

УДК 681.7.031

## Современное состояние метрологического обеспечения контроля параметров материалов для оптических систем в Российской Федерации

Воробьев Дмитрий Даниилович dd.vorobev@samobl.ru

Комшин Александр Сергеевич komshin\_as@mail.ru

SPIN-код: 4523-1465

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье представлен комплексный анализ современного состояния метрологического обеспечения контроля параметров материалов для оптических систем в Российской Федерации. Проведена систематизация основных стандартизованных параметров качества оптических материалов, включающих оптические характеристики, параметры оптической однородности и структурного качества.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, оптические материалы, стандарты, методы контроля

## Metrology and interchangeability

Vorobyev Dmitriy Daniilovich dd.vorobev@samobl.ru

Komshin Aleksander Sergeevich komshin\_as@mail.ru

SPIN-code: 4523-1465

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents a comprehensive analysis of the current state of metrological support for monitoring the parameters of materials for optical systems in the Russian Federation. The main standardized parameters of optical materials quality, including optical characteristics, optical homogeneity parameters and structural quality, are systematized.

**Keywords:** metrological support, optical materials, standards, control methods

**Введение.** Современное развитие оптических систем предъявляет всё более высокие требования к точности и воспроизводимости измерений ключевых параметров материалов, применяемых для изготовления оптических элементов. Данная работа посвящена комплексному обзору и оценке современных методов и средств контроля параметров оптических материалов, применяемых в оптическом приборостроении, фотонике и лазерных технологиях.

**Материалы и методы.** Оптические материалы подразделяются на: оптические стекла; оптические ситаллы; оптические кристаллы; оптическую керамику [1].

Наиболее типовыми и распространенными материалами в оптике являются оптические стекла, поскольку они обладают положительными оптическими,

технологическими и эксплуатационными свойствами и характеристиками. Более того оптические стекла являются наиболее стандартизированными объектами.

Оптические стекла подразделяются на бесцветные [2], цветные [3], кварцевые [4], органические [5, 6 и др.], а также стекла с особыми свойствами (далее — ООС). Последние, в свою очередь, подразделяют на светорассеивающие типа МС — молочные; фотохромные ФХС; радиационно-стойкие; оптические люминисцирующие (лазерные) ГЛС и другие.

В российских документах по стандартизации [7] приведены параметры, характеризующие качество и основные свойства оптических материалов. В таблице указаны основные параметры оптических стекол, документы по стандартизации, регламентирующие контроль параметров.

### Основные параметры оптических стекол

| № п/п | Наименование характеристики                                              | Методы контроля и испытаний                 | Применяемые средства измерений                                                              | Допустимая погрешность измерений                                                                                                       |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Показатель преломления ( $n$ )                                           | В соответствии с [8]                        | Гониометры, гониометры-спектрометры, рефрактометр Пульфриха, рефрактометр Аббе,             | не более $1 \cdot 10^{-5}$<br>(для 1–3 категории)<br>не более $1 \cdot 10^{-4}$<br>(для 4–5 категории)                                 |
| 2     | Коэффициент дисперсии $V_\lambda$ или средняя дисперсия $n_F' - n_C'$    | В соответствии с [8]                        | Гониометр, рефрактометр                                                                     | не более $1 \cdot 10^{-5}$<br>(для 1–3 категории)<br>не более $1 \cdot 10^{-4}$<br>(для 4–5 категории)                                 |
| 3     | Спектральный показатель ослабления (поглощения) $\mu_\lambda(a_\lambda)$ | В соответствии с [9], в соответствии с [10] | Вакуумные спектрофотометры, спектрофотометры для УВИ области, инфракрасные спектрофотометры | не более $1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$<br>(для 1–3 категории)<br>не более $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$<br>(для 4–5 категории) |
| 4     | Показатель ослабления излучения источника А                              | В соответствии с [9]                        | Фотометр ФМ 94М                                                                             | не более $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$<br>(для 4–5 категории)                                                                      |
| 5     | Граница пропускания $\lambda_{го}$                                       | В соответствии с [9] и [10]                 | Спектрофотометр                                                                             | Требования не заданы                                                                                                                   |
| 6     | Показатель, характеризующий особое оптическое свойство                   | —                                           | —                                                                                           | Требования не заданы                                                                                                                   |

