

Измерение показателя преломления модифицированным методом призмы

Александр Игоревич Юрин^{1✉}, Геннадий Николаевич Вишняков², Владимир Леонидович Минаев³

^{1, 3} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹ayurin@hse.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>

²vish@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

³minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

Аннотация. Рассмотрены гониометрические методы измерений показателя преломления оптически прозрачных материалов. Предложен модифицированный метод измерения показателя преломления треугольных призм. В работе [1] рассмотрен модифицированный метод постоянного отклонения для измерения показателя преломления, не требующий измерения преломляющего угла призмы, что упрощает процесс измерений, однако при этом используется излучение низкой интенсивности, отражённое от входной грани призмы, что создаёт трудности при обработке сигналов с фотоэлектрического приёмника и может приводить к увеличению погрешности. В настоящей работе эта проблема устранена, так как для получения отражения преломлённого луча и определения начального положения призмы использовали два неподвижных зеркала, а показатель преломления материала призмы рассчитывали из решения системы уравнений. Подобный подход позволяет не использовать излучение, отражённое от граней призмы, что позволяет повысить точность в результате автоматизации процесса измерений. Приведены результаты экспериментального исследования треугольной призмы из оптического стекла с помощью разработанного модифицированного метода призмы и их сравнение с показаниями, полученными с помощью метода наименьшего отклонения, обладающего наибольшей точностью определения показателя преломления. Рассмотренный метод можно применять для исследования треугольных призм из оптически прозрачных материалов, а также жидких оптически прозрачных веществ, помещённых в полую треугольную призму.

Ключевые слова: показатель преломления, рефрактометрия, методы призмы, гониометрические методы, автоколлимационное зеркало

Для цитирования: Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Измерение показателя преломления модифицированным методом призмы // Измерительная техника. 2023. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-2-19-23>

Measurement of the refractive index using a modified prism method

Alexander I. Yurin^{1✉}, Gennady N. Vishnyakov², Vladimir L. Minaev³

^{1, 3} HSE University, Moscow, Russia

^{1, 2, 3} All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ayurin@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>

²vish@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>

³minaev@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>

Abstract. Goniometric methods of measuring the refractive index of optically transparent materials are considered. A modified method for measuring the refractive index of triangular prisms is proposed. In the previous work [1], a modified constant deviation method was proposed for measuring the refractive index, which does not require measuring the refractive angle of the prism. That modification is simple, but its implementation uses low-intensity radiation reflected from the input face of the prism, which creates difficulties in processing signals from a photoelectric receiver and can lead to an increase in measurement error. In this paper, to obtain the reflection of the refracted beam, we used two fixed mirrors, and the refractive index of the prism material was calculated from the solution of a system of equations. This approach makes it possible not to use radiation reflected from the faces of the prism, which makes it possible to increase accuracy by automating the measurement process. The results of an experimental study of a triangular prism made of optical glass using the proposed modified prism method and their comparison with the method of minimum deviation, which has the highest accuracy of determining the refractive index, are presented. The proposed method can be used to study triangular prisms made of optically transparent materials, as well as optically transparent liquids poured in a hollow triangular prism.

Keywords: refractive index, refractometry, prism method, goniometric methods, autocollimation mirror

Введение. Показатель преломления вещества n зависит от многих параметров вещества – агрегатного состояния, химического состава компонентов, длины волны света, температуры и т. д. Значение показателя преломления характеризует свойства вещества, поэтому измерения показателя преломления широко применяются в науке и промышленности [1–5]. Важное направление оптико-физических измерений – рефрактометрия (измерение показателя преломления), позволяющая определять состав материалов, концентрацию компонентов в растворах, качество оптических деталей и т. д. [6].

Для измерения показателя преломления обычно применяют различные методы, основанные на измерении угла преломления света веществом (рефрактометрические методы) [7] и измерении фазовой задержки световой волны (интерференционные методы) [8]. При реализации указанных методов требуется знание основных законов оптики, на основании которых рассчитываются параметры света при его отражении, преломлении и поглощении средой. В результате универсальности, высокой точности и простоты измерений широкое распространение получили гониометрические методы, основанные на измерении углов преломления излучения [9].

Цель данной работы – разработка метода измерения показателя преломления веществ, не использующего отражённое от граней призмы излучение. Разработанный метод позволит повысить точность в результате автоматизации процесса измерений.

Методы измерений. Гониометрические методы применяют для точного измерения показателя преломления твёрдых тел и жидкостей. В качестве образцов обычно применяют прямые треугольные призмы, выполненные из исследуемого материала¹. Для жидких образцов используют полые призмы, которые заполняют исследуемым веществом.

Широко распространёнными методами измерения показателя преломления являются различные вариации метода призмы – методы автоколлимации (метод Литтрова-Аббе) [10], наименьшего отклонения (метод Фраунгофера)

и постоянного отклонения. Иногда применяют также метод скользящего вхождения лучей (метод Кольрауша) [7].

