников, содержащих наиболее полные сведения о микрофизических свойствах ДФ аэрозольных образований для снижения заметности, остается книга Ю.И. Вейцера и Г.П. Лучинского [6], изданная в 1947 году. Остальные работы в этой области, например [7], явно заимствуют эти сведения.

В то же время исследования аэрозольных образований, в том числе микрофизических свойств ДФ, широко проводятся в других областях знаний. Большое количество исследований относится к изучению атмосферных аэрозолей [8–15]. Также публикуется много работ, связанных с промышленными аэрозолями, которые образуются в результате технологической деятельности, особенно в связи с развитием производства микроэлектроники и других отраслей промышленности, требующих применение сверхчистых помещений [16–21]. Изучение микрофизических свойств аэрозолей осуществляется также при разработке, производстве и применении медицинских препаратов в аэрозольной форме [22–25] и в противопожарных целях [26]. Результаты, полученные в этих областях знаний, в той или иной степени могут быть использованы при исследованиях аэрозольных образований для снижения заметности.

Микрофизические свойства дисперсной фазы аэрозолей

Свойства аэрозолей, можно условно разделить на макрофизические, описывающие состояние аэродисперсной системы в целом, и определяющие это состояние микрофизические свойства дисперсной фазы и газовой среды. При этом следует учитывать, что между всеми микрофизическими свойствами существуют определенные функциональные взаимосвязи, которые также оказывают влияние на состояние системы.

Поскольку в большинстве случаев газовой средой является атмосферный воздух, предполагается, что наиболее существенное влияние на свойства аэрозолей оказывают параметры ДФ. Обзорная схема основных микрофизических параметров ДФ приведена на рисунке 1. В нее включены укрупненные характеристики без указания взаимосвязей между ними. Например, размер частицы может быть представлен одним числовым значением только для сферических частиц идеальной формы. Для частиц произвольной формы, отличной от сферической, обычно учитываются дополнительные параметры, описывающие форму частицы или учитывающие отклонение от сферической формы. Таким образом, размер частиц, выражаемый одним числом, является укрупненным параметром, имеющий взаимосвязь с формой и



Рисунок 1 – Основные микрофизические параметры дисперсной фазы аэрозолей (рисунок авторов)

Figure 1: The main microphysical parameters of the dispersed phase of aerosols (the authors' drawing)

остальными размерами частицы. Структура частицы, образованной в результате коагуляции, определяет ее размеры и форму, а также может оказывать влияние на кажущуюся плотность, аэродинамические и электрические свойства частицы.

Из представленной схемы видно, что количество только основных укрупненных свойств дисперсной фазы достаточно велико. Доскональное описание каждого из них и методов их исследования является весьма обширной задачей, поэтому в данной статье предполагается рассмотреть лишь некоторые из этих свойств: форму и размеры частиц, обычно относимые к морфологическим свойствам ДФ [4], а также концентрацию и распределение частиц по размерам, определяющие структуру ДФ. Выбор именно этих параметров объясняется их наиболее значимым влиянием непосредственно на маскирующие свойства аэрозолей, которые определяются, в первую очередь, взаимодействием электромагнитного излучения (ЭМИ) в видимом, инфракрасном и радиочастотном диапазонах с частицами ДФ, существенно зависящего от размеров и количества частиц. Рассмотрению взаимодействия ЭМИ с частицами ДФ также посвящено достаточно много исследований [27–31].

Определение размера частиц, концентрации частиц и распределения их по размерам часто называют дисперсным анализом¹.

¹ Соответствует определению в ГОСТ Р 51109–97 Промышленная чистота. Термины и определения, но не соответствует определению в ГОСТ 8.961–2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсные характеристики аэрозолей и взвесей. Термины и определения, в котором под дисперсным анализом понимается анализ изменчивости дисперсных характеристик под влиянием каких-либо контролируемых переменных факторов.

Размеры частиц дисперсной фазы

При определении системы размерных параметров частиц произвольной формы стремятся к минимальному количеству числовых значений, достаточно полно описывающих их размеры для конкретного применения, желательно – к одному. Из всех возможных пространственных форм частиц только сфера может быть однозначно описана единственным числовым значением (диаметром). Однако близкую к идеальной сферическую форму в большинстве случаев имеют только частицы жидкости [4], частицы в твердой фазе такую форму имеют редко (рисунк 2).

В случае наличия в аэрозоле твердых частиц несферической формы определение их размеров становится значительно более сложной задачей. Размеры частиц неправильной формы в идеале должны описываться массивом числовых значений. Описание размерных параметров частицы более чем одним числовым значением несоразмерно усложняет описание структуры и поведения всего ансамбля частиц, что делает крайне неудобным его дальнейшее применение.

В большинстве практически важных случаев нет необходимости описывать размерные параметры частицы тремя или более числовыми значениями, за исключением случаев, когда форма частиц имеет принципиальное значение. Таким образом, основной задачей при анализе размеров частиц ДФ является корректное нормирование размера трехмерного объекта произвольной формы одним числовым значением.

Решению этой задачи способствует то, что при исследовании некоторых свойств частиц можно предположить, что частица ведет себя как сфера с определенным диаметром (радиусом), который может быть выражен одним числовым значением. Такими свойствами могут быть рассеяние света, скорость оседания частиц и некоторые другие.

Подобное приведение размерной системы частицы к одному числовому значению по-

лучило название теории «эквивалентных» диаметров, суть которой заключается в сопоставлении некоторого свойства частицы произвольной формы к равному по значению аналогичному свойству сферы определенного диаметра. С этой целью были предложены различные «эквивалентные» диаметры, некоторые из которых приведены в таблице 1 [4, 5, 33]. В разных литературных источниках эти параметры могут иметь несколько отличные наименования, например, «проекции-онный диаметр» [5] в работах [4, 33] именуется «диаметр проектируемой поверхности», «оптический диаметр», в работе [34] «диаметром Ми» и «эквивалентным диаметром по рассеянию света». Однако физическая сущность всех перечисленных параметров совпадает.

Достаточно подробный обзор и анализ размерных параметров приведен в работе [35].

Очевидно, что ни один из «эквивалентных» диаметров не может достаточно полно описать совокупность размерных характеристик частицы существенно несферической формы, которые вместе или по отдельности оказывают влияние на свойства аэродисперсной системы в целом. Разные «эквивалентные» диаметры одной и той же частицы, полученные разными методами, будут отличаться количественно (рисунк 3). Поэтому все «эквивалентные» параметры имеют ограниченное применение и подходят только для определенных случаев поведения аэродисперсной системы и метода измерения этих параметров.

Следует также учитывать, что результаты измерений линейных размеров частицы произвольной формы могут существенно зависеть от ее ориентации относительно плоскости измерений. В некоторых случаях за окончательный размер в определенной плоскости измерений принимается усреднение результатов измерений большого числа частиц в узком интервале линейных размеров,

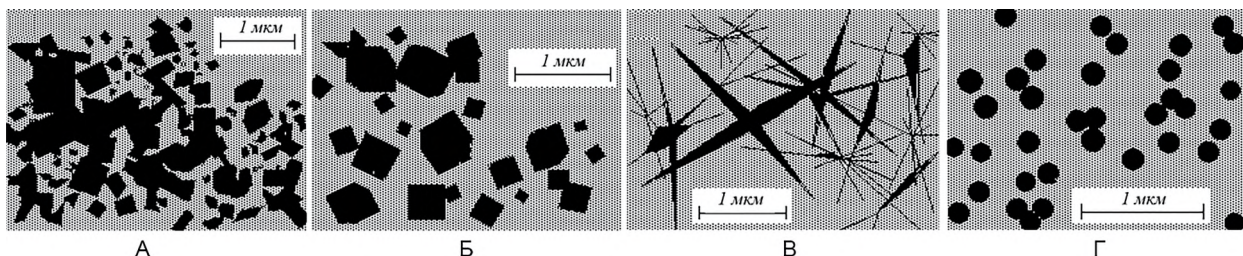


Рисунок 2 – Микроскопические изображения аэрозольных частиц: А – дым окиси магния, Б – дым хлористого натрия, В – дым окиси цинка, Г – монодисперсный аэрозоль селена [32]

Figure 2: Microscopic images of aerosol particles: А, smoke of magnesium oxide; Б, smoke of sodium chloride; В, smoke of zinc oxide; Г, monodisperse aerosol of selenium [32]

Таблица 1 – Некоторые «эквивалентные» диаметры, применяемые для определения размеров частиц
Table 1. Some 'equivalent' diameters used for determining particle sizes

Наименование / Name	Описание / Description
Диаметр Ферета / Feret diameter	Максимальное расстояние между наиболее удаленными краями частицы / Maximum distance between the farthest edges of a particle
Диаметр Мартина / Martin diameter	Длина линии, которая делит частицу на две равные части по площади проекции / Length of the line dividing the particle's projected area into two equal halves
Проекционный диаметр (диаметр Хейвуда) / Projected area diameter (Heywood diameter)	Диаметр круга с площадью, равной площади проекции частицы / Diameter of a circle with an area equal to the particle's projected area
Поверхностный диаметр / Surface diameter	Диаметр сферы с площадью поверхности, равной площади поверхности частицы / Diameter of a sphere with a surface area equal to the particle's surface area
Объемно-поверхностный диаметр / Volume-surface diameter (Sauter mean diameter, SMD)	Величина, полученная делением объема частицы на площадь ее поверхности / Value obtained by dividing the particle's volume by its surface area
Объемный (или массовый) диаметр / Volume diameter (or mass-equivalent diameter)	Диаметр сферы с объемом (массой), равной объему (массе) частицы / Diameter of a sphere with a volume (or mass) equal to the particle's volume (or mass)
Периметрический диаметр / Perimeter diameter	Диаметр окружности, периметр которой равен периметру проекции частицы / Diameter of a circle with a perimeter matching the particle's projected outline perimeter
Стоксовский (седиментационный) диаметр / Stokes diameter (sedimentation diameter)	Диаметр сферы, имеющий скорость оседания, равную скорости оседания частицы (зависит от плотности частицы) / Diameter of a sphere with the same settling velocity as the particle (dependent on particle density)
Аэродинамический диаметр / Aerodynamic diameter	Диаметр сферы плотностью 1 г/см ³ , имеющей такие же аэродинамические показатели, что и частица / Diameter of a sphere with a density of 1 g/cm ³ exhibiting identical aerodynamic behavior to the particle
Оптический диаметр / Optical diameter	Диаметр сферы, имеющей то же сечение рассеяния оптического излучения, как и частица / Diameter of a sphere with the same optical scattering cross-section as the particle
Примечание. Таблица составлена авторами по данным из работ [33–35]. Note. The table was compiled by the authors based on data from [33–35].	



