

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-1073-1076

УДК 681.786; 535.321

**Измерение показателя преломления
с помощью автоколлимационного гониометра**

**Александр Игоревич Юрин¹, Геннадий Николаевич Вишняков²,
Владимир Леонидович Минаев³, Мария Игоревна Красивская⁴**

^{1,3,4} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000, Российская Федерация

^{1,2,3} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, 119361, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

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

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

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

⁴ mkrasivskaya@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6205-0893>

Аннотация

Предложен модифицированный метод измерения показателя преломления треугольной призмы с помощью автоколлимационной гониометрической системы, предназначенной для измерения углов, образованных плоскими поверхностями объектов. Метод предполагает использование неподвижного зеркала для отражения преломленного луча, измерение углов падения луча на грань призмы, соответствующие положениям автоколлимации и расчет показателя преломления материала призмы на основе решения системы уравнений. Приведены результаты экспериментального исследования треугольной призмы из оптического стекла марки К8 с помощью предложенного метода и их сравнение с показаниями, полученными с помощью Государственного первичного эталона единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021. Применение предложенного метода позволит упростить процесс измерений показателя преломления, в связи с тем, что нет необходимости измерения угла отклонения луча призмой.

Ключевые слова

показатель преломления, метод призмы, гониометр, автоколлиматор, рефрактометрия

Ссылка для цитирования: Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Красивская М.И. Измерение показателя преломления с помощью автоколлимационного гониометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 5. С. 1073–1076. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-1073-1076

Measurement of the refractive index using an autocollimation goniometer

Alexander I. Yurin¹, Gennady N. Vishnyakov², Vladimir L. Minaev³, Maria I. Krasivskaya⁴

^{1,3,4} HSE University, Moscow, 101000, Russian Federation

^{1,2,3} All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, 119361, Russian Federation

² Bauman Moscow State University, Moscow, 105005, Russian Federation

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

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

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

⁴ mkrasivskaya@hse.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6205-0893>

Abstract

The paper proposes a modified method for measuring the refractive index of a triangular prism using an autocollimation angle measuring system designed to measure angles formed by flat surfaces of objects. The method involves using a

© Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Красивская М.И., 2023

fixed mirror to reflect the refracted beam, measurement of the angles of incidence of the beam on the face of the prism corresponding to the autocollimation positions and calculating the refractive index of the prism material using the solution of a system of equations. The paper presents the experimental study results for a triangular prism made of K8 optical glass using the proposed method, and a comparison of the results with the readings obtained using the State Primary Standard of the Refractive Index Unit GET 138-2021. The proposed method makes it possible to simplify the process of measuring the refractive index since there is no need to measure the angle of deviation of the beam.

Keywords

refractive index, prism method, goniometer, autocollimator, refractometry

For citation: Yurin A.I., Vishnyakov G.N., Minaev V.L., Krasivskaya M.I. Measurement of the refractive index using an autocollimation goniometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 1073–1076 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-1073-1076

Показатель преломления (ПП) является важнейшей характеристикой оптических материалов. Измерение ПП позволяет оценить качество оптических деталей, состав и чистоту материалов, содержание компонентов в растворах и т. д. [1]. Для определения ПП часто используют гониометрические методы, основанные на измерении углов отклонения света, проходящего через образец, выполненный в виде прямой треугольной призмы, изготовленной из исследуемого материала или заполненной исследуемой жидкостью [2].

Для измерения углов применяют специальные приборы — гониометры с неподвижным коллиматором и поворотным предметным столом [3].

Луч света, падающий на треугольную призму под углом φ_1 отклоняется на некоторый угол ε . Если обозначить угол между рабочими гранями призмы (преломляющий угол) как α , то, исходя из закона преломления света и геометрических свойств углов, можно записать [4]:

$$\varepsilon = \varphi_1 - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_1}{n} \right) \right) \right], \quad (1)$$

где n — ПП материала призмы.

Как видно на рис. 1, при увеличении φ_1 угол отклонения уменьшается и достигает минимума $\varepsilon_{\min}$ при некотором значении φ_1^* , а затем снова возрастает.

Разработано несколько методов¹ для определения ПП треугольных призм [5, 6]. В частности, для расчета n с помощью уравнения (1) необходимо измерить три угла — ε , φ_1 и α .

В работах [7–10] предложены варианты измерения ПП треугольной призмы с помощью автоколлимационного гониометра. При этом на пути луча, проходящего через грани призмы, установлено неподвижное зеркало и измерены углы падения, при которых происходит автоколлимация от зеркала, а также угол отклонения луча ε , по которым вычислено значение ПП. Однако для нахождения значения ε необходимо установить дополнительное зеркало на поворотный стол гониометра и добиваться автоколлимации отраженного от него луча, что значительно усложняет процедуру измерений.

