

УДК 551.46.08+551.463.8
EDN: VSWKXY

Б.Р. Джаббарлы^{1, 2}

¹ Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика

² Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджанская Республика

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ МНОГОВОЛНОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ЧАСТИЦ В ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДНОЙ СРЕДЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является нефелометр, способный определить загрязненность морской воды мелкими частицами. Цель – анализ возможности модификации алгоритма функционирования многоволнового нефелометра для формирования дополнительного признака результата измерений, удостоверяющего достоверность итогового результата измерений.

Материалы и методы. Разработан метод экстремальной многоволновой нефелометрии. Несмотря на некоторое усложнение конструкции прибора предложенный метод дает возможность оценить достоверность полученного результата измерения путем организации адаптивного режима работы, когда устанавливается определенная функциональная зависимость между длиной волны и расстоянием от детектора до источника.

Основные результаты. В указанном адаптивном режиме измерений величина целевого функционала достигает минимума, что используется в качестве признака достоверности результата измерения.

Закключение. Использование сформированного дополнительного признака, удостоверяющего достоверность итогового результата измерений, позволяет повысить эффективность проводимых исследований загрязненности воды.

Ключевые слова: нефелометрия, адаптивность, загрязненность воды, многоволновый метод, достоверность.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 551.46.08+551.463.8
EDN: VSWKXY

B. R. Jabbarli^{1, 2}

¹ National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic

² Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan Republic

EXTREME MULTI-WAVE METHOD FOR DETERMINING THE VOLUME OF PARTICLES IN SOILED LIQUID

Object and purpose of research. The object of research is nephelometer capable to determine impurity of sea water containing small particles. The purpose is to analyze the feasibility of modifying the functional algorithm of nephelometer to form an additional attribute of measurement result confirming the final measurement result.

Materials and methods. A method of extreme multi-wave nephelometry has been elaborated. In spite of adding some complexity to the instrument design the method enables us to assess the reliability of measurements by an adaptive mode when a certain functional relation is established between the wavelength and the source distance.

Main results. Under the adaptive mode of measurements the objective functional reaches its minimum, which is employed as an attribute of measurement reliability.

Conclusion. The additional attribute confirming the reliability of final measurement result makes it possible to improve the efficiency of soiled water studies.

Keywords: nephelometry, adaptivity, soiled water, multi-wave method, reliability.
The author declares no conflicts of interest.

Для цитирования: Джаббарлы Б.Р. Экстремальный многоволновый метод определения объема частиц в загрязненной водной среде. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 2(408): 151–156.

For citations: Jabbarli B.R. Extreme multi-wave method for determining the volume of particles in soiled liquid. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 2(408): 151–156 (in Russian).

Введение

Introduction

Хорошо известно, что коллоидная дисперсность аэрозолей в загрязненных некоторыми частицами водных средах часто не может быть определена обычным микроскопом при малых размерах этих частиц [1]. Указанная задача обычно решается с применением таких приборов, как фотоэлектрокolorиметры, нефелометры, поляриметры. Ультрамикроскопами в этих методах размеры частиц определяются либо путем измерения интенсивности светового потока с учетом поляризации на различных направлениях рассеянного света, либо каждая частица обнаруживается в виде дифракционных колец.

В общем случае рассеянный в суспензиях свет имеет интенсивность, распределенную в зависимости от размеров частиц, длины волны используемого света, показателей преломления частиц.

Нефелометрический метод анализа размеров мелких частиц в загрязненной водной среде базируется на измерении интенсивности потока света, рассеянного этими частицами [2]. При этом интенсивность входящего в исследуемую водную среду светового потока I_0 может быть представлена в виде следующей суммы [3].

$$I_0 = I_p + I_{np} + I_{отр}, \quad (1)$$

где I_p – интенсивность рассеянного света; I_{np} – интенсивность света, прошедшего сквозь толщ

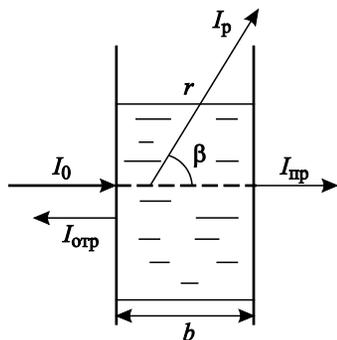


Рис. 1. Геометрическая интерпретация расположения и позиции компонентов I_p , I_{np} и $I_{отр}$ при поступлении на вход кюветы с жидкостью светового потока с интенсивностью I_0

Fig. 1. Geometric interpretation of arrangement and location of I_p , I_{np} and $I_{отр}$ components when light flux of intensity I_0 arrives at the inlet of a liquid-filled vial

исследуемой жидкости, $I_{отр}$ – интенсивность отраженного света.