Рисунок 3 – Сравнение некоторых эквивалентных диаметров частицы произвольной формы в схематическом представлении в порядке возрастания [36]. А – Диаметр Мартина (длина хорды, разделяющей проекцию частицы на две части, имеющие равные площади A1 и A2); Б – Диаметр Ферета (расстояние между параллельными линиями, касательными к линии контура проекции частицы); В – Диаметр Хейвуда (диаметр окружности, имеющей ту же площадь, что и проекция частицы)
Figure 3: Comparison of some equivalent diameters of a particle of arbitrary shape in a schematic representation in ascending order [36]. A, Martin diameter (length of the chord dividing the particle into two parts having equal areas A1 and A2); Б, Feret diameter (distance between parallel lines tangent to the contour line of the particle); В, Heywood diameter (diameter of a circle having the same area as the projection of the particle)

исходя из предположения, что ориентация частиц является беспорядочной [33].
Размерные параметры частицы являются одним из наиболее важных факторов определяющих поведение аэрозолей [4].
Следует также отметить, что во многих работах, рассматривающих влияние размерных параметров на состояние и поведение аэродисперсной системы в целом, используется единственное числовое значение размера частиц, но не указывается каким образом оно получено, т.е. каким эквивалентным значением фактической системы размерных параметров частиц оно является. Эти обстоятельства существенно осложняют оценку сопоставимости данных из разных источников.

Концентрация частиц дисперсной фазы
Концентрация частиц ДФ также является одной из важнейших характеристик, от которой зависит поведение дисперсной системы в различных физических и химических процессах. Различают счетную, массовую и объ-

емную концентрации, которые определяются соответственно общим количеством, массой или объемом частиц ДФ в единице объема аэрозоля. Сведения об этих концентрациях позволяют определить среднюю массу частицы, ее плотность и объем.

Распределение частиц по размерам

В подавляющем большинстве случаев аэрозоли состоят из частиц с различающимися размерными параметрами, такие аэрозоли называются полидисперсными.

Иногда полидисперсная система достаточно удовлетворительно характеризуется одним размером частиц. Однако в большинстве случаев необходима более подробная информация о распределении частиц по размерам [4].

Распределение аэрозольных частиц по размерам может быть выражено несколькими способами. В большинстве случаев такие данные представляют в виде линейных диаграмм или гистограмм, наглядно отображающих зависимость числа частиц от интервала их размеров (рисунк 4).

На гистограмме высота каждого прямоугольника соответствует количеству частиц или их доле с размерами которые попадают в интервал, определяемый основанием прямоугольника. Очевидно, что суммарная высота всех прямоугольников гистограммы равна общему числу частиц всех размеров. Стандартизованные интервалы размеров называются также классами размеров.

Распределение частиц по размерам является многокритериальной характеристикой полидисперсной аэрозольной системы, в силу чего, как и в случае с размерными параметрами, его использование в таком виде неудобно для количественного сопоставления таких систем.

Поэтому распределение размеров частиц также пытаются описать параметрами, которые могут быть определены единственным числовым значением, так называемыми «средними» значениями. Необходимо иметь в виду, что «средние» значения, определенные различными способами, могут значительно отличаться [3].

Наиболее часто применяются: простое арифметическое или геометрическое усреднение размеров всех частиц в выборке (среднее арифметическое, среднее геометрическое значения); медианные средние значения, которые делят выборку на две равные части, т.е. являются точкой на кривой распределения, слева и справа от которой находится по 50 % общего количества частиц; средние моды, определяемые значением максимума кривой распределения. Для нормального распределения среднее арифметическое, мода и медиана совпадают, для других распределений эти значения могут существенно отличаться [37, 38].

Для правильного выбора метода измерений размеров частиц и их распределения, необходимо также учитывать некоторые другие микрофизические характеристики, которые могут оказывать существенное влияние на результаты измерений, такие как структура (внутреннее строение) частицы, поверхностные свойства частицы (свойства поверхности раздела в аэрозольной среде) и структурная однородность частиц в аэрозоле.

Структура частиц дисперсной фазы

Плотность частиц зависит от природы исходного вещества, из которого они образованы. Кроме того, аэрозольные частицы могут объединяться в агломераты, которые,

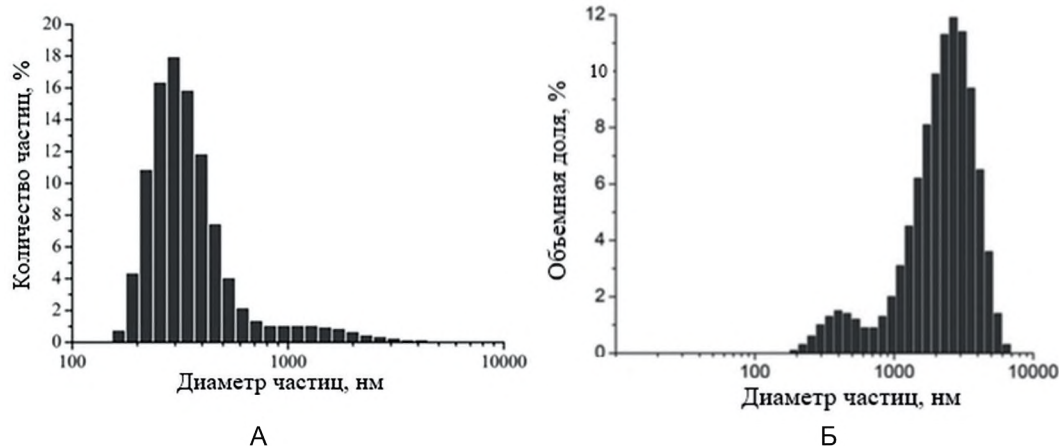


Рисунок 4 – Примеры гистограмм счетного (А) и объемного (Б) распределения частиц по размерам [4]
 Figure 4: Examples of histograms of countable (A) and volumetric (Б) particle size distribution [4]

сами, по сути, становятся элементарными единицами ДФ, т.е. ведут себя и рассматриваются как частицы. При этом, в некоторых случаях, кажущаяся плотность агломератов, может быть меньше плотности вещества частицы. Элементарные единицы ДФ могут быть составными, например, полыми каплями жидкости с газообразными включениями, или полыми твердыми частицами, содержащими вещество-наполнитель. Плотность таких частиц может значительно отличаться от плотности основного исходного вещества. В работе [3] предполагается, что кажущаяся плотность частиц в дымах может составлять от 10 до 70 % от действительного значения плотности, однако сведения об экспериментальных данных, на основании которых сделаны данные выводы не приводятся. Кроме того, вещество описанных выше элементарных единиц ДФ может существенно отличаться по характеру взаимодействия с электромагнитным излучением (поглощение, рассеяние), в том числе в оптическом диапазоне.

Поверхностные свойства частиц дисперсной фазы

Аэрозольные частицы имеют малые размеры по сравнению с массивными образцами вещества, из которого они состоят, в силу чего, по сравнению с последними, имеют очень развитую поверхность, на которой могут протекать разнообразные процессы – химические реакции, адсорбция, накопление или стекание электрического заряда и т.д. Относительная площадь поверхности частиц увеличивается с уменьшением их размера. Поверхностные свойства могут оказывать влияние на образование агломератов частиц, а, следовательно, на совокупные размерные характеристики ДФ. Микрорельеф поверхности, в некоторых случаях, может оказывать также достаточно существенное влияние на рассеяние оптического излучения.

Влияния морфологических характеристик дисперсной фазы на свойства аэрозолей, определяющие их взаимодействие с электромагнитным излучением

Взаимодействие ЭМИ с частицами ДФ, в том числе в оптическом диапазоне, характеризуется поглощением (преобразованием электромагнитной энергии в другие виды энергии, например, в тепловую) и рассеянием, как на каждой частице, так и на ансамбле частиц в целом. Достаточно точная

физико-математическая модель взаимодействия ЭМИ с частицами существует только для однородных частиц сферической формы (классическая теория Ми) [27]. Существуют также другие частные математические модели, например, для случая сферических частиц, составленных из однородного ядра и неоднородной с ним оболочки [39–42].

Общее уменьшение интенсивности ЭМИ после прохождения через аэрозольную среду называется экстинкцией [27]. Методики измерения экстинкции как макрофизической характеристики аэрозольной среды в оптическом диапазоне достаточно хорошо проработаны и широко применяются на практике [43].

Учитывая вышеизложенное, экспериментальные исследования зависимости экстинкции от микрофизических свойств частиц ДФ имеют большое значение.

Обзор методов и средств исследования морфологических и структурных характеристик дисперсной фазы аэрозолей

Для проведения дисперсного анализа было разработано большое количество методов исследований и технических средств их реализации. Некоторые из этих методов, появившиеся исторически первыми, не удовлетворяют современным требованиям и уровню технического развития, поэтому в настоящее время практически не используются. Другие методы являются слишком трудоемкими и неудобными, в силу чего также не нашли широкого применения; наиболее полную ретроспективу таких методов и технических средств их реализации можно найти в работах [44–46]. В данной статье рассматриваются только наиболее распространенные и современные методы измерений основных морфологических и структурных характеристик частиц ДФ (дисперсного анализа аэрозолей). Некоторые методы, не нашедшие достаточно широкого применения, упоминаются в статье для формирования представления о возможностях и разнообразии существующих способов дисперсного анализа. Методы, являющиеся, по мнению авторов, перспективными для применения в заявленных целях рассмотрены более детально.

В работе [47] предлагается условно разделить методы дисперсного анализа на две большие группы: методы предварительного осаждения и бесконтактные (в основном оптические) методы².

² Бесконтактные, по-видимому, исходя из предположения о минимальном влиянии электромагнитного излучения оптического диапазона на исследуемые свойства частиц.

Однако с метрологической точки зрения представляется более целесообразным разделять их, в первую очередь, на методы, позволяющие выполнять непосредственные (прямые) измерения искомых величин, характеризующих микрофизические свойства аэрозолей, и косвенные методы измерений, основанные на измерении иных величин, функционально связанных с искомыми. Исходя из этого представления составлена схема основных методов дисперсного анализа аэрозолей, приведенная на рисунке 5.

При этом следует иметь в виду, что все косвенные методы измерений параметров ДФ требуют проведения предварительной градуировки, основанной на сравнении полученных с их помощью результатов с действительными значениями, определяемыми методами прямых измерений.