Продолжение таблицы

| № п/п | Наименование характеристики                                                       | Методы контроля и испытаний | Применяемые средства измерений                                                                                                                                                                                       | Допустимая погрешность измерений |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 6.1   | Коэффициент диффузного пропускания света для источника А, %                       | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка с фотометрическим шаром                                                                                                                                                                | Требования не заданы             |
| 6.2   | Коэффициент диффузного пропускания света для $\lambda = 440$ нм, %                | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка с фотометрическим шаром                                                                                                                                                                | Требования не заданы             |
| 6.3   | Спектральный коэффициент диффузного отражения света, %                            | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка с фотометрическим шаром, набор цветных фильтров, образец стандартный с аттестованным коэффициентом диффузного отражения не менее 0,91 – 0,99 в спектральном диапазоне от 380 до 780 нм | Требования не заданы             |
| 6.4   | Натуральный показатель рассеяния света для $\lambda = 440$ нм, $\text{см}^{-1}$   | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка, соответствующая требованиям ГОСТ 26302                                                                                                                                                | Требования не заданы             |
| 6.5   | Показатель направленного рассеяния света для $\lambda = 550$ нм, $\text{см}^{-1}$ | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка, соответствующая требованиям ГОСТ 26302                                                                                                                                                | Требования не заданы             |
| 6.6   | Отступление от диффузности                                                        | В соответствии с [11]       | Фотометрическая установка                                                                                                                                                                                            | Требования не заданы             |
| 6.7   | Отступление от нейтральности                                                      | В соответствии с [11]       | Спектрофотометр или установка с фотометрическим шаром                                                                                                                                                                | Требования не заданы             |
| 6.8   | Равномерность глушения, %                                                         | В соответствии с [11]       | Не требуются                                                                                                                                                                                                         | Требования не заданы             |
| 7     | Радиационно-оптическая устойчивость $\Delta D$                                    | В соответствии с [2]        | Вакуумные спектрофотометры, спектрофотометры для УВИ области, инфракрасные спектрофотометры                                                                                                                          | не более $1 \cdot 10^{-3}$       |

Окончание таблицы

| № п/п | Наименование характеристики                                 | Методы контроля и испытаний          | Применяемые средства измерений                                 | Допустимая погрешность измерений                                            |
|-------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 8     | Оптическая однородность                                     | В соответствии с [2] (п. 6.8) и [12] | Коллиматорная установка                                        | не более $1 \cdot 10^{-3}$                                                  |
| 9     | Двулучепреломление                                          | В соответствии с ГОСТ [13]           | Поляриметры                                                    | Требования не заданы. Погрешность рассчитывается в соответствии с ГОСТ 3519 |
| 10    | Бессвильность стекла или свилеподобные дефекты в кристаллах | В соответствии с [14]                | Проекционная установка (не является средством измерений)       | Требования не заданы                                                        |
| 11    | Пузырность                                                  | В соответствии с [15] и [16]         | Микроскоп                                                      | Должна быть равна погрешности объект-микрометра или других применяемых СИ   |
| 12    | Включения                                                   | —                                    | —                                                              | Требования не заданы                                                        |
| 13    | Оптическая чистота                                          | В соответствии с [17–20]             | —                                                              | —                                                                           |
| 13.1  | Царапины                                                    |                                      | микроскоп с окулярным микрометром; наборы эталонных артефактов | не более 0,001 мм<br>не более 0,004 мм<br>не более 0,010 мм                 |
| 13.2  | Точки                                                       |                                      | микроскоп с окулярным микрометром; наборы эталонных артефактов | не более 0,001 мм<br>не более 0,004 мм<br>не более 0,010 мм                 |
| 13.3  | Скопления дефектов                                          | В соответствии с [17]                | Подтверждается расчетными соотношениями                        |                                                                             |

Следует отметить, что часть из приведенных параметров свойственна только отдельным видам стекла, например параметры с п. 6.1 по 6.8 таблицы присущи исключительно молочным стеклам.

**Результаты.** В результате систематического анализа метрологического обеспечения контроля качества оптических материалов был проведен комплексный обзор стандартизированных параметров, методов средств их измерений.

Анализ нормативно-технической документации позволил выделить 13 основных стандартизированных параметров качества оптических материалов:

- оптические параметры (показатель преломления, коэффициент дисперсии, спектральный показатель ослабления, граница пропускания, радиационно-оптическая устойчивость);

- параметры оптической однородности (оптическая однородность, двулучепреломление);

- параметры структурного качества (бессвильность, пузырность, оптическая чистота поверхности).

Установлено, что несмотря на детальную регламентацию многих методов в российских документах по стандартизации, часть из них требует переработки в связи с устареванием рекомендуемого оборудования. Например, часть указанных в стандартах средств измерений отсутствует в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (ФИФ ОЕИ) (ФМ-94М, ФМ-59, спектрофотомер СФ-20 и др.), что объясняется устареванием подавляющего большинства стандартов. Кроме того, в ряде стандартов используются внесистемные единицы величин (например, рентген вместо грея), что создает предпосылку к невыполнению требований [21]. Также выявлена существенная несовместимость классификаций дефектов, характеризующих оптическую чистоту, в российских и международных стандартах, что может затруднять международную кооперацию.

