

УДК 544.772

## Измерительный аэрозольный комплекс

С.В. Валиулин<sup>✉</sup>, А.А. Онищук, А.М. Бакланов,  
В.В. Карасев, Г.Г. Дульцева\*

*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3*

Поступила в редакцию 24.01.2024;

после доработки 25.03.2024;

принята к печати 26.03.2023

Измерительное оборудование, способное в режиме реального времени определять характеристики частиц в газовой фазе, необходимо при проведении широкого спектра исследований, включая изучение влияния антропогенных загрязнений на климатические изменения и здоровье человека, а также при разработке новых способов доставки лекарственных средств и синтезе нанокompозитных материалов. Представлен разработанный и созданный в ИХКГ СО РАН измерительный комплекс, включающий диффузионный аэрозольный спектрометр, оптический аэрозольный спектрометр и измеритель массовой концентрации аэрозоля. Проведены лабораторные испытания приборов измерительного комплекса с использованием стандартных тестовых систем. Сопоставление показало хорошее согласие измеренных размеров частиц с данными, полученными независимыми методами (просвечивающая электронная микроскопия, измерение скорости седиментации частиц). Приборы комплекса позволяют измерять концентрацию и размер аэрозольных частиц в широком диапазоне значений с представлением результатов в реальном времени. Измерительный комплекс может быть использован в лабораторных и полевых исследованиях в области химии, физики и медицины, а также на станциях мониторинга состояния воздуха окружающей среды.

**Ключевые слова:** городской аэрозоль, аэрозоль, концентрация частиц, оптический спектрометр аэрозоля, диффузионный спектрометр аэрозоля, средний размер частиц; aerosol, particle concentration, optical aerosol spectrometer, diffusion aerosol spectrometer, mean particle size.

### Введение

Исследование свойств аэродисперсных систем (аэрозолей) требуется при мониторинге загрязнений атмосферы городов и изучении влияния этого загрязнения на климатические изменения [1, 2] и здоровье человека [3, 4], при разработке новых [5–7] способов доставки лекарственных средств и улучшения уже существующих, а также для синтеза новых перспективных нанокompозитных материалов [8].

Методы характеристики аэрозольных частиц условно можно подразделить на два вида: 1) с предварительным отбором проб [9] с последующим исследованием аппаратными методами; 2) измерения в реальном времени. К первым относятся, например, все виды микроскопии и гравиметрический анализ. Эти методы считаются эталонными, так как позволяют напрямую измерить концентрацию и размер частиц [10]. Кроме того можно наблюдать и мор-

фологию изучаемых объектов. Однако эти методы являются трудоемкими и времязатратными.

Средства измерений в реальном времени представлены различными видами спектрометров и счетчиков [11–13]. Они позволяют непосредственно в ходе эксперимента регистрировать параметры аэрозольных частиц и наблюдать динамику их изменений. Несмотря на явное преимущество, заключающееся в снижении трудозатрат и сокращении времени получения данных, такие средства имеют ряд недостатков [14, 15]: наличие радиоактивного источника или источника высокого напряжения, ограниченный диапазон измеряемых размеров и концентраций, а также предварительная калибровка.

Преодолеть некоторые из этих недостатков и ограничений позволяет одновременное использование нескольких измерительных приборов, работающих на различных принципах и не требующих предварительной калибровки оборудования [16–18].

Цель настоящей работы — демонстрация возможностей комплекса приборов, разработанных и созданных в ИХКГ СО РАН, которые позволяют измерять концентрацию и размер аэрозольных частиц в широком диапазоне значений с представлением результатов в реальном времени.

\* Сергей Владимирович Валиулин (valiulin@kinetics.nsc.ru); Андрей Александрович Онищук (onischuk@yandex.ru); Анатолий Максимович Бакланов (anatoli@kinetics.nsc.ru); Владимир Васильевич Карасев (karasev@kinetics.nsc.ru); Галина Григорьевна Дульцева (dultseva@kinetics.nsc.ru).