Методы разделения фаз аэрозольной системы

Методы осаждения. Методы предварительного осаждения ДФ, основанные на физико-математических моделях естественного (гравитационного) или принудительного (инерционного) осаждения частиц, с последующим измерением их общего (интегрального) количества или взятием проб для последующего детального исследования. Использование технических средств специальной конструкции (каскадные импакторы, импиджеры, конифуги) позволяет с приемлемой точностью разделять частицы на несколько фракций по размерам³. Из приборов, реализующих эти методы в настоящее время наибольшее распространение нашли фотоденситометры [48–50].

При использовании седиментационных методов осаждения (без последующего проведения дополнительных детальных исследований) размеры частиц определяются как диаметр эквивалентной сферической частицы, имеющий такую же скорость осаждения, как и исследуемые частицы (диаметр Стокса). Имеются достаточно современные технические реализации приборов, выполняющих измерения данным методом [49].

Существуют также методы осаждения под действием других физических полей, например, тепловых (термопреципитация) и электростатических (электропреципитация). Более подробно данные методы, их недостатки и ограничения применения описаны в работах [5, 45].

Методы механического разделения. К методам механического разделения относятся также ситовый анализ, практически непригодный для аэрозолей, и методы фильтрации, основанные на задержании частиц ДФ на фильтрах при принудительном пропускании через них аэрозоля. Успешная реализация данного метода применительно к конкретной задаче определяется правильным выбором фильтра и режимов пропускания через фильтр.

Методы разделения фаз в большинстве случаев позволяют производить отбор проб частиц непосредственно из аэродисперсной системы, в том числе в естественной (нативной) среде, с возможностью последующих прямых измерений некоторых интегральных характеристик ДФ, например, массовой или объемной концентрации частиц гравиметрическим и пьезобалансным методами или методом осциллирующих микровесов с коническим элементом (ТЕОМ) [51], при этом результаты таких измерений не зависят от физико-химических свойств частиц ДФ. Основным преимуществом данной группы методов является возможность последующего выполнения прямых измерений параметров выделенных с их помощью частиц ДФ микроскопическими методами. К недостаткам могут быть отнесены высокая трудоемкость, дискретная селективность, цикличность измерений и низкая чувствительность, что обуславливает длительность пробоотбора до нескольких часов при измерении малых концентраций [47].

Одной из основных проблем при использовании методов предварительного осаждения частиц, является сложность и трудоемкость получения пробы, представительной



Рисунок 5 – Основные методы дисперсного анализа аэрозолей (рисунок авторов)
Figure 5: Basic methods of aerosol dispersion analysis (authors' drawing)

³ В данном случае, под фракционными «размерами» в зависимости от конкретного метода разделения следует понимать седиментационные или аэродинамические эквивалентные диаметры.

по отношению ко всему аэрозольному образованию или к его существенной части. Практическая результативность этих методов во многом зависит от условий отбора проб и погрешностей, вносимых пробоотборным устройством. Кроме того, в большинстве случаев, при отборе проб невозможно выполнить условие изокINETичности, которое выполняется только при равенстве по величине и направлению скорости всасывания аэрозоля в прибор и вектора внешней скорости движения аэродисперсной системы [46, 47].

Наиболее простым в реализации и потому распространенным в настоящее время является метод разделения фаз путем, принудительного пропускания аэрозоля через фильтр, что в большинстве случаев обеспечивается с помощью отсасывающего компрессора. Основной проблемой при реализации данного метода является выбор подходящего фильтра, особенно для частиц мелких фракций, исключающего или минимизирующего взаимодействие с аэрозолем, например, с влагой прокачиваемой среды, вследствие чего за счет впитывания может изменяться масса фильтра, что создает дополнительную погрешность при выполнении гравиметрических измерений массовой концентрации твердых частиц ДФ.

Тем не менее, методы осаждения и фильтрации частиц, в ряде случаев безальтернативно, позволяют получить образцы, включая распределенный двумерный статический ансамбль частиц на поверхности фильтра, для последующего измерения их параметров другими методами, в том числе непосредственного наблюдения формы и измерений их линейных размеров с использованием микроскопов [51–54]. Более подробно методы предварительного осаждения и способы отбора проб рассмотрены в работах [5, 16, 17].

Гидроаэродинамические методы разделения. Основаны на разделении дисперсной фазы на фракции в восходящем потоке жидкости (промывание) или газа (продувание) с постоянной или переменной скоростью движения разделяющей среды [55]. В настоящее время для дисперсного анализа практически не применяются.

Электрические методы измерений

Электрические методы измерений параметров аэрозоля в настоящее время также не имеют широкого распространения, поэтому приведем только их краткое описание: ин-

дукционный основан на определении наведенного на электроде измерительной камеры заряда при движении через нее заряженных частиц аэрозоля; контактно-электрический – на способности частиц накапливать электрический заряд при соприкосновении с твердым телом; емкостный – на изменении емкости конденсатора при введении частиц аэрозоля между его пластинами; пьезоэлектрический – на возникновении электрических импульсов на пьезоэлементе при соударении с ним частиц аэрозоля.

Электрические методы являются косвенными, поэтому результаты измерений в существенной степени зависят от свойств частиц аэрозоля: проводимости, диэлектрической проницаемости, массы, размеров, скорости соударения и других.

Микроскопические методы измерений

Микроскопические методы основаны на анализе с использованием многократного увеличения изображений частиц, либо непосредственно наблюдаемых, либо предварительно зафиксированных. Эти методы позволяют получить наиболее достоверную информацию о форме, количестве и размерах частиц, а также о распределении размеров [54]. Важнейшими характеристиками микроскопических систем являются увеличение и разрешающая способность микроскопа [56, 57]. Микроскопические методы дисперсного анализа аэрозолей, в большинстве случаев, являются оптическими и позволяют выполнять прямые измерения размерных параметров частиц путем непосредственного визуального сличения со шкалой единиц длины [58]. Для анализа в субмикронном диапазоне размеров частиц в последнее время стали применяться также современные компактные электронные микроскопы [59, 60], например, такие как настольный сканирующий электронный микроскоп JEOL JCM-7000⁴. Может быть также рассмотрена возможность и целесообразность применения для этих целей конфокальной лазерной сканирующей микроскопии [57, 61], например, конфокального микроскопа CHOTEST VT6100⁵.

Методы микроскопического анализа изображений в свою очередь делятся на статические и динамические.

Статический микроскопический анализ изображений. Метод статического микроскопического анализа изображений основан на исследовании неподвижных и неизменных в период наблюдения объектов, поэтому, в

⁴ URL: <https://www.ru.jeol.com/products/scientific/sem/jcm-7000.php> (дата обращения: 22.04.2024).

⁵ URL: <https://en.chotest.com/detail.aspx?cid=989> (дата обращения: 22.04.2024).

большинстве случаев, нуждается в предварительном отборе проб частиц ДФ. Общим недостатком статического анализа изображений является сложность подготовки представительной пробы (наследуется от методов пробоотбора), и значительная трудоемкость выполнения измерений достаточно большого количества частиц, необходимого для получения репрезентативных и статистически приемлемых результатов. В настоящее время для снижения времени измерений этим методом и исключения ошибок оператора используется специализированное программное обеспечение для автоматизированного анализа изображений частиц [52], например, такое как бесплатная программа ImageJ⁶. Программа ImageJ предназначена для обработки различных научных и технических изображений. В части дисперсного анализа программа может рассчитывать площади плоских фигур нерегулярной формы, создавать гистограммы распределения, трансформировать изображения, уменьшать шум изображения, обнаруживать края объектов, оценивать углы и расстояния, управлять внешним оборудованием, например, оптическими микроскопами, и многое другое. Программа имеет открытый исходный код и большое количество уже разработанных специализированных плагинов, имеет встроенный редактор плагинов и компилятор Java, а также инструментарий для создания макрокоманд и пользовательских функций [62]. Есть также подобные коммерческие программные продукты, в том числе отечественной разработки, например, Altami Studio 4.0 (ООО «Альтами», г. Санкт-Петербург)⁷. Существующие алгоритмы компьютерной обработки изображений дисперсных систем, как и технические средства их реализации непрерывно совершенствуются [52, 63].

Динамический микроскопический метод анализа изображений. Развитие современных аппаратных средств цифровой обработки сигналов в последнее время привело к широкому распространению метода динамического микроскопического анализа, именуемого также динамическим анализом изображений⁸. Основным его преимуще-

ством перед другими микроскопическими методами является возможность (помимо определения размера частиц) количественно описывать форму предварительно заданным набором размерных параметров и визуально оценивать популяцию частиц в режиме реального времени при прохождении ДФ через измерительный канал. Измерения размерных параметров, выполненные данным методом, являются прямыми измерениями.

На динамический анализ изображений не влияют свойства материала частиц, поэтому его можно применять для анализа многокомпонентных смесей, кроме того, метод позволяет различать и количественно определять прозрачность частиц [34]. К недостаткам метода следует отнести зависимость результата измерений от пространственной ориентации частицы относительно плоскости измерений, а также ограниченная глубина резко изображаемого пространства, впрочем, эти недостатки в той или иной степени присущи всем оптическим методам.

Однако серийно выпускаемые технические средства динамического анализа изображений, как и большинство приборов, реализующих современные косвенные оптические методы дисперсного анализа, в основном ориентированы на определение гранулометрического состава порошкообразных материалов и дисперсных свойств промышленных аэрозолей в виде предварительно осажденных проб в порошкообразной форме. Для проведения анализа порошки диспергируются в жидкой или воздушной среде, после чего подвергаются процедурам измерений. Конструкция таких приборов имеет специфические особенности, которые не подходят для дисперсного анализа аэрозолей в нативной форме без оказания на нее существенного воздействия. Типичные схемы измерительных каналов с устройствами ввода проб представлены на *рисунке 6*.

Современные приборы динамического анализа изображений, такие как, Samsizer X2 (фирма «Retsch Technology», Германия, г.р. № 82193-21⁹), Analysette 28 Image Sizer (фирма «Fritch», Германия, г.р. № 85216-22), Winner

⁶ URL: <https://imagej.net> (дата обращения: 22.04.2024).

⁷ URL: <https://altamisoft.ru> (дата обращения: 24.04.2024).

⁸ ISO 13322-2:2021 Particle size analysis - Image analysis methods – Part 2: Dynamic image analysis methods (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/1e1e64a5-5a48-4b63-b8b3-14b3f036cbc8/iso-13322-2-2021>; дата обращения: 03.05.2024).

⁹ Здесь и далее таким образом (г.р. №...) указывается номер записи в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>), в которой содержится описание указанного типа средства измерений (в случае, если такая запись имеется).