Процесс преломления света треугольной призмой подробно рассмотрен в работе [1]. При прохождении света через призму луч преломляется дважды – сначала на входной грани, затем на выходной. Угол между двумя рабочими гранями призмы называют

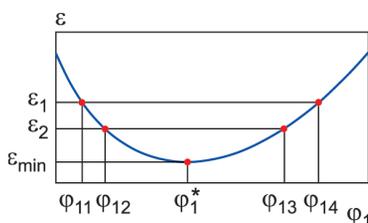


Рис. 1. Зависимость угла отклонения луча ε от угла падения φ_1 на грань призмы

Fig. 1. Dependence of the angle of deflection of the beam ε from the angle of incidence φ_1

преломляющим углом призмы α . Пусть φ_1 – угол падения на первой (входной) грани призмы, φ_2 – угол выхода на второй (выходной) грани призмы. Угол отклонения луча призмой при фиксированных длине волны и температуре является функцией трёх параметров – φ_1 , α , n . Согласно рис. 1 при увеличении угла падения угол отклонения изменяется и достигает минимума ε_{\min} при некотором значении φ_1^* . При этом некоторому углу ε_1 соответствуют два значения угла падения – φ_{11} , φ_{14} , а углу ε_2 – φ_{12} , φ_{13} при условии $\varepsilon_{\min} < \varepsilon_2 < \varepsilon_1$.

В работе [1] предложен вариант использования гониометра для измерения показателя преломления треугольной призмы с помощью модифицированного метода постоянного отклонения, не требующего измерения преломляющего угла. Однако в [1] использовалось излучение, отражённое как от автоколлимационного зеркала, так и от входной грани призмы, необходимое для определения начального положения призмы и значительно меньшее по интенсивности. Существенное различие интенсивности отражённых излучений затрудняет автоматизацию процесса измерений, а также создаёт трудности при обработке сигналов с фотоэлектрического приёмника и может приводить к увеличению погрешности. Поэтому разработка новых методов, не использующих отражение от граней призмы, – актуальная задача.

Модифицированный метод призмы. Рассмотрим модификацию метода призмы, предложенную в данной работе. Для определения показателя преломления необходимо выполнить следующие операции.

1. Измерить углы падения φ_{11} , φ_{12} , φ_{13} , φ_{14} , соответствующие углам отклонения луча ε_1 , ε_2 при достижении автоколлимации от двух неподвижных зеркал, закреплённых на пути преломлённого луча при изменении углового положения призмы.
2. Составить систему уравнений согласно [1]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varphi_{11} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{11}/n)]\}; \\ \varepsilon_2 &= \varphi_{12} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{12}/n)]\}; \\ \varepsilon_1 &= \varphi_{13} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{13}/n)]\}; \\ \varepsilon_2 &= \varphi_{14} - \alpha + \arcsin\{n \sin[\alpha - \arcsin(\sin \varphi_{14}/n)]\}. \end{aligned} \right\} (1)$$

3. Определить относительный показатель преломления n материала призмы из решения системы (1).
4. Вычислить абсолютный показатель преломления n_{abc} по формуле [11]:

$$n_{\text{abc}} = n n_{\text{взд}}, \quad (2)$$

где $n_{\text{взд}}$ – показатель преломления воздуха.

Поскольку начальное угловое положение призмы неизвестно, то значение φ_{11} можно использовать как начало отсчёта углов. Таким образом, с учётом фиксированных

¹ ГОСТ 28869-90. Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления.

значений $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ после измерения углов $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}$ в системе (1), состоящей из четырёх уравнений, остаётся только три независимых параметра – φ_{11}, n, α . Решить подобную систему можно с помощью пакетов прикладного программного обеспечения (MATLAB, Mathcad и т. д.).

На рис. 2 изображена схема измерений. Призму 2 необходимо установить на вращающемся предметном столе 3 так, чтобы ось вращения стола проходила через биссектрису преломляющего угла. На пути преломленного луча 4 расположены два неподвижных зеркала 5 под углами $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ относительно направления луча автоколлиматора 1. При повороте предметного стола необходимо добиться регистрации четырёх электрических импульсов на фотоприёмнике автоколлиматора, соответствующих моментам отражения луча от зеркал, и измерить соответствующие углы падения $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}$, а затем составить систему уравнений (1). Из решения системы (1) можно найти относительный показатель преломления n материала призмы.

Реализация модифицированного метода призмы. Для реализации предложенного метода используем гониометрическую систему производства ООО «Инертех» (Россия)², предназначенную для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов в ручном и автоматизированном режимах.