## 1. Описание измерительного комплекса

Измерительный аэрозольный комплекс включает в себя три независимых прибора: диффузионный аэрозольный спектрометр ДСА-М, оптический аэрозольный спектрометр ОСА и измеритель массовой концентрации аэрозоля, которые могут быть использованы как в рамках единого комплекса, так и по отдельности. На рис. 1 изображены спектрометры ОСА и ДСА-М. В таблице представлены основные технические характеристики приборов. Как видно, благодаря объединению в единую измерительную систему значительно увеличен диапазон регистрируемых размеров, по сравнению с возможностью каждого прибора в отдельности. Кроме того, становится возможным измерение сложных аэрозольных систем (например, атмосфера городов), содержащих несколько мод, которые обусловлены различными механизмами образования этих частиц.

*Диффузионный аэрозольный спектрометр ДСА-М* состоит из диффузионной батареи, конденсационного укрупнителя и фотоэлектрического счетчика. Принцип работы ДСА-М основан на определении подвижности частиц с помощью десятикаскадной диффузионной батареи и последующего восстановления распределения по размерам частиц из известной зависимости этой подвижности от размера [19–21]. Батарея организована в виде последовательности секций (каскадов), первая из которых пустая и служит для определения общей концентрации аэрозольных частиц, а остальные заполнены капроновыми сетками, установленными перпендикулярно потоку.

Теория сетчатых батарей впервые была сформулирована в работах [22, 23], после чего батареи этого типа стали наиболее популярными, поскольку они универсальны, компактны и имеют простую конструкцию. Батарея состоит из ряда секций, заполненных параллельно установленными сетками, количество которых постепенно увеличивается в каждой



а



б

Рис. 1. Внешний вид диффузионного аэрозольного спектрометра ДСА-М (а) и оптического аэрозольного спектрометра ОСА (б)

последующей секции. По мере прохождения аэрозоля через батарею частицы оседают на поверхности сеток. Экспериментально определяют проскок частиц через каждую секцию батареи, т.е. отношение

Технические характеристики приборов измерительного аэрозольного комплекса

| Характеристика                                         | Диффузионный аэрозольный спектрометр ДСА-М      | Оптический аэрозольный спектрометр ОСА | Измеритель массовой концентрации аэрозоля  |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Диапазон измеряемых размеров частиц                    | 3–1100 нм                                       | 0,3–10 мкм                             | $\geq 300$ нм                              |
| Регистрация распределения частиц по размерам           | Да                                              | Да                                     | Нет                                        |
| Диапазон измеряемых концентраций частиц                | $10-3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$               | $10-3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$      | $0,01-1000 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ |
| Погрешности измерений концентрации и размера частиц, % | $\pm 10$                                        | $\pm 10$                               | $\pm 10$                                   |
| Время одного измерения                                 | от 5 с<br>от 3 мин (в режиме измерения размера) | от 10 с                                | от 5 с                                     |
| Объемная скорость забора пробы, л · мин <sup>-1</sup>  | 1                                               | 0,4                                    | 0,4                                        |
| Габариты прибора (В × Ш × Д), мм                       | 450 × 150 × 280                                 | 250 × 150 × 280                        | 250 × 150 × 280                            |
| Напряжение питания                                     |                                                 | 220 Вт                                 |                                            |

концентрации частиц на выходе из каждой секции к их концентрации на входе.

Для восстановления распределения частиц по размерам по экспериментально измеренным проскокам необходимо использовать процедуру, называемую инверсией, т.е. должна быть решена так называемая некорректно поставленная обратная задача. Для ее решения были разработаны различные методы, в том числе графические [24–30] и аналитические [31–33]. Однако они слишком трудоемки или могут быть применены только к одномодовым распределениям частиц по размерам. Также были разработаны различные численные методы для решения обратной задачи, включая итерационные методы [34–36], метод регуляризации Тихонова [37, 38], метод наименьших квадратов [39, 40], метод максимальной энтропии [41–43] и др. Основными недостатками численных методов являются неединственность решения и математически сложная процедура поиска наилучшего решения из бесконечного набора распределений по размерам.

Недавно был предложен новый простой алгоритм аналитической инверсии [19–21] для определения распределения аэрозольных частиц по размерам из их проскоков через диффузионную батарею, который и был реализован в ДСА-М. Преимущества данного аналитического подхода заключаются в том, что он дает однозначное соответствие между проскоками и результирующим распределением по размерам без необходимости сложной математической обработки и позволяет измерять спектры размеров аэрозольных частиц, содержащего несколько размерных мод.