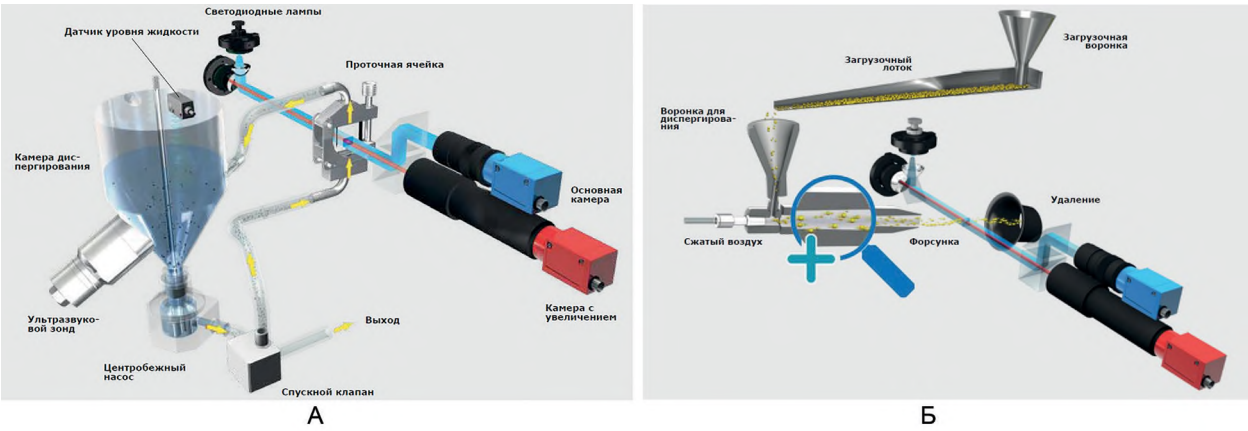


Рисунок 6 – Типичные схемы ввода порошкообразных проб в приборы дисперсного анализа в жидкой (А) и газообразной (Б) среде (URL: https://llcvek.ru/wp-content/uploads/2017/08/brochure_camsizerX2_ru.pdf; дата обращения: 14.04.2024)

Figure 6: Typical schemes for introducing powdered samples into disperse analysis devices in liquid (A) and gaseous (B) media (URL: https://llcvek.ru/wp-content/uploads/2017/08/brochure_camsizerX2_ru.pdf; accessed: 14.04.2024)

300D (фирмы Jinan Winner Particle Instrument Stock, Китай)¹⁰, Morphologi G3 (фирма Malvern Instruments, Великобритания)¹¹, позволяют практически полностью автоматизировать процесс измерения размеров частиц с минимальными погрешностями.

Оптические методы косвенных измерений

Значительно большее распространение получили косвенные оптические методы, основанные на оценке взаимодействия электромагнитного излучения оптического диапазона (светового потока) с различными объектами. При взаимодействии светового потока с объектом часть потока отражается от поверхности раздела сред, часть проходит сквозь объект, часть огибает объект в результате дифракции (рисунок 7).

В силу этого косвенные оптические методы можно разделить на три большие группы, основанные на оценке дифракционных явлений, изменений прошедшего и отраженного светового потока, кроме того, возможны их комбинации. При этом могут оцениваться как статические (интенсивность светового потока и его пространственно-временные зависимости), так и динамические характеристики, например, доплеровское изменение частоты электромагнитных колебаний, как в анализаторе размера частиц SV100 V2 (фирма HORIBA Ltd., Япония, р.г. № 88681–23). Наиболее полный и детальный обзор теоретиче-

ских основ косвенных оптических методов приведен в работе [64].

В настоящее время известно более 50 различных косвенных оптических методов и их модификаций [47], в то же время, с развитием технологий, в первую очередь компьютерных, оптические методы продолжают постоянно совершенствоваться и появляются новые. Однако из всей совокупности известных оп-

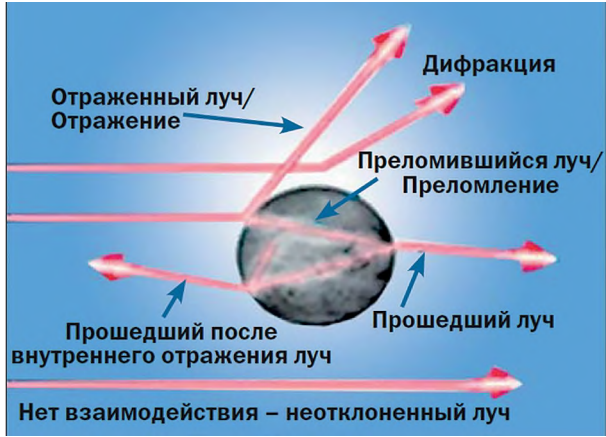


Рисунок 7 – Схемы взаимодействия электромагнитного излучения со сферическим объектом в представлении геометрической оптики [34]

Figure 7: Diagrams of the interaction of electromagnetic radiation with a spherical object in the representation of geometric optics [34]

¹⁰ URL: <https://www.winner-psa.com/particle-image-system/winner300d-dynamic-dry-particle-image-analyzer.html> (дата обращения: 26.04.2024).

¹¹ URL: <http://malvern.nt-rt.ru> (дата обращения: 26.04.2024).

тических методов, наибольшее распространение получили только некоторые из них.

Метод измерений интенсивности рассеянного света. Наиболее распространенным (по числу применений) является метод измерений интегральной интенсивности рассеянного света. Данный метод стандартизован¹² и используется в большом количестве моделей счетчиков частиц. Конструкция счетчика реализована таким образом, чтобы из подаваемой в измерительную ячейку пробы апертуру светового потока в каждый момент измерения пересекала только одна частица (рисунок 8).

Таким образом, оценивается единичное событие взаимодействия оптического излучения с частицей по интенсивности рассеянного излучения, пропорциональной размеру частиц, а также количество таких событий пропорциональное их концентрации.

Существенным недостатком счетчиков аэрозольных частиц является невозможность получить сведения о реальной форме и структуре частиц. Размер частицы, полученный с использованием метода измерений интегральной интенсивности рассеянного света, как, впрочем, и любого другого косвенного оптического метода, является эквивалентным оптическим диаметром (см. таблицу 1).

Типичными представителями средств измерений, реализующих данный метод, являются, например, счетчики аэрозольных частиц серии APEx (фирмы Lighthouse, США,

г.р. № 77595–20), серии АЭРОКОН (ООО НПО «Эко-Интех», Россия, г.р. № 78323–20), MetOne (фирмы Beckman Coulter, Inc., США, г.р. № 73699–18, Fluke 985 (фирмы Fluke Corporation, США, г.р. № 54041–13).

Метод статического рассеяния света. Метод статического рассеяния света известен также как метод полной индикатрисы или метод лазерной дифракции.

Суть метода лазерной дифракции заключается в том, что монохроматический когерентный луч света, взаимодействуя с частицей, рассеивается под соответствующими углами с определенными относительными (по отношению к падающему лучу) интенсивностями, образуя диаграмму рассеяния (рисунок 9), именуемую также индикатрисой рассеяния.

На основании теории Ми или приближения Фраунгофера рассчитывается распределение по размерам совокупности сфер, производящих специфическую дифракционную картину для света с определенной длиной волны в дисперсной среде с известным индексом преломления. Типичная схема анализатора на основе метода лазерной дифракции приведена на рисунке 10.

Однако следует иметь в виду, что у классической теории Ми имеется ряд ограничений и она строго соблюдается, только если:

- частицы имеют сферическую форму и изотропны, рассеивая свет одинаково во всех направлениях;
- концентрация частиц в пробе достаточно мала, чтобы не происходило множественного рассеяния, т.е. последовательного взаимодействия светового потока с несколькими частицами до детектирования;
- все частицы имеют одинаковый показатель преломления.

Размер частицы, измеренный методом статического рассеяния света, в общем случае является эквивалентным диаметром сферы из того же материала, производящей картину рассеяния, наиболее похожую на фактически наблюдаемую, т.е. оптическим диаметром (таблица 1).

Развитие теории рассеяния [66–69] и современной вычислительной техники, применение детекторов с более высокой чувствительностью и быстродействием, более совершенных оптических систем в последних моделях приборов, реализующих метод лазерной дифракции, позволили, по утверждениям их разработчиков, более адекватно оце-

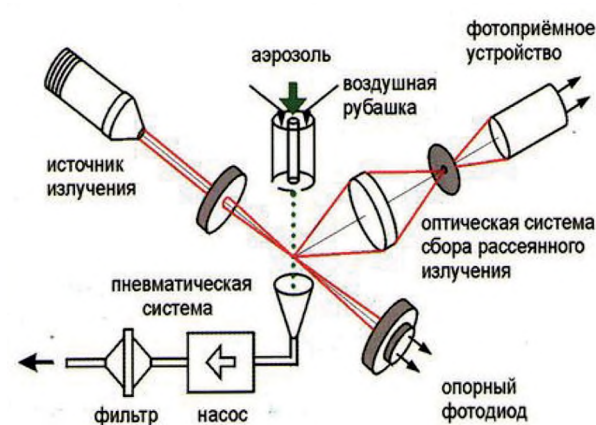


Рисунок 8 – Типичная обобщенная оптическая и пневматическая схема счетчика аэрозольных частиц [65]
Figure 8: Typical generalized optical and pneumatic circuit of an aerosol particle counter [65]

¹² ISO 13323:2020 Determination of particle size distribution. Single - particle light interaction methods. Part 1: Light interaction considerations (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/1e1e64a5-5a48-4b63-b8b3-14b3f036cbc8/iso-13323-2020>; дата обращения: 03.05.2024).

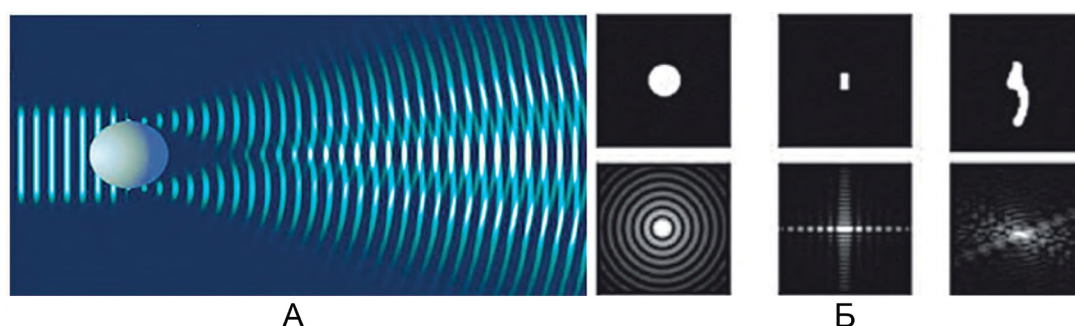


Рисунок 9 – Схематическая визуализация лазерной дифракции в плоскости перпендикулярной плоскости измерений (А) и влияние формы объектов (вверху) на диаграмму рассеяния (внизу) в плоскости измерений (Б) [36]
Figure 9: Schematic visualization of laser diffraction in a plane perpendicular to the measurement plane (A) and the effect of the shape of objects (above) on the scattering diagram (below) in the measurement plane (B) [36]

нивать распределение по размерам частиц несферической формы из поглощающих свет материалов¹³.