Технические и метрологические характеристики гониометрической системы

Диапазон измерений углов:	
в горизонтальной плоскости	0–360°
в вертикальной плоскости	±15'
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов	±0,25"
Диаметр предметного стола	100 мм
Габаритные размеры (В×Ш×Д)	650×380×370 мм
Масса.....	47 кг.

Перед началом измерений исследуемую призму устанавливали на предметном столе таким образом, чтобы нормали к граням призмы находились в плоскости падающего луча, а входная грань – в поле зрения камеры автоколлиматора. Предметный стол поворачивали вокруг вертикальной оси с помощью ручки вращения. Углы достижения автоколлимации $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}$ после отражения луча от неподвижных зеркал измеряли фотоэлектрическим цифровым преобразователем угла поворота предметного стола. Первый сигнал с фотоприёмника возникал при отражении луча от первого зеркала и задавал начало отсчёта угловых измерений, а второй и третий сигналы возникали от луча, отражённого от второго зеркала, и четвёртый – от первого.

Для уменьшения погрешности измерения провели для трёх граней призмы и усреднили полученные результаты.

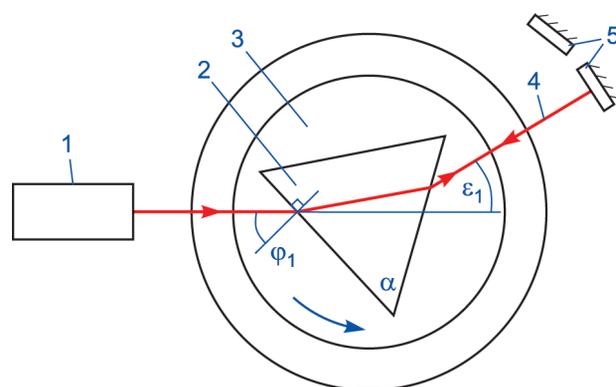


Рис. 2. Схема измерений углов падения луча:

1 – автоколлиматор; 2 – треугольная призма; 3 – вращающийся предметный стол; 4 – луч излучения; 5 – неподвижные зеркала

Fig. 2. Incidence angles measurement scheme

1 – autocollimator; 2 – triangular prism; 3 – rotating object table; 4 – radiation beam; 5 – fixed mirrors

Для получения показаний использовали компьютер с установленным программным обеспечением GonioScan, предназначенным для настройки гониометрической системы, вывода на экран автоколлимационной марки в режиме реального времени и отображения результатов измерений с возможностью их записи в файл.

После измерения углов $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}$ рассчитали значение относительного показателя преломления n материала призмы, решив систему уравнений (1) с помощью надстройки «Поиск решений» Microsoft Excel.

Стоит отметить, что в предложенном методе не используется излучение, отражённое от граней призмы, что упрощает автоматизацию процесса измерений с помощью программного обеспечения при условии настройки уровня усиления сигнала с камеры автоколлиматора. Также подобный метод можно использовать для измерения показателя преломления в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах. В этом случае необходимо вместо автоколлиматора установить источник излучения, а вместо неподвижных зеркал – приёмники, что устранит необходимость применения в оптической схеме светоделительных элементов, ограничивающих спектральный диапазон.

При использовании предложенной модификации метода призмы также отпадает необходимость измерения преломляющего угла, характерная для классических методов наименьшего отклонения, автоколлимации или постоянного отклонения. Значение α при необходимости также можно найти из решения системы (1).

Углы измеряли в нормальных условиях³ для всех граней призмы, каждый угол измеряли многократно с усреднением результатов. В качестве объекта исследования использовали

² ООО «Инертех» [сайт]. URL: <http://inertech-ltd.com> (дата обращения: 28.10.2022).

³ ГОСТ 8.050-73. ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.

меру показателя преломления в виде треугольной призмы, изготовленной из стекла оптического марки К-8⁴.

Спектр источника излучения автоколлиматора гониометрической системы, полученный с помощью мини-спектрометра Hamamatsu C10083CA⁵, имеет максимум на длине волны около 650 нм.

Экспериментальные результаты. В табл. 1 приведены значения, полученные в результате решения системы (1) после измерений углов φ_{11} , φ_{12} , φ_{13} , φ_{14} достижения автоколлимации для трёх граней призмы. Значения n_1 получены при $\varepsilon_1=38^\circ 48' 55,98''$, $\varepsilon_2=43^\circ 56' 32,64''$, а значения n_2 – при повторном эксперименте при вращении призмы в противоположную сторону. Неподвижные зеркала во втором случае устанавливали с другой стороны относительно направления падающего луча, значения ε_1 , ε_2 составили соответственно $38^\circ 50' 55,98''$ и $43^\circ 56' 24,88''$.