Количество частиц, прошедших через определенное число секций диффузионной батареи ДСА-М, вычисляется с помощью фотоэлектрического счетчика частиц, содержащего аэрозольную кювету, блок фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и осветитель. Для этого частицы, выходящие из секций диффузионной батареи, предварительно увеличиваются до размера  $\sim 0,8$  мкм в конденсационном укрупнителе. В качестве рабочего вещества конденсационного укрупнителя используется дибутилфталат. Осветитель оптического счетчика создает в зоне наблюдения внутри аэрозольной кюветы световой пучок сечением  $0,05$  мм<sup>2</sup>. При пересечении светового пучка частицей рассеянный ею свет собирается объективом приемной ветви, направляется на ФЭУ, где преобразуется в электрический импульс, который фиксируется электронной схемой. В результате измеряется число импульсов от частиц, прошедших через аэрозольную кювету, которое пересчитывается в аэрозольную концентрацию.

Работа *оптического аэрозольного спектрометра ОСА* основана на регистрации амплитуды света, рассеянного аэрозольной частицей при ее пролете через луч от источника излучения. Аэрозольный поток поступает в фотоэлектрический счетчик спектрометра, состоящего из аэрозольной кюветы, блока фотоэлектронного умножителя и осветителя. Осветитель оптического счетчика создает световой пучок в зоне наблюдения внутри аэрозольной кю-

веты. При пересечении частицей светового пучка рассеянный ею свет собирается объективом приемной ветви, направляется на ФЭУ, где преобразуется в электрический импульс, который фиксируется электронной схемой. В результате измеряется амплитуда рассеянного света, по которой определяется размер частицы. Обработка последовательности таких импульсов дает распределение частиц по размерам и общую концентрацию аэрозоля.

*Измеритель массовой концентрации аэрозоля* регистрирует интегральную интенсивность рассеянного света от потока аэрозольных частиц. Этот поток поступает в оптический модуль измерителя, включающего в себя осветитель (светодиод) и фотодиод в качестве устройства, регистрирующего рассеянный свет. При пересечении светового пучка потоком частиц рассеянный свет собирается объективом приемной ветви и направляется на фотодиод, где преобразуется в электрический сигнал, который фиксируется электронной схемой и преобразуется в текущее значение массовой концентрации аэрозольных частиц.

Управление комплексом осуществляется персональным компьютером с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое позволяет запускать, останавливать и устанавливать режимы замеров. Программное обеспечение в режиме реального времени на основе измеренных параметров представляет в графическом и числовом виде распределения по размерам аэрозольных частиц, их средний размер и концентрацию. Для биомедицинских исследований предусмотрена возможность определения ингаляционной дозы, получаемой лабораторными животными в течение эксперимента.

## 2. Результаты испытаний приборов комплекса

Для лабораторных испытаний приборов измерительного комплекса были использованы аэрозоли стандартных латексных частиц ОМИСК (ФГБУ НИИСК, г. Санкт-Петербург). Измеренные ДСА-М и ОСА размеры сопоставлены с данными, полученными методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и по скорости оседания частиц в кювете Милликена.

Массовую концентрацию аэрозольных частиц измеряли гравиметрическим методом. Для этого одновременно с измерением прибором осуществляли отбор аэрозоля на стекловолокнистый фильтр (WhatmanGF/A 25 мм). Массу осадка определяли путем взвешивания на аналитических весах и спектрофотометрически, для чего осадок тщательно смывали с фильтра растворителем. Массовая концентрация  $C_m$  может быть легко найдена из соотношения  $C_m = m/(Qt)$ , где  $m$  — масса осадка на фильтре;  $Q$  — объемная скорость потока аэрозоля через фильтр;  $t$  — время отбора.