Любые отклонения от принятых в теории Ми допущений образуют методическую составляющую погрешности результата измерений. Например, если проба содержит частицы с различными показателями преломления, получаемое распределение по размерам будет относиться к сферам, имеющим одинаковый показатель преломления, и будет искаженным относительно истинного распределения размеров частиц. Аналогично, если частицы имеют неоднородную форму или являются пористыми, получаемое распределение частиц по размерам также может быть искаженным [60, 66, 70]. Учитывая, что методическая погрешность имеет в основном систематический характер, можно предположить, что существуют определенные способы градуировки, при помощи которых методиче-

ская погрешность в значительной мере может быть компенсирована, по крайней мере, для некоторых параметров ДФ и условий их измерений.

К основным преимуществам метода лазерной дифракции обычно относят небольшое время проведения измерений (как правило, несколько минут), широкий диапазон измеряемых размеров (от десятков нанометров до миллиметров), воспроизводимость в одинаковых условиях измерений, небольшое количество пробы, одновременный анализ частиц в широком размерном диапазоне. Метод стандартизован¹⁴ обладает высокой воспроизводимостью и чувствительностью, что позволяет определять малейшие различия распределения частиц по размерам.

Ограничения применения косвенных оптических методов для исследования аэрозольных образований для снижения заметности

Предшествующее рассмотрение показывает, что все косвенные оптические методы позволяют измерять только оптический диаметр частиц, что вполне приемлемо с точки зрения оценки экстинкции аэрозольных систем, но не вполне – для оценки их поведения в остальных случаях, например времени существования аэрозольной завесы. Прямые оптические методы позволяют непосредственно определять форму и размеры частиц, но требуют либо значительных затрат времени, либо значительные вычислительные ресурсы. Впрочем, последнее вполне успешно реализуется в современных приборах динамического анализа изображений. Логично также предположить, что прямой оптический метод может быть использован

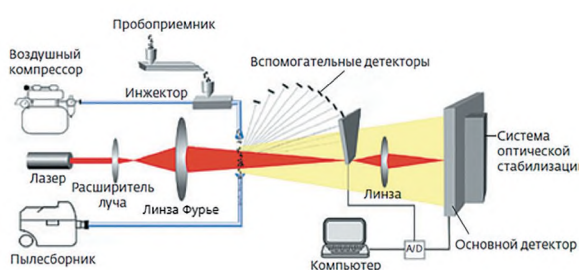


Рисунок 10 – Типичная схема реализации метода лазерной дифракции в современном анализаторе размера частиц [37]
Figure 10: Typical scheme of implementation of the laser diffraction method in a modern particle size analyzer [37]

¹³ URL: <https://www.microtrac.com/files/96414/sync.pdf> (дата обращения: 26.04.2024).

¹⁴ ISO 13320:2020 Particle size analysis - Laser diffraction methods (URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/27fd2441-4ee2-4c37-93acce572523d0aa/iso-13320-2020>; дата обращения: 30.05.2024).

для градуировки более производительных косвенных оптических методов. В этой связи следует отметить, что в настоящее время поверка и градуировка приборов, реализующих косвенные оптические методы, в большинстве случаев осуществляются с использованием стандартных образцов, состоящих из твердых¹⁵ и жидких [71] частиц правильной сферической формы с известным размером или известным распределением размеров, т.е. осуществляется по оптическому диаметру.

Пожалуй, самой большой проблемой косвенных оптических методов измерений, с учетом конструктивных особенностей серийно изготавливаемых технических средств их реализации, является неприспособленность последних для дисперсного анализа микрофизических параметров аэрозольных образований для снижения заметности. Как уже было отмечено, измерительные каналы большинства современных приборов, реализующих косвенные оптические методы, не приспособлены для анализа аэрозолей в естественной форме. Чаще всего конструктивно они обеспечивают анализ порошкообразных проб, которые подвергаются предварительной подготовке перед введением в измерительный канал либо диспергированием в жидкости или в воздушном потоке, либо вводятся в свободном падении. Это относится и к отечественным анализаторам размеров частиц ФОТОКОР (ООО «Фотокр», Россия) и ЛАСКА (ООО «БиоМедСистем», Россия, г.р. № 72792–18), которые могут выполнять анализ только жидких проб.

Приборы, выполняющие измерения линейной последовательности единичных частиц (счетчики частиц), хотя, во многих случаях, и позволяют забирать пробу непосредственно из естественной (нативной) формы аэрозоля, однако перед подачей в измерительный канал подвергают ее существенной трансформации, в том числе способствующей деагломерации и разрушению частиц (рисунок 11).

Следует также учитывать возможность оседания частиц на стенках узких измерительных каналов, что ведет к занижению измеряемого количества частиц и постепенному загрязнению каналов, что особенно критично в зоне измерений.

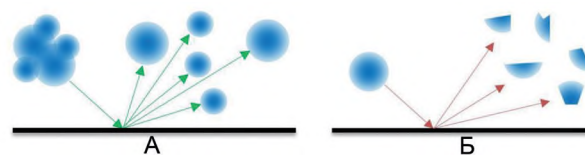


Рисунок 11 – Схематическая иллюстрация деагломерации (А) и разрушения частиц (Б) в процессе принудительного движения пробы в измерительном канале (URL: www.paar.ru; дата обращения: 15.04.2024)

Figure 11: Schematic illustration of deagglomeration (A) and particle destruction (Б) during forced sample movement in the measuring channel (URL: www.paar.ru; access date: 15.04.2024)

Применение значительных аэродинамических и механических воздействий на аэрозольные системы сопровождается искажениями как состава, так и размеров частиц, например, приводит к разрушению частиц и агломератов, образовавшихся в нативном аэрозоле в результате коагуляции, что может оказать существенное влияние на результаты измерений. Внесение конструктивных изменений в измерительные каналы таких приборов в большинстве случаев невозможно без изменения характеристик приборов, в том числе без корректировки их программного обеспечения, поскольку большинство параметров определяются путем вычислений. Такие изменения могут быть качественно выполнены только изготовителем после проведения необходимых испытаний.

Исключением являются несколько типов лазерных дифракционных анализаторов, конструктивное исполнение которых имеет не узкий измерительный канал, а достаточно широкое пространство между источником и приемником оптического излучения, такие как AEROTRAC II (фирма Microtrac, Inc., США)¹⁶, SPRAYTEC (фирма Malvern Panalytical Ltd., Великобритания)¹⁷, PW180-C (NKT Analytical Instruments, Китай)¹⁸ (рисунок 12).

Эти приборы сконструированы специально для исследований медицинских аэрозолей (спреев), что в наибольшей степени соответствует задаче исследований аэрозольных образований для снижения заметности.

¹⁵ МП 242-2426-2021 Государственная система обеспечения единства измерений. Анализаторы размера частиц Wintrac. Методика поверки. СПб: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». 2011. 6 с. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/api/downloadfile/7f23640f-c77f-4532-8b22-a3d155bdac36> (дата обращения 15.04.2024).

¹⁶ URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).

¹⁷ URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).

¹⁸ URL: www.rvs-ltd.ru (дата обращения: 15.04.2024).

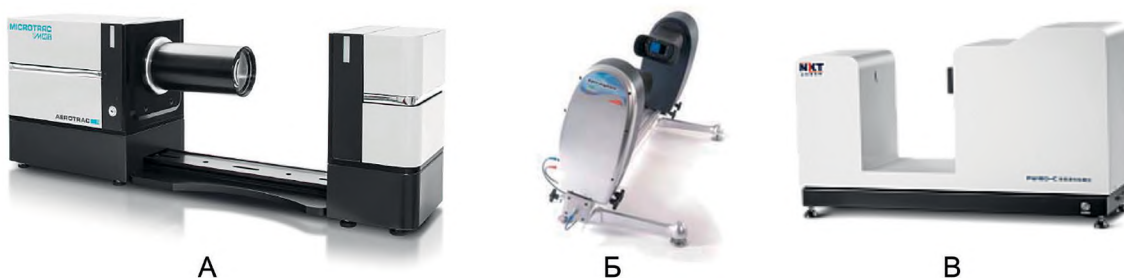


Рисунок 12 – Внешний вид приборов для анализа дисперсных характеристик спреев: А – AEROTRAC II (URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf>; дата обращения: 15.04.2024), Б – SPRAYTEC (URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf>; дата обращения: 15.04.2024), В – PW180-C (URL: www.rvs-ltd.ru; дата обращения: 15.04.2024)

Figure 12: External appearance of devices for analyzing the dispersion characteristics of sprays: A, AEROTRAC II (URL: <https://www.microtrac.com/files/80618/aerotrac-ii.pdf>; access date: 15.04.2024); Б, SPRAYTEC (URL: <https://malvern.nt-rt.ru/images/manuals/9.pdf>; access date: 15.04.2024); В, PW180-C (URL: www.rvs-ltd.ru; access date: 15.04.2024)

И наконец, самым важным ограничением возможности применения того или иного метода и конкретных технических средств их реализации является соответствие доступного для них диапазона измерений размеров объектов диапазону распределения выбранного эквивалентного размера частиц аэрозольного образования. В соответствии с приводимыми в различных источниках данными, туманы имеют достаточно крупный размер частиц в диапазоне от 1 до 100 мкм [5, 33], в то время как у дымов размеры частиц меньше и составляют от 0,1 до 10 мкм [4, 5, 73, 74]. Однако сведения о диапазонах распределения размеров частиц в дымах у разных авторов несколько расходятся. Кроме того, размеры частиц могут значительно варьироваться в зависимости от типа аэрозольного образования, способа и условий его формирования, а также авторы обычно не указывают, какие именно эквивалентные размеры были использованы.

Приборы, реализующие метод интенсивности рассеянного света (счетчики частиц), типично позволяют измерять размеры частиц от 0,2 до 40 мкм, приборы динамического анализа изображений – от 0,8 до 1000 мкм, лазерные дифракционные анализаторы – от 0,1 до 1000 мкм (и более). Для оптической микроскопии минимальные размеры наблюдаемых объектов составляют 0,28 мм, при использовании иммерсионных систем – 0,18 мкм, при использовании ультрафиолетового света можно добиться разрешения 0,1 мкм [54]. Для электронной и конфокальной лазерной микроскопии ограничений при измерениях частиц минимальных размеров практически нет, но могут возник-

нуть проблемы с измерением размеров более крупных частиц.