Расположение этих компонентов I_0 показано на рис. 1.

Для измерения геометрических размеров мелких частиц в качестве базового используется уравнение Релея [4]:

$$I_p = I_0 \left[\frac{n_1^2 - n^2}{n^2} \cdot \frac{N \cdot V^2}{\lambda^4 \cdot r^2} (1 + \cos^2 \beta) \right], \quad (2)$$

где n_1 – коэффициент преломления частиц; n – коэффициент преломления среды; N – концентрация частиц; V – объем частиц; λ – длина волны падающего света; r – расстояние от наблюдателя; β – угол рассеяния.

В классической нефелометрии уравнение (2) приводится к виду

$$I_p = \frac{I_0 k N \cdot V^2}{\lambda^4}, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{(n_1^2 - n^2)(1 + \cos^2 \beta)}{n^2 r^2}; \quad k = \text{const.} \quad (4)$$

Вместе с тем уравнение (3) при использовании для определения V дает сильно зашумленный результат, и возникает необходимость проведения многоволновых измерений для повышения отношения сигнал/шум. В этом случае суммарный сигнал измерителя может быть вычислен как

$$I_{p\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{I_0^{(\lambda_i)} k N \cdot V^2}{\lambda_i^4}. \quad (5)$$

Следовательно, из (5) получим

$$V = \frac{I_{p\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{I_0^{(\lambda_i)} k N}{\lambda_i^4}}. \quad (6)$$

Очевидно, что измерения V по выражениям (5), (6) могут вызвать такие неудобства, как обеспечение измерительного эксперимента источниками света $I_0(\lambda_i)$, светофильтрами длины волны λ_i . Можно предположить, что вышеуказанные технологические вопросы решаемы на нынешнем уровне развития техники и технологий.

Однако проблемы, связанные с осуществлением многоволновых измерений, не ограничиваются данными вопросами. При реализации многоволнового метода измерений также могут возникнуть проблемы, влияющие на достоверность результатов измерений из-за влияния внешних излучений, из-за взаимовлияния измерительных каналов из-за частичного совпадения оптических полосовых фильтров.

Выходом из положения в этом случае является усовершенствование общего алгоритма работы нефелометра с целью выработки дополнительного признака достоверности конечного результата измерений. Далее в настоящей статье анализируется возможность модификации алгоритма функционирования многоволнового нефелометра с целью формирования признака экстремума результата измерений, подтверждающего достоверность итогового результата измерений.

Материалы и методы

Materials and methods

Предлагаемый метод нефелометрических многоволновых измерений предполагает отказ от представления уравнения Релея в виде (3) и основывается на следующем представлении выражения (2)

$$I_p = \frac{I_0 k_1 N \cdot V^2}{\lambda^4 r^2}, \quad (7)$$

где

$$k_1 = \frac{(n_1^2 - n^2)(1 + \cos^2 \beta)}{n^2}. \quad (8)$$

Второй особенностью предлагаемого метода является введение взаимосвязи между показателями r и λ при многоволновой реализации прибора, т.е. имеем функцию связи

$$r_i = f(\lambda_i); \quad i = \overline{1, m}, \quad (9)$$

где m – количество измерительных каналов.

Таким образом, при многоволновой реализации нефелометра суммарный выходной сигнал может быть вычислен по формуле

$$I_{p\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{I_0^{(\lambda_i)} k_1 N \cdot V^2}{\lambda_i^4 \cdot f(\lambda_i)}. \quad (10)$$

Очевидно, что функция (9) и выражение (10) подразумевают установку измерительных частей каналов длины волны λ_i на различных дистанциях от источника рассеяния, что естественно приводит к усложнению конструкции прибора. Вместе с тем, если приоритет отдается достижению высокой достоверности результатов измерений, то усложнение конструкции прибора можно считать оправданным.