На рис. 2 и 3 приведены результаты сопоставления средних размеров аэрозольных частиц, измеренных с помощью приборов ДСА-М и ОСА,

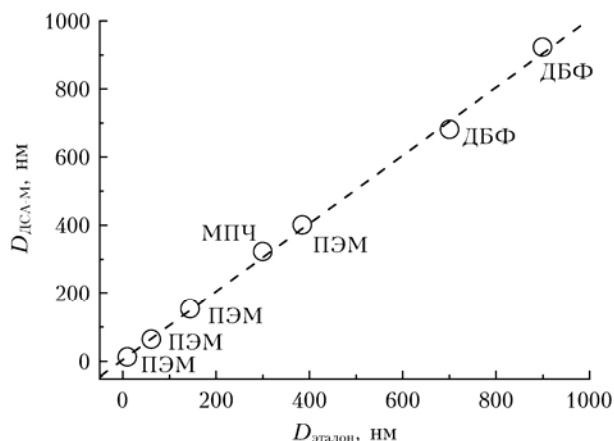


Рис. 2. Сопоставление среднего размера аэрозольных частиц, измеренного ДСА-М, с эталонным: ПЭМ — данные, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа, МПЧ — монодисперсные полистирольные частицы, ДБФ — данные, полученные по скорости осаждения аэрозольных капель из дибутилфталата

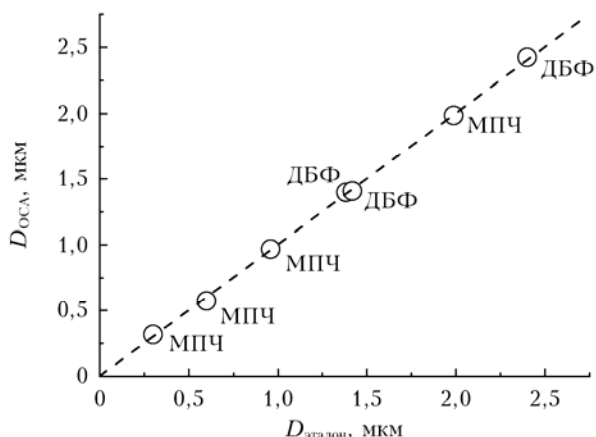


Рис. 3. Сопоставление среднего размера аэрозольных частиц, измеренного ОСА, с эталонным. Обозначения см. на рис. 2

с эталонными. Сопоставление результатов измерения распределения частиц по размерам с данными ПЭМ для ДСА-М приведено на рис. 4. Из рисунков видно хорошее согласие результатов измерений.

На рис. 5 приведены результаты сопоставления массовой концентрации аэрозольных частиц, определенной методом гравиметрического анализа, с данными, полученными с помощью измерителя массовой концентрации аэрозоля. Видно, что данные находятся в хорошем согласии.

Помимо лабораторных испытаний разработанных приборов была проверена их работоспособность в полевых условиях. Так, при помощи ДСА-М была измерена концентрация частиц атмосферного аэрозоля и получено их распределение по размерам в загрязненном городском воздухе, а также на отдалении от источников загрязнения (условно фоновая территория). Было обнаружено, что на автомагистралях при высокой интенсивности движения концентрации частиц размером 100–600 нм больше примерно на порядок значения, измеренного

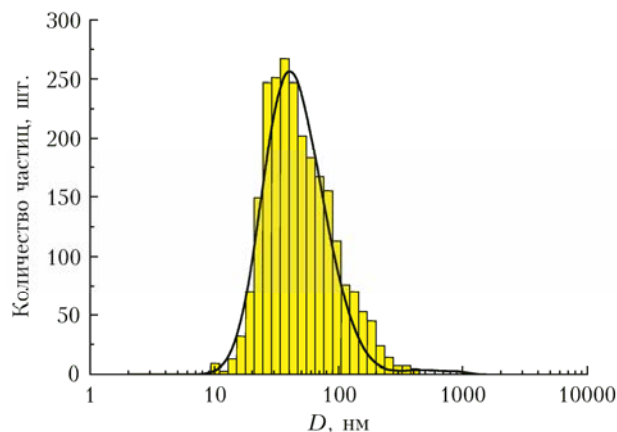


Рис. 4. Распределения по размерам частиц хлорида натрия, полученные с помощью ДСА-М (сплошная кривая) и ПЭМ (гистограмма)