Таким образом, выполнять измерения во всем предполагаемом диапазоне распределения размеров частиц дыма без ограничений возможно только с использованием лазерного дифракционного анализа, хотя он имеет ряд других существенных ограничений, описанных выше. Кроме того, следует учитывать, что речь идет не об исследовании дымов вообще, а об аэрозольных образованиях для снижения заметности, которые могут содержать как твердые частицы, характерные для дыма, так и более крупные жидкие, характерные для туманов. При этом можно предположить, что большая часть частиц, вероятно, наиболее значимая для экстинкции, будет находиться в диапазоне размеров более 0,5 мкм, т.е. будет доступна для измерения почти всеми рассмотренными методами.

Совместное применение различных методов

Учитывая вышеизложенное, можно прийти к выводу, что ни один из рассмотренных методов в совокупности с конструктивными ограничениями средств их реализации не позволяет в полном объеме исследовать дисперсные характеристики и не дает гарантии достоверности результатов дисперсного анализа частиц ДФ аэрозолей в нативной форме. Решение этой проблемы возможно одновременным или последовательным применением различных прямых и косвенных методов измерений, в том числе с разным порогом чувствительности.

Перспективность такого подхода осознается и некоторыми изготовителями при-

боров дисперсного анализа. Объединение методов лазерной дифракции и динамического анализа изображений реализована, например, в анализаторе размера и формы частиц Microtrac SYNC (фирма Microtrac Ink., США, г.р. № 88681–23). Пользователь может по своему усмотрению выполнять анализ методом лазерной дифракции или посредством динамического анализа изображений, а также сочетать оба метода с помощью специальной опции программного обеспечения. Однако детали совместного применения обоих методов в общедоступных документах изготовителем не описаны.

Применительно к исследованию микрофизических характеристик аэрозольных образований для снижения заметности представляется целесообразным на данном этапе для измерений размеров частиц ДФ в качестве прямого метода применять метод статического анализа изображений, в первую очередь потому, что пока отсутствуют пригодные для этих целей приборы динамического анализа изображений. Следует также учитывать, что большинство приборов косвенных оптических измерений, за исключением счетчиков частиц, не предназначены для использования в полевых условиях. Метод статического анализа изображений предусматривает предварительный отбор образцов методом фильтрации, что вполне реализуемо практически в любых условиях, включая полевые.

Кроме того, оптические методы не позволяют производить прямое измерение массовой концентрации ДФ. Вычисление их на основании размерных параметров, получаемых оптическими методами, требует дополнительных сведений о свойствах материала частиц, что не всегда доступно. Методы седиментации также являются косвенными и, в общем случае, нуждаются в градуировке с использованием прямых методов. Наилучшим решением для измерения массовой концентрации является использование прибора, реализующего гравиметрический, пьезобалансный или ТЕОМ прямой метод измерений.

Однако применение фильтрационного метода, хотя это увеличивает трудоемкость и накладывает дополнительные ограничения на точность измерений, тем не менее, позволяет определять массовую концентрацию ДФ самым простым способом: путем взвешивания

на лабораторных весах фильтра до и после отбора проб.

В качестве дополнительного средства для проведения большого объема измерений в лабораторных условиях могут рассматриваться лазерные дифракционные анализаторы, предназначенные для анализа медицинских спреев в совокупности со специально изготовленными камерами генерации аэрозолей и каналами их подачи в зону измерений естественным способом или с незначительными стимулирующими воздействиями. Уменьшение влияния формы и оптических свойств частиц на результаты измерений, теоретически может быть достигнуто за счет создания методик градуировки на основе метода статического анализа изображений.

Заключение

Для исследования влияния микрофизических свойств дисперсной фазы аэрозольных средств снижения заметности на поглощение и рассеяние электромагнитного излучения в оптическом, инфракрасном и радиолокационном диапазоне и на пространственно-временную устойчивость аэродисперсных систем необходимо проведение измерений свойств отдельных частиц, в первую очередь их формы, размеров, счетной концентрации и статистического распределения в аэрозольном образовании. Наиболее подходящим для этого, по мнению авторов, является совместное применение нескольких прямых и косвенных методов измерений, минимальный состав которых с учетом конструктивных особенностей реализующих их технических средств, может состоять из средств измерений, использующих методы фильтрационного разделения фаз (аспиратора), взвешивания (весов лабораторных специального класса), статического анализа изображений (микроскоп с программным обеспечением для дисперсного анализа изображений) и лазерного дифракционного анализа (в конструктивном исполнении с разнесенными источниками и приемниками). В настоящее время все перечисленное оборудование, за исключением приборов для лазерного дифракционного анализа, выпускается отечественной промышленностью. Например, анализатор структур многомасштабный SIAMS 800 (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург)¹⁹ с системой искусственного интеллекта для распознавания и классификации объектов²⁰.

¹⁹ URL: <https://siams.com/siamss800/?ysclid=mdhdbv76zg424066474> (дата обращения: 15.04.2024).

²⁰ URL: https://siams.com/siams_aim (дата обращения: 15.04.2024)

Ограничения исследования / Limitations of the study

Обусловлены использованием только открытых источников, в том числе доступных через сеть Интернет, а также научно-технической литературы, национальных и международных стандартов, технических описаний фирм-изготовителей оборудования, рассмотрены измерения только некоторых наиболее значимых микрофизических свойств частиц дисперсной фазы (формы, размеров, распределения по размерам и концентрации) наиболее распространенными в настоящее время методами исследований / Due to the use of only open sources, including those available via the Internet, as well as scientific and technical literature, national and international standards, and technical descriptions of equipment manufacturers, measurements of only some of the most significant microphysical properties of dispersed phase particles (shapes, sizes, concentrations, and size distributions) are considered to be the most common at present. research methods.

Список источников / References

1. Колесников ДП, Пенязь ВН, Голышев МА, Буряк ДН, Артамонов ИВ. Влияние дисперсности аэрозоля на его маскирующую способность. *Вестник войск РХБ защиты*. 2021;5(3):260–68.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
2. Kolesnikov DP, Penyaz VN, Golyshev MA, Buryak DN, Artamonov IV. Effect of Aerosol Dispersion on Its Masking Ability. *Journal of NBC Protection Corps*. 2021; 5(3): 260–68 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2021-5-3-260-268>
3. Брусенин АА, Красильников СА, Пенязь ВН, Буряк ДН, Артамонов ИВ, Бурков ВД. Аналитическая зависимость вероятности маскировки объектов от плотности и дисперсности аэрозоля. *Вестник войск РХБ защиты*. 2023;7(1):53–61.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
4. Brusenin AA, Krasilnikov SA, Penyaz VN, Buryak DN, Artamonov IV, Burkov VD. Analytical Dependence of the Probability of Masking Objects on the Density and Dispersion of the Aerosol. *Journal of NBC Protection Corps*. 2023;7(1):53–61 (in Russian).
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2023-7-1-53-61>
5. Фукс НА. *Механика аэрозолей*. М.: Эксмо; 2009. 351 с.
6. Fuks NA. *Mechanics of aerosols*. Moscow: Eksmo; 2009. 351 p. (in Russian).
7. Райст П. *Аэрозоли. Введение в теорию*. М.: Мир; 1987. 280 с.
8. Raist P. *Aerosols. Introduction to theory*. Moscow: Mir; 1987. 280 p. (in Russian).
9. Грин Г., Лейн В. *Аэрозоли – пыли, дымы и туманы*. Ленинград: Химия; 1972. 427 с.
10. Grin G., Lein V. *Aerosols – dusts, smokes and fogs*. Leningrad: Chemistry; 1972. 427 p. (in Russian).
11. Вейцер ЮИ, Лучинский ГП. *Маскирующие дымы*. М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы; 1947. 203 с.
12. Veitser YuI, Luchinsky GP. *Screening smokes*. Moscow: State research technical publishing of chemical literature; 1947. 203 p. (in Russian).
13. Зайцев ГС, Кузнецов АЯ. *Дымовые средства и дымообразующие вещества*. М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР; 1961. 83 с.
14. Zaitsev GS, Kuznetsov AI. *Smoke products and smoke-generating substances*. Moscow: Military publishing house of the Ministry of Defense Union SSR; 1961. 83 p.
15. Ивлев ЛС, Довгальук ЮА. *Физика атмосферных аэрозольных систем*. Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ; 1999. 194 с.
16. Ivlev LS, Dovgalyuk YuA. *Physics of atmospheric aerosol screens*. Saint-Petersburg: NIIN SPbGU; 1999. 194 p. (in Russian).
17. Семенченко БА. *Физическая метеорология*. М.: Аспект Пресс; 2002. 387 с.
18. Semenchenko BA. *Physical meteorology*. Moscow: Aspect Press; 2002. 387 p. (in Russian).
19. Кондратьев КЯ, Москаленко НИ, Поздняков ДВ. *Атмосферный аэрозоль*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1983. 254 с.
20. Kondrat'ev KYa, Moskalenko IA, Pozdnyakov DV. *Atmospheric aerosol*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 254 p. (in Russian).
21. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. *Математическое моделирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Монография*. Санкт-Петербург: издательство РГТУ; 2012. 83 с.
22. Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. *Mathematic modeling of optic characteristics of an optic aerosol. Monograph*. Saint-Petersburg: RGGMU publishing; 2012. 83 p. (in Russian).
23. Ишматов АН, Ахмадеев ИР. Применение метода малоуглового рассеяния лазерного излучения при исследовании импульсного распыления жидкостей. *Оптика атмосферы и океана*. 2013;26(1):81–4.

Ishmatov AN, Akhmadeyev IR. Application of the low-angle laser light scattering method for studying the pulse liquid atomization. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2013;26(1):81–4 (in Russian).

13. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля. *Ученые записки РГГМУ*. 2009;(11):71–8.

Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. Determining the optic and microstructural characteristics of an atmospheric aerosol. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2009;(11):71–8 (in Russian).

14. Валиулин СВ, Онищук АА, Бакланов АМ, Карасев ВВ, Дульцева ГГ. Измерительный аэрозольный комплекс. *Оптика атмосферы и океана*. 2024;37(06):496–501.

<https://doi.org/10.15372/AOO20240608>

Valiulin SV, Onischuk AA, Baklanov AM, Karasev VV, Dultseva GG. Aerosol measuring complex. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2024;37(06):496–501.