Рассмотрим следующий вопрос: каковой должна быть функция $f(\lambda_i)$, чтобы обеспечить формирование дополнительного признака достоверности полученных результатов измерений? Предлагается следующее решение:

1. Класс непрерывных, дважды дифференцируемых функций сужается до подкласса или группы функций, для которых выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n f(\lambda_i) = C; \quad C = \text{const}. \quad (11)$$

2. Осуществляется переход на непрерывные эквиваленты моделей (10) и (11).
3. Используя непрерывные эквиваленты (10), (11), составляется вариационная оптимизационная задача на предмет вычисления оптимальной функции $f(\lambda)$, при которой целевой функционал оптимизационной задачи достигает экстремума.
4. Факт обнаружения такого экстремума целевого функционала применительно к элементам группы функций, удовлетворяющих условию (11), представляется в качестве признака достоверности результата проводимых многоволновых нефелометрических измерений.
5. Согласно вышеизложенному алгоритму предлагаемый экстремальный нефелометр соответствует классу изоморфно-голономных систем, описанному в работах [5, 6].

Исследование математической модели многоволнового нефелометра

Study of a multi-wave nephelometer mathematical model

Аналоговый эквивалент выражения (10) имеет вид:

$$I_{p\Sigma a} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_0(\lambda) k_1 N \cdot V^2}{\lambda_i^4 f(\lambda)^2} d\lambda. \quad (12)$$

Соответствующий эквивалент выражения (11) имеет вид:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda = C. \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) сформируем задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал F которой имеет вид:

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_0(\lambda) k_1 N \cdot V^2}{\lambda_i^4 f(\lambda)^2} d\lambda + \gamma \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda - C \right], \quad (14)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (14) согласно [7] должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{I_0(\lambda) k_1 N \cdot V^2}{\lambda_i^4 f(\lambda)^2} + \gamma f(\lambda) \right\}}{df(\lambda)} = 0. \quad (15)$$

Из (15) получаем

$$\frac{-k_2}{\lambda^4 f^3(\lambda)} + \gamma = 0,$$

где

$$k_2 = I_0(\lambda) k_1 N \cdot V^2$$

Из (16) находим

$$f(\lambda) = \sqrt[3]{\frac{k_2}{\gamma \lambda^4}}.$$

С учетом (13) и (18) получим

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt[3]{\frac{k_2}{\gamma \lambda^4}} d\lambda = C.$$

Из (19) имеем

$$(\gamma)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{C} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt[3]{\frac{k_2}{\gamma \lambda^4}} d\lambda$$

Или

$$\gamma = \frac{1}{C^3} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sqrt[3]{\frac{k_2}{\gamma \lambda^4}} d\lambda \right]^3. \quad (21)$$

(21) представим как

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{k_2}{C^3} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-\frac{4}{3}} d\lambda \right]^3 = \frac{k_2}{C^3} \left[\frac{1}{\frac{1}{3}} \lambda^{-\frac{1}{3}} \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2} \right]^3 = \\ &= -\frac{1}{27} \frac{k_2}{C^9} \left(\lambda_1^{-\frac{1}{3}} - \lambda_2^{-\frac{1}{3}} \right)^3 = \\ &= \frac{1}{27} \frac{k_2}{C^3} \left[\left(\frac{1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{1}{\lambda_1} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^3. \end{aligned} \quad (22)$$

С учетом (18) и (22) получим

$$f(\lambda) = \sqrt[3]{\frac{27 C^3}{\lambda^4 \left(\frac{1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{1}{\lambda_1} \right)^{\frac{1}{3}}}} = \frac{3C}{\lambda^{\frac{4}{3}}} \sqrt[3]{\frac{1}{\lambda_1^{\frac{1}{3}} - \lambda_2^{\frac{1}{3}}}}. \quad (23)$$

или

$$f(r) = \frac{C_1}{\lambda^{\frac{4}{3}}}; \quad C_1 = 3C \sqrt[3]{\frac{1}{\lambda_1^{\frac{1}{3}} - \lambda_2^{\frac{1}{3}}}}. \quad (24)$$

При решении (24) целевой функционал F достигает минимума, т.к. повторная производная (16) по $f(r)$ всегда является положительной величиной.

Таким образом, с учетом (24) можно заключить, что построение многоволнового нефелометра с соблюдением условия

$$r \cdot \lambda^{\frac{4}{3}} = C_1; \quad C_1 = \text{const} \quad (19)$$

позволяет выработать дополнительный признак экстремума в виде минимума F , подтверждает достоверность результата проведенных измерений.