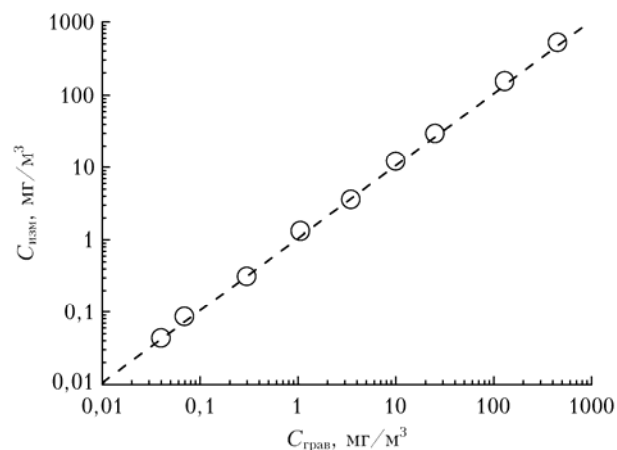


Рис. 5. Сопоставление массовой концентрации аэрозольных частиц, определенной методом гравиметрического анализа, с данными, полученными с помощью измерителя массовой концентрации

в том же месте при отсутствии потока машин. Было определено, что аэрозольные частицы в воздухе лесных массивов вдали от источников загрязнения имеют размеры  $\sim 70\text{--}300$  нм, а их концентрация меняется синхронно с изменением интенсивности солнечного света. Спектрометр ДСА-М был использован для регистрации аэрозольных частиц, генерируемых при отдаленных лесных пожарах и переносимых ветром на большие расстояния. Таким образом, приборы измерительного комплекса могут применяться не только в лабораторных, но и в полевых исследованиях.

## Заключение

Представлен разработанный и созданный в ИХКГ СО РАН измерительный аэрозольный комплекс, позволяющий измерять концентрации и размеры аэрозольных частиц в широких диапазонах: от 10 до  $3 \cdot 10^5$  см $^{-3}$  и от 3 нм до 10 мкм соответственно. Управление приборами комплекса, автоматизированная обработка сигналов и вывод результатов измерений осуществляются в режиме реального

времени с помощью специализированного программного обеспечения.

Лабораторные испытания измерительного комплекса показали хорошее согласие между результатами измерений приборами и эталонными методами определения параметров аэрозольных частиц.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 19-73-10143) (<https://rscf.ru/project/19-73-10143/>).