<https://doi.org/10.15372/AOO20240608>

15. Сакерин СМ., Зенкова ПН., Кабанов ДМ, Калашникова ДА, Лисицын АП, Макаров ВИ, Полькин ВВ и др. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». *Оптика атмосферы и океана*. 2020;33(05):358–67.

<https://doi.org/10.15372/AOO20200505>

Sakerin SM, Zenkova PN, Kabanov DM, Kalashnikova DA, Lisitzin AP, Makarov VI, Polkin VV, et al. Results of studying physicochemical characteristics of atmospheric aerosol in the 71st cruise of RV “Akademik Mstislav Keldysh”. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2020; 33(05):358–67.

<https://doi.org/10.15372/AOO20200505>

16. Козлов ПА. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград: Химия; 1971. 280 с.

Kozlov PA. *Basics of analysis of particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1971. 280 p. (in Russian).

17. Коузов ПА. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Ленинград: Химия, 1987. 264 с.

Kouзов PA. *Basics of analysis of particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1987. 264 p. (in Russian).

18. Хаякава И, ред. Чистые помещения. М.: Мир; 1990. 454 с.

Khayakava I, Ed. *Clean enclosures*. Moscow: Mir; 1990. 454 p. (in Russian).

19. Бурьянов ИА, Логачев КИ, Уваров ВА. Определение основных свойств пылевых частиц заточного участка. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020;(10):23–32.

<http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32>

Burianov IA, Logachev KI, Uvarov VA. Determination of the main properties of dust particles in the crinding area. *Bulletin of BSTU named after VG Shukhov*. 2020;(10):23–32 (in Russian).

<http://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-10-23-32>

20. Азаров ВН, Кузьмичев АА, Николенко ДА, Васильев АН, Козловцева ЕЮ. Исследование дисперсного состава пыли городской среды. *Вестник МГСУ*. 2020;15(3):432–42.

<http://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>

21. Hisman A, Ensor Azarov VN, Kuzmichev AA, Nikolenko DA, Vasilev AN, Koslovtseva EY. The research of dust dispersed composition of urban environment. *Vestnik MGSU*. 2020;15(3):432–42.

<http://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.432-442>

22. Башура ГС, Ефоян АС. Фармацевтические аэрозоли: научные разработки и организация производства. М.: Медицина; 1998. 236 с.

Bashura GS, Efoyan AS. *Pharmaceutical aerosols: scientific developments and production arrangement*. Moscow: Medicine; 1998. 236 p. (in Russian).

23. Терешкина ОИ, Павлов ВМ. Разработка проекта общей фармакопейной статьи «Аэрозоли». *Фармация*. 2005;(8):3–7.

Tereshkina OI, Pavlov VM. Development of project on a general pharmacopeial monograph “Aerosols”. *Pharmacia*. 2005;(8):3–7 (in Russian).

24. Медников ЕА. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Медицина; 1992. 422 с.

Mednikov EA. *Turbulent transmission and deposition of aerosols*. Moscow: Medicine; 1992. 422 p. (in Russian).

25. Fennelly K. Particle sizes of infectious aerosols: Implications for infection control. *Lancet Respiratory Medicine*. 2020;8(9):914–24.

[https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30323-4](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30323-4)

26. Пузач СВ, Журавлев ЮЮ, Болдрушкиев ОБ, Акперов РГ. Экспериментальная оценка объемной концентрации и размеров твердых частиц дыма, образующихся при терморазложении горючих материалов. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация*. 2024;(2):5–12.

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-5>

Puzach SV, Zhuravlev YY, Boldrushkiev OB, Akperov RG. Experimental assessment of volume concentration and sized of solid smoke particles formed during thermal decomposition of combustible materials. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2024;(2):5–12 (in Russian).
<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-5>

27. Борен К, Хафмен Д. *Поглощение и рассеяние света малыми частицами*. М.: Мир; 1986. 664 с.
Boren K, Khafmen D. *Absorption and dispersion of light by small particles*. Moscow: Mir; 1986. 644 p. (in Russian).

28. Хюлст Г. *Рассеяние света малыми частицами*. М.: Издательство иностранной литературы; 1961. 536 с.

Khyulst G. *Dispersion of lights by small particles*. Moscow: Publishing of foreign literature; 1961. 536 p. (in Russian).

29. Дейрмеджан Р. *Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами*. М.: Мир; 1971. 303 с.

Deimerdzhian R. *Dispersion of electromagnetic pulse by spherical polydisperse particles*. Moscow: Mir; 1971. 303 p. (in Russian).

30. Степанова БИ, Иванова АП. *Теоретические и прикладные проблемы рассеяния света*. Минск: Наука и техника; 1971. 487 с.

Stepanova BI, Ivanova AP (ed.). *Theoretical and applied problems of light dispersion*. Minsk: Science and technology; 1971. 487 p. (in Russian).

31. Перельман АЯ. Дифракция на сферически симметричных неоднородных структурах. *Оптика и спектроскопия*. 1995;78(5):822–31.

Perel'man AY. Diffraction on spherically symmetric heterogeneous structures. *Optics and spectroscopy*. 1995;78(5):882–31 (in Russian).

32. Басманов ПИ, Кириченко ВН, Филатов ЮН, Юров ЮЛ. *Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова*. М.: Наука; 2002. 193 с.

Basmanov PI, Kirichenko VN, Filatov YuN, Yurov YuL. *High efficiency gas purification from aerosols by Petryanov filters*. Moscow: Nauka; 2002. 193 p. (in Russian).

33. Исмаилов Ф. *Атмосферный аэрозоль*. Lap Lambert Academic Publishing; 2019. 357 с.

Ismailov F. *Atmospheric aerosol*. Lap Lambert Academic Publishing; 2019. 357 p. (in Russian).

34. Шахов М. Краткое руководство по методам определения размеров частиц. *Чистые помещения и технологические среды*. 2019;(3):8–21.

Shakhov PI. Brief guidance to the methods of identifying particle sizes. *Clean enclosures and technological media*. 2019;(3):8–21 (in Russian).

35. Sipkens TA, Boies A, Corbin JC, Chakrabarty RK, Olfert J, Rogak SN. Overview of methods to characterize the mass, size, and morphology of soot. *Journal of Aerosol Science*. 2023;(173):106211.

<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106211>

36. Тябина ИВ, Шахнович ОА. Современные методы гранулометрического анализа. Лазерные анализаторы размера частиц Winner. *Лаборатория и производство*. 2023;(2):48–57.

<https://doi.org/10.32757/2619-0923.2023.2.24.48.56>

Tyabina IV, Shakhnovich OA. Modern methods of grain size measurements. Laser analyzers of Winner particles' size. *Laboratory and manufacturing*. 2003;(2):48–57 (in Russian).

<https://doi.org/10.32757/2619-0923.2023.2.24.48.56>

37. Балаханов МВ. О создании системы метрологического обеспечения измерений дисперсных параметров аэрозолей и взвесей. *Альманах современной метрологии*. 2014;(1):185–232.

Balakhanov MV. On the creation of a system of metrological assurance for disperse parameters of aerosols and suspensions. *Almanac of modern metrology*. 2014;(1):185–232 (in Russian).

38. Роул А. Основные принципы анализа размеров частиц. Доступ:

<http://www.rusnanonet.ru/download/equipment/mrk0034r01.pdf>

Rowle A. *General principles of particle size analysis*. Available from:

<http://www.rusnanonet.ru/download/equipment/mrk0034r01.pdf> (in Russian).

39. Шифрин КС. *Рассеяние света в мутной среде*. М.: Гостехтеориздат; 1951. 264 с.

Shifrin KS. *Dispersion of light in a turbid medium*. Moscow: Gostechteorizdat; 1951. 254 p. (in Russian).

40. Шифрин КС. Рассеяние света на двухслойных частицах. *Изв. АН СССР, серия геофизическая*. 1952;(2):15–28.

Shifrin KS. Dispersion of light on double-layer particles. *Bulletin of Academy of Sciences USSR, Geophysics*. 1952;(2):15–28 (in Russian).

41. Ржонсницкая ЮБ. Моделирование рассеяния излучения неоднородной аэрозольной частицей. *Труды ГГО*. 2011;(563):102–14.

Rzhonsnitskaya YuB. Modeling the dispersion of radiation by a heterogeneous aerosol particle. *Works of GGO*. 2011;(563):102–14 (in Russian).

42. Егоров АД, Потапова ИА, Ржонсницкая ЮБ, Саноцкая НА. *Математическое моделирование оптических характеристик атмосферного аэрозоля. Монография*. Санкт-Петербург: Издательство РГГМУ; 2012. 83 с.

Egorov AD, Potapova IA, Rzhonsnitskaya YuB, Sanotskaya NA. *Mathematical modeling of optical characteristics of an atmospheric aerosol. Monograph*. Saint-Petersburg: RGGMU publishing; 2012. 83 p. (in Russian).

43. Егоров АД, Ржонсницкая ЮБ, Потапова ИА, Саноцкая НА, Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений. *Естественные и технические науки*. 2010;(1):215–21.

Egorov AD, Rzhonsnitskaya YuB, Potapova IA, Sanotskaya NA. Determining the characteristics of an atmospheric aerosol by optical measurements' data. *Natural and technical science*. 2010;(1):215–21 (in Russian).

44. Бурштейн АИ. *Методы исследования аэрозолей*. Киев: Госмедиздат УССР; 1934. 226 с.

Burshtein AI. *Methods of research on aerosols*. Kiev: Gosmedizdat USSR; 1934. 226 p. (in Russian).

45. Спурный К, Йех Ч. *Аэрозоли*. М.: Атомиздат; 1989. 256 с.

Spurniy K, Yekh Ch. *Aerosols*. Moscow: Atomizdat; 1989. 256 p. (in Russian).

46. Коузов ПА, Скрыбина ЛЯ. *Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей*. Ленинград: Химия; 1983. 143 с.

Kouзов PA, Skryabina LYa. *Methods of determining the physical and chemical properties of industrial dusts*. Leningrad: Chemistry; 1983. 143 p. (in Russian).

47. Балаханов МВ, Карпов ОВ, Балаханов ДМ, Лесников ЕВ. Метрологическое обеспечение измерений дисперсных параметров аэрозолей и взвесей. *Нанотехнологии. Экология. Производство*. 2012;(16):102–4.

Balakhanov MV, Karpov OV, Balakhanov DM, Lesnikov EV. Meteorological assurance for measurements of aerosols' and suspensions' disperse parameters. *Nanotechnologies. Ecology. Manufacturing*. 2012;(16):102–4 (in Russian).

48. Редькина НИ. Автоматический фотоседиментометр для анализа гранулометрического состава порошков. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2001;67(3):31–7.