Обсуждение

Discussion

Таким образом, предложен принцип многоволновой экстремальной нефелометрии, в котором объем загрязняющих воду частиц определяется в экстремальном режиме функционирования прибора. Использование метода многоволнового измерения, естественно, должно привести к услож-

нению конструкции нефелометра. Вместе с тем в предлагаемой конструкции прибора появляется дополнительный признак, используемый для подтверждения достоверности полученного результата. Можно предложить следующую процедуру проверки:

1. Проверяется соответствие дискретной функции $r_i = f(\lambda_i)$ аналоговой функции (24).
2. Фиксируется полученное значение целевого функционала.
3. Осуществляется физическое моделирование нарушения условия соответствия по пункту 1 путем изменения длин волн пропускания одного или нескольких фильтров в различных комбинациях, и каждый раз фиксируется значение целевого функционала.
4. Если результат измерения при полном соответствии фильтров функции (24) оказывается ниже, чем значения целевого функционала, полученные впоследствии, то выносится заключение о достоверности результата исходного измерения.

Заключение

Conclusion

Предложен принцип экстремальной многоволновой нефелометрии. Реализация данного принципа, несмотря на некоторое усложнение конструкции прибора, позволяет осуществить проверку достоверности полученного результата измерения путем проведения измерения в адаптивном режиме, когда длины волн и расстояние от детектора до источника состоят в определенной функциональной зависимости. Именно в таком расчетном адаптивном режиме измерений величина целевого функционала достигает минимума, что используется в качестве признака достоверности результата измерения.

Список использованной литературы

1. Куликов К.Г., Кошлан Т.В. Определение размеров коллоидных частиц при помощи метода динамического рассеяния света // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, вып. 12. С. 26–32.
2. Лысенко С.А., Кугейко М.М. Нефелометрический метод измерения массовых концентраций городских аэрозолей и их респираторных фракций // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 435–442.
3. Васильев В.П. Аналитическая химия : В 2 ч. Ч. 2 : Физико-химические методы анализа. Москва : Высшая школа, 1989. 384 с.

4. Рязузов А.И. Нефелометрия и турбидиметрия в количественном анализе // Вестник Тамбовского гос. ун-та. 1996. Т. 1, № 2. С. 138–141.
5. Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Тарвердиева У.Х. Вопросы оптимизации изоморфно-голономных информационно-измерительных систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63, № 6. С. 51–56. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-6-51-56.
6. Асадов Х.Г., Абдуллаева С.Н., Тарвердиева У.Х. Метод линеаризационной оптимизации голономных информационно-измерительных и мехатронных систем // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 35. С. 169–183. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.11.
7. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. 3-е изд. Москва : Мир, 1983. 432 с.

References

1. Kulikov K.G., Koshlan T.V. Determination of colloidal particle sizes using the method of dynamic light scatter // Journal of Technical Physics. 2015. V. 85, vyp. 12. p. 26–32 (in Russian).
2. Lysenko S.A., Kugeiko M.M. A method for nephelometer measurement of mass concentration of urban particulate pollutants and their respirable fractions // Optics of atmosphere and ocean. 2014. Vol. 27, No. 5. P. 435–442 (in Russian).
3. Vasilyev V.P. Analytical chemistry : in 2 parts, Part 2 : Physico-chemical methods of analysis. Moscow : Vyshaya shkola, 1989. 384 p. (in Russian).
4. Rязузов А.И. Nephelometry and turbidimetry in quantification analysis // Herald of Tambov State University. 1996. Vol. 1, No. 2. P. 138–141 (in Russian).
5. Asadov Kh.G., Abdullaeva S.N., Tarverdieva U.Kh. Issues of optimizing the isomorphic & holonomy data measuring systems // News of higher education establishments. Electro-mechanics. 2020. Vol. 63, No. 6. P. 51–56. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-6-51-56 (in Russian).
6. Asadov Kh.G., Abdullaeva S.N., Tarverdieva U.Kh. A method of linearized optimization of holonomy data measuring and mechatronic systems // Herald of Perm National Research Polytechnic Institute. Electric engineering, information technologies, control systems. 2020. No. 35. p. 169–183. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.11 (in Russian).
7. Elsgolc L.E. Differential equations and variational calculation. 3rd edition. Moscow : Mir, 1983. 432 p. (in Russian).

Сведения об авторе

Джаббарлы Бибиханым Раваят гызы, старший научный сотрудник Национального Аэрокосмического Агентства Азербайджана. Адрес: Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С. Ахундова, 1. E-mail: jabbarly_br@nasa.az.

About the author

Bibihanym R. Jabbarli, Senior Research Scientist of National Aerospace Agency of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan. Address: 1, S. Akhundov st., Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: jabbarly_br@nasa.az.

Поступила / Received: 26.10.23
Принята в печать / Accepted: 24.05.24
© Джаббарлы Б.Р., 2024