## Список литературы

1. Сафатов А.С., Агафонов А.П., Аршинов М.Ю., Бакланов А.М., Белан Б.Д., Бурак Г.А., Фофонов А.В., Генералов В.М., Козлов А.С., Лаптева Н.А., Малышкин С.Б., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Резникова И.К., Сергеев А.Н., Симоненков Д.В., Терновой В.А., Туманов Ю.В., Шмаргунов В.П. Комплексная оценка атмосферного воздуха в г. Геленджике // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 403–416; Safatov A.S., Agafonov A.P., Arshinov M.Yu., Baklanov A.M., Belan B.D., Buryak G.A., Fofonov A.V., Generalov V.M., Kozlov A.S., Lapteva N.A., Malyshev S.B., Marchenko Yu.V., Olkin S.E., Reznikova I.K., Sergeev A.N., Simonenkov D.V., Ternovoi V.A., Tumanov Yu.V., Shmargunov V.P. Complex assessment of atmospheric air quality in the city of Gelendzhik // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 5. P. 519–531. DOI: 10.1134/S1024856018050159.
2. Иноземцев А.А., Саженов А.Н., Сунатов А.М., Цатишвили В.В., Абрамчук Т.В., Петров А.К., Малышкин С.Б., Куйбида Л.В., Козлов А.С., Панченко М.В., Козлов В.С. Измерение фракционного и химического состава нелетучих частиц в продуктах эмиссии камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 503–507. DOI: 10.15372/AOO20160609.
3. Yong Zha, Jay Gao, Jianjun Jiang, Heng Lyu, Jiazhu Huang. Monitoring of urban air pollution from MODIS aerosol data: Effect of meteorological parameters // Tellus B. 2010. V. 62, N 2. P. 109–116. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00451.x.
4. Onischuk A., Dubtsov S., Baklanov A., Valiulin S., Koshlyakov P., Paleev D., Mitrochenko V., Zamashchikov V., Korzhavin A. Organic nanoaerosol in coal mines: Formation mechanism and explosibility // Aerosol Air Qual. Res. 2017. V. 17, N 7. P. 1735–1745. DOI: 10.4209/aaqr.2016.12.0533.
5. Valiulin S.V., Onischuk A.A., Baklanov A.M., An'kov S.V., Dubtsov S.N., Alekseev A.A., Shkil N.N., Nefedova E.V., Plokhotnichenko M.E., Tolstikova T.G., Dolgov A.M., Dultseva G.G. Aerosol inhalation delivery of ceftriaxone in mice: Generation procedure, pharmacokinetics, and therapeutic outcome // Antibiotics. 2022. V. 11, N 10. P. Art. 1310. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2021.121013.
6. Бажина А.А., Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н., Ан'ков С.В., Плохотниченко М.Е., Толстикова Т.Г., Онищук А.А. Метод генерации аэрозоля антибактериального лекарственного вещества цефазолина // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 459–462; Bazhina A.A., Valiulin S.V., Baklanov A.M., Dubtsov S.N., An'kov S.V., Plokhotnichenko M.E., Tolstikova T.G., Onischuk A.A. A method for generating an aerosol of the antibacterial medicine cefazolin // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 5. P. 555–558.
7. Valiulin S.V., Onischuk A.A., Pyryaeva A.P., An'kov S.V., Baklanov A.M., Shkil N.N., Nefedova E.V., Ershov K.S., Tolstikova T.G., Dultseva G.G. Aerosol inhalation delivery of Ag nanoparticles in mice: Pharmacokinetics and antibacterial action // Antibiotics (Basel). 2023. V. 12, N 10. DOI: 10.3390/antibiotics12101534.
8. Vons V., Yurteri C.U., Schmidt-Ott A. Generation and sizing of particles for aerosol-based nanotechnology // KONA Pow. Part. J. 2008. N 26. P. 13–35. DOI: 10.14356/kona.26.2008006.
9. Virgil A. Marple. History of impactors – the first 110 years // Aerosol Sci. Technol. 2004. V. 38, N 3. P. 247–292. DOI: 10.1080/02786820490424347.
10. Валиулин С.В., Дубцов С.Н. Диффузионный спектрометр аэрозоля: особенности и применение // Природа. 2016. № 11. С. 90–91.
11. Heim M., Mullins B.J., Umhauer H., Kasper G. Performance evaluation of three optical particle counters with an efficient “multimodal” calibration method // J. Aerosol Sci. 2008. V. 39. P. 1019–1031. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2008.07.006.
12. Huanling Hu, Xuebin Li, Yinchao Zhang, Tao Li. Determination of the refractive index and size distribution of aerosol from dual-scattering-angle optical particle counter measurements // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 16. P. 3864–3870. DOI: 10.1364/AO.45.003864.
13. Renard J.-B., Dulac F., Berthet G., Lurton T., Vignelles D., Jégou F., Tonnelier T., Jeannot M., Couté B., Akiki R., Verdier N., Mallet M., Gensdarmes F., Charpentier P., Mesmin S., Duverger V., Dupont J.-C., Elias T., Crenn V., Sciare J., Zieger P., Salter M., Roberts T., Giacomoni J., Gobbi M., Hamonou E., Olafson H., Dagsson-Waldhauserova P., Camy-Peyret C., Mazel C., Décamps T., Piringer M., Surcin J., Daugeron D. LOAC: A small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles – Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9. P. 1721–1742. DOI: 10.5194/amt-9-1721-2016.
14. Knutson E.O., Whitby K.T. Aerosol classification by electric mobility: Apparatus, theory, and applications // J. Aerosol Sci. 1975. V. 6. P. 443–451. DOI: 10.1016/0021-8502(75)90060-9.
15. Intra P., Tippayawong N. An overview of differential mobility analyzers for size classification of nano-meter-sized aerosol particles // Songklanakarin J. Sci. Technol. 2008. V. 30, N 2. P. 243–256.
16. Ankilov A., Baklanov A., Colhoun M., Enderle K.-H., Gras J., Julianov Yu., Kaller D., Lindner A., Lushnikov A., Mavliev R., McGovern F., O'Connor T.C., Podzimek J., Preining O., Reischl G.P., Rudolf R., Sem G.J., Szymanski W.W., Vrtala A.E., Wagner P.E., Winklmayr W., Zagaynov V. Particle size dependent response of aerosol counters // Atmos. Res. 2002. V. 62, N 3–4. P. 209–237. DOI: 10.1016/S0169-8095(02)00011-X.
17. Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Власенко А.Л., Козлов А.С., Малышкин С.Б. Определение концентрации аэрозолеобразующих веществ в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 644–648.
18. Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н., Митроченко В.Г., Моисеенко П.П., Онищук А.А. Диффузионный спектрометр аэрозоля для измерения распределения по размерам и концентрации нано- и субмикронных частиц // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 145–146. DOI: 10.1134/S0032816219010269.
19. Onischuk A.A., Valiulin S.V., Baklanov A.M., Moiseenko P.P., Mitrochenko V.G. Determination of the aerosol particle size distribution by means of the diffu-