Red'kina NI. Automated photosedimentometer for the analysis of grain-size composition of powders. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2001;67(3):31–7 (in Russian).

49. Шишкин АС, Шишкин СФ, Илюнина ТВ. Сравнение методов фотоседиментации и лазерной дифракции при определении гранулометрического состава тонкодисперсных порошков. *Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I международной интерактивной научно-практической конференции, Екатеринбург 2011, 13–19 декабря 2011, Екатеринбург*. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2012. С. 194–7.

Shishkin AS, Shishkin SF, Ilyunina TV. Comparison of methos of photosedimentation and laser diffraction when identifying the grain-size composition of fine powders. *Innovations in material science and metallurgy: materials of I International interactive research to practice conference, 13–19 December 2011, Yekaterinburg*. Yekaterinburg: Ural university publishing; 2012. P. 194–7 (in Russian).

50. Клименко АП. *Методы и приборы для измерения концентрации пыли*. М.: Химия; 1978. 207 с.

Klimenko AP. *Methods and devices to measure dust concentration*. Moscow: Chemistry; 1978. 207 p. (in Russian).

51. Бельский ДИ, Балаханов ДМ, Магомедов ТМ. Обзор методов измерений массовой концентрации аэрозольных частиц. *Альманах современной метрологии*. 2018;(14):114–21.

Belen'kiy DI, Balakhnov DM, Magomedov TM. Review on the methods for measuring the mass concentration of aerosol particles. *Almanach of modern metrology*. 2018;(14):114–21 (in Russian).

52. Шувалов ГВ, Минин ОВ, Минин ИВ, Зонova АД. *Методика измерений размеров частиц аэрозолей на системе «Квантимет 720»*. Доступ:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniy-razmerov-chastits-aerozoley-na-sisteme-kvantimet-720>

Shuvalov GV, Minin OV, Minin IV, Zonov AD. *Methodology of measuring aerosols' particle size with "Kvantimet 720" system*. Available from:

<https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-izmereniy-razmerov-chastits-aerozoley-na-sisteme-kvantimet-720> (in Russian).

53. Heath J. *Dictionary of microscopy*. Wiley-VCH; 2005. 358 p.

54. Гаврилова НН, Назаров ВВ, Яровая ОВ. *Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов*. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева; 2012. 52 с.

Gavrilova NN, Nazarov VV, Yarovaya OV. *Micriscope methods to identify the particle size of disperse materials*. Moscow: RHTU named after D.I. Mendeleev; 2012. 52 p. (in Russian).

55. Коузов ПА. *Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов*. Ленинград: Химия; 1987. 246 с.

- Kouзов PA. *Basics of analyzing the particle size distribution of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad: Chemistry; 1987. 246 p. (in Russian).
56. Hagen T, Don R. Aerosol optical properties calculated from size distribution measurements: An uncertainty study. *Aerosol Science and Technology*. 2023;57(7):597–607.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2023.2202703>
57. Webb RH. Theoretical basis of confocal microscopy. *Methods in enzymology*. 1999;307:3–20.
58. Брянский ЛН, Дойников АС, Крупин БН. *Метрология. Шкалы, эталоны, практика*. М.: ВНИИФТРИ; 2004. 222 с.
- Bryansky LN, Doinikov AS, Krupin BN. *Metrology. Scales, etalons, practice*. Moscow: VNIIFTRI; 2004. 222 p. (in Russian).
59. Шеломенцев ИГ, Гомзикова ЕА. Перспективы анализа наночастиц в составе аэрозоля методом электронной микроскопии. *Гигиена и санитария*. 2023;102(3):259–64.
<https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264>
- Shelometsev IG, Gomzikova EA. Prospects of analyzing of nanoparticles in the composition in aerosol by the method of electro microscopy. *Hygiene and Sanitation*. 2023;102(3):259–64 (in Russian).
<https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-3-259-264>
60. Долматов АВ, Маклаков СС, Гаранов ВА, Беляйков ИН, Петров ДА, Ширяев АО, Осипов АВ, Старостенко СН. Учет формы частиц наполнителей композиционных материалов при гранулометрическом анализе для оценки диэлектрической проницаемости. *Современная электродинамика*. 2023;1(3):10–6.
- Dolmatov AV, Maklakov SS, Garanov VA, Belyaikov IN, Petrov DA, Shiryaev AO, Osipov AV, Starostenko SN. Studying the shape of a filler of a composite material during granulometric analysis, to evaluate the permittivity value. *Modern electrodynamics*. 2023;1(3):10–6 (in Russian).
61. Дорофеев НН, Андриевская ИА, Удовиченко ОА. Современные возможности и перспективы конфокальной лазерной сканирующей микроскопии в морфологических исследованиях (обзор литературы). *Бюллетень физиологии и патологии дыхания*. 2021;(81):135–41.
<https://doi.org/10.36604/1998-5029-2021-81-135-143>
- Dorofeenko NN, Andrievskaya IA, Udovichenko OA. Current opportunities and prospects of confocal laser scanning microscopy in morphological research (review). *Bulletin Physiology and Pathology of Respiration*. 2021;(81):135–41 (in Russian).
<https://doi.org/10.36604/1998-5029-2021-81-135-143>
62. Pérez JMM, Pascau J. *Image Processing with ImageJ*. Packt Publishing; 2013, 126 p.
63. Азаров ВН, Ребров ВА, Козловцева ЕЮ, Азаров АВ, Добринский ДР, Тertiшников ИВ и др. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде. *Инженерный вестник Дона*. 2018;(2):1–13 Доступ:
<https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/4976>
- Azarov VN, Rebrov VA, Kozlovtsseva EYu, Azarov AV, Dobrinsky DR, Tertishnikov IV, et al. On the improvement of the computer program algorithm to analyze the particle size distribution of dusts in the air. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018;(2):1–13. Available from:
<https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/4976> (in Russian).
64. Беляев СП, Никифорова НК, Смирнов ВВ, Щелчков ГИ. *Опτικο-электронные методы изучения аэрозолей*. М.: Энергоиздат; 1981. 232 с.
- Belyayev SP, Nikiforova NK, Smirnov VV, Schelchikov GI. *Optic electronic methods of aerosol emission*. Moscow: Energoizdat; 1981. 232 p. (in Russian).
65. Калечиц ВИ. Счетчики частиц и их основные характеристики. *Чистые помещения и технологические среды*. 2009;(1):2–7.
- Kalechits VI. Particle counters and their general features. *Clean enclosures and technological media*. 2009;(1):2–7 (in Russian).
66. Gautam P, Gautam P, Moosmüller H, Maughan J, Sorensen C. Light scattering from spherical and irregular particles over a wide angular range. *Aerosol Science and Technology*. 2024;58(9):1053–62.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2024.2338543>
67. Castellanos P, Colarco P, Espinosa W, Guzewich S, Levy C, Miller R, et al. Mineral dust optical properties for remote sensing and global modeling: a review. *Remote Sens Environ*. 2024;(303):113982.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113982>
68. Ceolato R., Berg M. Aerosol light extinction and backscattering: a review with a lidar perspective. *J. Quant. Spectrosc Radiat Transf*. 2021;262:107492.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107492>
69. Maughan J, Sorensen S. Universal parameter to describe the reduction of refraction effects in the scattering of absorbing spheres. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 2020;37(9):1456–64.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.394401>

70. Grubbs J., Tsakopoulos K., Massar C., Young B., O'Connell A., Walde C., et al. Comparison of laser diffraction and image analysis techniques for particle size-shape characterization in additive manufacturing applications. *Powder Technology*. 2021; (391):20-33.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.003>

71. Багдюн АА, Макаревич ВБ, Филистович ЕВ, Горошкова АН, Ивашенко ДВ. Эталонный комплекс для средств измерений параметров дисперсных сред. *Метрология и приборостроение*. 2021;(4):4–8.

Bagdyun AA, Makarevichi VB, Filistovich EV, Goroshkova AN, Ivashenko DV. Reference complex for measuring the parameters of dispersion media. *Metrology and instrumentation*. 2021;(4):4–8 (in Russian).

72. Шидловский АА. *Основы пиротехники*. М.: Машиностроение; 1973. 20 с.

Shidlovsky AA. *Basics of Pyrotechnics*. Moscow: Mashinostroenie; 1973. 320 p. (in Russian).

73. Чекман ИС. *Аэрозоли – дисперсные системы: Монография*. Харьков: «Цифрова друкарня № 1»; 2013. 101 с.

Chekman IS. *Aerosols – disperse system: Monograph*. Char'kov: "Tsifrova drukarnya No. 1"; 2013. 101 p. (in Russian).

74. Рахимов М, Макиенко ЭВ, Панченко МВ. Оптико-микрофизические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников. *Оптика атмосферы и океана*. 2010;(8):675–83.

Rakhimov M, Makienko EV, Panchenko MV. Optical-microphysical properties of mixed smokes from several separated sources. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2010;(8):675–83 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **В.Д. Иванов** – формирование концепции статьи, сбор, анализ и систематизация информации, изложенной в научной литературе, написание текста, редактирование рукописи, критические обсуждения материалов статьи; **В.П. Хантов** – критические обсуждения материалов статьи; **Р.С. Лошманов** – анализ данных научной литературы. / All the authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions were as follows, **V.D. Ivanov** – elaboration of the concept of the paper; collection, analysis and systematization of scientific literature; writing and editing of the article, critical discussion of the article; **V.P. Khantov** – critical discussion of the article; **R.S. Loshmanov** – analysed scientific literature.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия радиационной, химической и биологической защиты имени Маршала Советского Союза С.К. Тимошенко (г. Кострома)» Министерства обороны Российской Федерации, 156013, Костромская область, г. Кострома, ул. Горького, д. 16.

Иванов Владимир Дмитриевич. Научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории.

Хантов Вячеслав Павлович. Начальник кафедры, канд. хим. наук, доцент.

Пошманов Роман Сергеевич. Начальник научно-исследовательской лаборатории, канд. техн. наук.

Контактная информация для всех авторов: varhbz@mil.ru
Контактное лицо: Иванов Владимир Дмитриевич; varhbz@mil.ru

Nuclear Biological Chemical Defence Military Academy Named after Marshal of the Soviet Union S.K. Timoshenko (Kostroma), the Ministry of Defence of the Russian Federation, 16, Gorky St., Kostroma 156015, Russian Federation.

Vladimir D. Ivanov. Researcher of Research Laboratory.

Vyacheslav P. Khantov, Head of Department, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor.

Roman S. Loshmanov. Head of Research Laboratory. Cand. Sci. (Techn.).

Contact information for all authors: varhbz@mil.ru

Contact person: Vladimir D. Ivanov; varhbz@mil.ru