**Обсуждение полученных результатов.** Традиционные гониометрические и рефрактометрические методы сохраняют свою актуальность для контроля основных оптических параметров. Однако развитие технологий требует внедрения новых подходов. Также следует учесть необходимость разработки новых методик, адаптированных для органических полимерных материалов, которые набирают большую популярность в фотонных приложениях [22, 23]. Кроме того, субъективность визуальных методов контроля чистоты поверхности остается серьезной проблемой. Различия в оценках между операторами могут достигать одного класса чистоты, что недопустимо для прецизионных применений. Переход к автоматизированным системам на основе машинного зрения, предусмотренный в [24], представляется необходимым направлением развития.

Несовместимость классификаций дефектов, характеризующих в том числе и оптическую чистоту, в российских и международных стандартах, подчеркивает необходимость гармонизации требований между российскими и международными стандартами.

**Заключение.** Проведенный анализ метрологического обеспечения контроля качества оптических материалов выявил области для совершенствования существующих подходов. Реализация предложенных рекомендаций позволит ускорить внедрение инновационных материалов в промышленность, включая аэрокосмическую, медицинскую и телекоммуникационную отрасли.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSN-2025-0009.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] *Характеристики материалов оптических деталей.* (Университет ИТМО). URL: [https://de.ifmo.ru/bk\\_netra/page.php?dir=3&tutindex=46&index=3&layer=1&ysclid=mf8un0zrbq784017447](https://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=3&tutindex=46&index=3&layer=1&ysclid=mf8un0zrbq784017447) (дата обращения 20.07.2025)
- [2] ГОСТ 3514–94. *Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.* Минск, ИПК Издательство стандартов, 1996.
- [3] ГОСТ 9411–91. *Стекло оптическое цветное. Технические условия.* Москва, Издательство стандартов, 1992.
- [4] ГОСТ 15130–86. *Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.* Москва, ИПК Издательство стандартов, 1999.
- [5] ГОСТ 10667–90. *Стекло оптическое листовое.* Москва, Издательство стандартов, 1990.
- [6] ГОСТ 17622–72. *Стекло оптическое техническое. Технические условия.* Москва, Издательство стандартов, 1989.
- [7] ГОСТ 23136–93. *Материалы оптические. Параметр.* Минск, ИПК Издательство стандартов, 1995.
- [8] ГОСТ 28869–90. *Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления.* Москва, ИПК Издательство стандартов, 2005.
- [9] ГОСТ 3520–92. *Материалы оптические. Методы определения показателя преломления.* Москва, Издательство стандартов, 1992.
- [10] ГОСТ 9411–91. *Стекло оптическое цветное. Технические условия.* Москва, Издательство стандартов, 1992.
- [11] ГОСТ Р 71551–2024. *Оптика и фотоника. Стекло оптическое светорассеивающее типа МС.* Москва, ФГБУ «Институт стандартизации», 2024.
- [12] ГОСТ 3518–80. *Стекло оптическое бесцветное. Метод определения оптической однородности на коллиматорной установке.* Москва, Издательство стандартов, 1980.
- [13] ГОСТ 3519–91. *Материалы оптические. Метод определения двулучепреломления.* Москва, Издательство стандартов, 1992.
- [14] ГОСТ 3521–81. *Стекло оптическое бесцветное. Метод определения бессвильности.* Москва, ИПК Издательство стандартов, 1998.
- [15] ГОСТ 3522–82. *Стекло оптическое бесцветное. Метод определения пузырности.* Москва, ИПК Издательство стандартов, 1998.
- [16] ГОСТ Р 71349–2024. *Оптика и фотоника. Кристаллы оптические. Метод определения пузырности с применением микроскопа.* Москва, ФГБУ «Институт стандартизации», 2024.
- [17] ГОСТ 11141–84. *Детали оптические. Классы чистоты поверхности. Методы контроля.* Москва, Издательство стандартов, 1984.
- [18] ISO 10110–7:2017. *Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems — Part 7: Surface imperfections.* Published in Switzerland, 2017.

- 
- [19] MIL-PRF-13830B *performance specification optical components for fire control instruments; general specification governing the manufacture, assembly, and inspection*. USA, 2000. URL: <https://www.hypoptics.com/uploads/file/mil-prf-13830b.pdf> (accessed 15.05.2025).
  - [20] ГОСТ Р 59420–2021. (ИСО 14997:2017). *Оптика и фотоника. Элементы оптические. Дефекты поверхностей. Визуальный контроль*. Москва, ФГБУ «РСТ», 2021.
  - [21] ISO/TR 14997–2:2022. *Technical report. Optics and photonics — Test methods for surface imperfections of optical elements — Part 2: Machine vision*. Published in Switzerland, 2022.
  - [22] Cardoso V.F., Ribeiro C., Lanceros-Mendez S. *Metamorphic biomaterials. Bioinspired Materials for Medical Applications*. Woodhead Publishing, 2017, pp. 69–99.
  - [23] Бурункова Ю.Э., Денисюк И.Ю., Шекланова Е.Б., Фокина М.И. *Оптические полимерные нанокомпозиты*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2017, 80 с.
  - [24] *Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации*. Постановление Правительства РФ от 31 октября 2009 г. № 879 (с изменениями и дополнениями).