- sion battery: Analytical inversion // *Aerosol Sci. Technol.* 2018. V. 52, N 8. P. 841–853. DOI: 10.1080/02786826.2018.1473839.
20. *Onischuk A.A., Baklanov A.M., Valiulin S.V., Moiseenko P.P., Mitrochenko V.G.* Aerosol diffusion battery: The retrieval of particle size distribution with the help of analytical formulas // *Aerosol Sci. Technol.* 2018. V. 52, N 2. P. 165–181. DOI: 10.1080/02786826.2017.1387642.
  21. *Onischuk A.A., Valiulin S.V., Baklanov A.M., Moiseenko P.P., Mitrochenko V.G., Dultseva G.G.* Aerosol diffusion battery: Analytical inversion from noisy penetration // *Measurement*. 2020. V. 164. P. 108049-1–10. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108049.
  22. *Cheng Y.S., Yeh H.C.* Theory of a screen-type diffusion battery // *J. Aerosol Sci.* 1980. V. 11. P. 313–320. DOI: 10.1016/0021-8502(80)90105-6.
  23. *Cheng Y.S., Yeh H.C., Brinsko K.J.* Use of wire screens as a fan model filter // *Aerosol Sci. Technol.* 1985. V. 4. P. 165–174. DOI: 10.1080/02786828508959046.
  24. *Pollak L.W., Metnieks A.L.* On the determination of the diffusion coefficient of heterogeneous aerosols by the dynamic method // *Geofisica Pura e Applicata*. 1957. V. 37. P. 183–190. DOI: 10.1007/BF01988861.
  25. *Fuchs N.A., Stechkina I.B., Starosselskii V.I.* On the determination of particle size distribution in polydisperse aerosols by the diffusion method // *Brit. J. Appl. Phys.* 1962. V. 13. P. 280–281. DOI: 10.1088/0508-3443/13/6/307.
  26. *Sansone E.B., Weyel D.A.* A note on the penetration of a circular tube by an aerosol with a log-normal size distribution // *J. Aerosol Sci.* 1971. V. 2. P. 413–415. DOI: 10.1016/0021-8502(71)90044-9.
  27. *Kravchenko I.I., Lekhtmakher S.O., Ruzer L.S.* Calculation of particle diffusional deposition for aerosol with the lognormal size distribution in cylindrical channels // *Colloid J. USSR*. 1971. V. 33. P. 923–924.
  28. *Lee K.W., Connick P.A., Gieseke J.A.* Extension of the screen type diffusion battery theory // *J. Aerosol Sci.* 1981. V. 12. P. 385–386. DOI: 10.1016/0021-8502(81)90027-6.
  29. *Mercer T.T., Greene T.D.* Interpretation of diffusion battery data // *J. Aerosol Sci.* 1974. V. 5. P. 251–255. DOI: 10.1016/0021-8502(74)90060-3.
  30. *Sinclair D., Countes R.J., Liu B.Y.H., Pui D.Y.H.* Automatic analysis of submicron aerosols // *Aerosol Measurement*. Florida: University Presses of Florida Gainesville, 1979. P. 544–563.
  31. *Nolan P.J., Scott J.A.* Observations on the heterogeneity of condensation nuclei // *Proc. Roy. Irish Acad. Sect. A: Math. Phys. Sci.* 1963/1964. V. 63. P. 35–47.
  32. *Lushnikov A.A., Zagaynov V.A.* On diffusion dynamical method of the particle size analysis // *J. Aerosol Sci.* 1990. V. 21. P. S163–S165. DOI: 10.1016/0021-8502(90)90213-H.
  33. *Способ измерения спектра размеров ядер конденсации аэрозольных частиц и устройство для его реализации*: Пат. 2340885. Россия, G 01 N 15/2. Загайнов В.А., Бирюков Ю.Г., Лushnikov A.A.; ФГУП Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова. № 2006137791/28; Заявл. 26.10.06; Оpubл. 10.12.08. Бюл. № 34.