Среднее значение относительного показателя преломления по результатам расчётов составило 1,512041. Воспроизводимость результатов измерений можно оценить по среднему квадратическому отклонению (СКО), которое не превышает $1,0 \cdot 10^{-3}$. Отметим, что случайную составляющую погрешности измерений показателя преломления с помощью предложенного метода можно уменьшить при использовании лазерного источника излучения с дискретной длиной волны, поскольку из-за дисперсионных свойств материала призмы происходит размытие изображения автоколлимационной марки, что приводит к увеличению СКО.

Для оценки погрешности измерений проведено сравнение результатов со значением показателя преломления

данной призмы n^* на длине волны источника излучения автоколлиматора, полученным с помощью метода наименьшего отклонения для трёх граней призмы из стекла марки К-8. Преломляющие углы призмы α и углы ε_{\min} наименьшего отклонения также были измерены с помощью рассмотренной гониометрической

Таблица 1
Показатель преломления для трёх граней призмы из стекла марки К-8

Номер грани	n_1	n_2
1	1,511720	1,515027
2	1,509848	1,510389
3	1,509943	1,515320

Таблица 2

Результаты измерений параметров призмы из стекла марки К-8

Номер грани	α	ε_{\min}	n^*
1	$60^\circ 00' 10,56''$	$38^\circ 15' 17,13''$	1,512299
2	$59^\circ 59' 47,10''$	$38^\circ 14' 30,98''$	1,512227
3	$60^\circ 00' 02,34''$	$38^\circ 14' 51,69''$	1,512244

системы. Результаты измерений α , ε_{\min} и расчёта n^* приведены в табл. 2.

Таким образом, разница средних значений показателя преломления, полученных из табл. 1 и с помощью метода наименьшего отклонения, не превысила $\pm 2,0 \cdot 10^{-4}$. Это результат, который доказывает перспективу применения предложенного метода для измерения показателя преломления призм с неизвестными преломляющими углами. Однако для повышения точности желательно использовать лазерные источники излучения для снижения дисперсии излучения и СКО результатов.

Заключение. Предложенный в статье модифицированный метод призмы можно применять для треугольных призм из оптически прозрачных материалов в тех случаях, когда преломляющие углы неизвестны или их высокоточные измерения связаны с техническими трудностями. Предложенная модификация позволяет не использовать излучение, отражённое от граней призмы, что упрощает процесс автоматизации измерений. Метод также можно использовать для жидких оптически прозрачных веществ, залитых в полую треугольную призму с плоскопараллельными прозрачными иллюминаторами.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников / References

- Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянного отклонения // *Измерительная техника*. 2022. № 12. С. 35–39. [Yurin A. I., Vishnyakov G. N., Minaev V. L. Measurement of the refractive index using a modified constant deviation method. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 12, pp. 35–39. (In Russ.)] <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-35-39>
- Shehadeh A., Evangelou A., Kechagia D. et al. *Food Chemistry*, 2020, 329, 127085. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127085>
- Xu M., Shao S., Weng N., Zhou L., Liu Q., Zhao Y. *Applied Science*, 2021, vol. 11, 10548. <https://doi.org/10.3390/app112210548>
- Oti W. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 9, pp. 89–91. <https://doi.org/10.9790/5736-0907018991>
- Kuiper M., Van de Nes A., Nieuwland R., Varga Z., Van der Pol E. *American Journal of Reproductive Immunology*, 2021, 85(2), e13350. <https://doi.org/10.1111/aji.13350>
- Конопелько Л. А. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях. М.: Триумф, 2020. 208 с. [Konopel'ko L. A. *Refraktometricheskie metody v fiziko-khimicheskikh izmereniyakh*. Moscow, Triumph Publ., 2020, 224 p. (in Russ.)]

⁴ ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.

⁵ Hamamatsu Photonics [сайт]. URL: <https://www.hamamatsu.com> (дата обращения: 28.10.2022).

7. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974, 350 с. [Ioffe B. V. *Refractometric Methods in Chemistry*. Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 350 p. (in Russ.)]
8. Lee C., Choi H., Jin J., Cha M. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 23, pp. 6285–6291. <https://doi.org/10.1364/AO.55.006285>
9. Tilton L. W. *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint)*. Forgotten Books, 2017.
10. Юрин А. И., Вишняков Г. Н., Минаев В. Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода Литтрова-Аббе // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 11. С. 39–43. [Yurin A. I., Vishnyakov G. N., Minaev V. L. Measurement of the refractive index using the modified Littrov-Abbe method. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 11, pp. 39–43. (In Russ.)]
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. Пер. с англ. М.: Наука, 1973. [Born M., Wolf E. *Principles of optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 4th ed., Pergamon Press, Oxford, New York, 1969, 808 p.

Статья поступила в редакцию 25.11.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 10.01.2023.
The article was submitted 25.11.2022; approved after reviewing 15.12.2022; accepted for publication 10.01.2023.