  34. *Twomey S.* Comparison of constrained linear inversion and an iterative nonlinear algorithm applied to the indirect estimation of particle size distributions // *J. Comput. Phys.* 1975. V. 18. P. 188–200. DOI: 10.1016/0021-9991(75)90028-5.
  35. *Reineking A., Porstendorfer J.* High-volume screen diffusion batteries and  $\alpha$ -spectroscopy for measurement of the radon daughter activity size distributions in the environment // *J. Aerosol Sci.* 1986. V. 17. P. 873–879. DOI: 10.1016/0021-8502(86)90040-6.
  36. *Ferri F., Bassini A., Paganini E.* Modified version of the Chahine algorithm to invert spectral extinction data for particle sizing // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. P. 5829–5839. DOI: 10.1364/AO.34.005829.
  37. *Bashurova V.S., Dreiling V., Hodger T.V., Jaenicke R., Koutsenogii K.P., Koutsenogii P.K., Kraemer M., Markarov V.I., Obolkin V.A., Potjomkin V.L., Pusep A.Y.* Measurements of atmospheric condensation nuclei size distributions in Siberia // *J. Aerosol Sci.* 1992. V. 23. P. 191–199. DOI: 10.1016/0021-8502(92)90054-Y.
  38. *Wang Y., Yangm Ch.* Regularizing active set method for retrieval of the atmospheric aerosol particle size distribution function // *J. Opt. Soc. Am. A*. 2008. V. 25. P. 348–356. DOI: 10.1364/josaa.25.000348.
  39. *Voutilainen A., Kolehmainen V., Stratmann F., Kaipio J.P.* Computational methods for the estimation of the aerosol size distributions // *Mathematical Modeling. Problems, Methods, Applications*. New York: Springer Science + Business Media, 2001. P. 219–230. DOI: 10.1007/978-1-4757-3397-6\_22.
  40. *Fierz M., Weimer S., Burtscher H.* Design and performance of an optimized electrical diffusion battery // *J. Aerosol Sci.* 2008. V. 40. P. 152–163. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2008.09.007.
  41. *Yee E.* On the interpretation of diffusion battery data // *J. Aerosol Sci.* 1989. V. 20. P. 797–811. DOI: 10.1016/0021-8502(89)90091-8.
  42. *Eremenko S., Ankilov A.* Conversion of the diffusion battery data to particle size distribution: Multiple Solutions Averaging algorithm (MSA) // *J. Aerosol Sci.* 1995. V. 26. P. 749–750. DOI: 10.1016/0021-8502(95)97282-J.
  43. *Gulak Y., Jayjock E., Muzzio F., Bauer A., McGlynn P.* Inversion of Andersen cascade impactor data using the maximum entropy method // *Aerosol Sci. Technol.* 2010. V. 44. P. 29–37. DOI: 10.1080/02786820903338280.

*S.V. Valiulin, A.A. Onischuk, A.M. Baklanov, V.V. Karasev, G.G. Dultseva. Aerosol measuring complex.*

The measurement complex including diffusion aerosol spectrometer, optical aerosol spectrometer, and aerosol mass concentration meter has been developed and manufactured at the Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS. Laboratory tests of the instruments included in the measurement complex were carried out using standard test systems. Comparison of measured particle size values with the data obtained by independent methods (transmission electron microscopy and measurement of particle sedimentation velocity) revealed their good agreement. It is demonstrated that the measuring complex is suitable for determining concentrations and sizes of aerosol particles within wide ranges with the real-time presentation of results both in laboratory and *in situ* experiments.