Данный метод можно модифицировать таким образом, чтобы избавиться от необходимости измерения угла ε . Так как каждому углу ε_1 , большему $\varepsilon_{\min}$, соответствуют два значения $\varphi_1 - \varphi_{11}$ и φ_{12} (рис. 1), то можно

измерить φ_{11} , φ_{12} и α при произвольном значении ε_1 , а расчет ПП при этом возможен путем решения системы уравнений согласно выражению (1):

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varphi_{11} - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{11}}{n} \right) \right) \right] \\ \varepsilon_1 = \varphi_{12} - \alpha + \arcsin \left[n \sin \left(\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_{12}}{n} \right) \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 2 изображена схема измерений. Призма 1 установлена на поворотном предметном столе 2 так, чтобы центр входной грани находился перпендикулярно падающему лучу 3 (рис. 2, а).

На пути преломленного луча установлено неподвижное зеркало 4 под некоторым углом ε_1 относительно направления луча автоколлиматора 5, причем $\varepsilon_1 > \varepsilon_{\min}$. Поворачивая предметный стол, оснащенный высокоточным угловым энкодером, измерен угол β между положениями призмы, при которых достигается автоколлимация луча от граней (рис. 2, б), и рассчитано значение α по формуле:

$$\alpha = \pi - \beta.$$

При дальнейшем повороте предметного стола измерены углы падения φ_{11} , φ_{12} , соответствующие моментам отражения луча от неподвижного зеркала (рис. 2, с, д) и составлена система уравнений (2). Таким образом, с учетом того, что значение ε_1 неизвестно, после измерения углов φ_{11} , φ_{12} в системе (2) получено

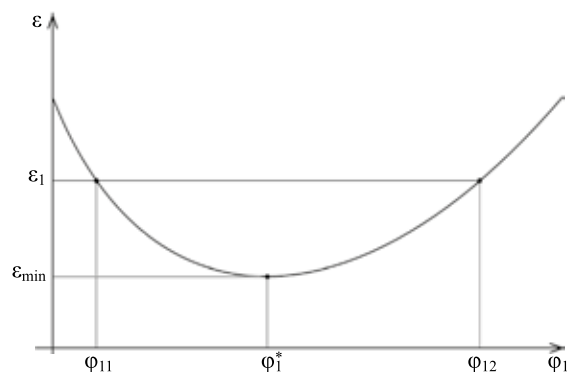


Рис. 1. Зависимость угла отклонения луча ε от угла падения φ_1 на грань призмы

Fig. 1. Dependence of the beam deviation angle ε vs. the angle of incidence φ_1

¹ ГОСТ 28869-90. Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления. Введен 01.01.1992. М.: Издательство стандартов, 1991. 19 с.

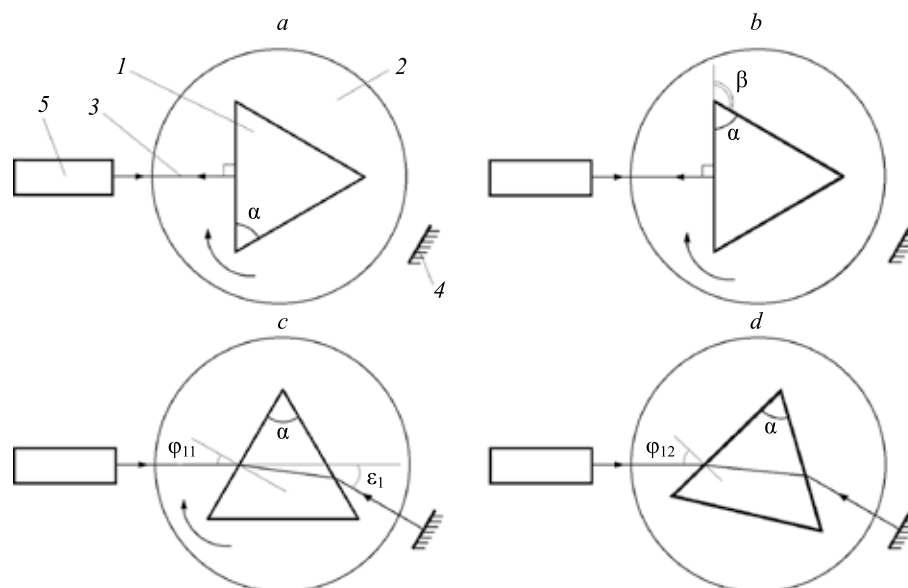


Рис. 2. Схема измерений углов автоколлимации луча от граней призмы (а, б) и неподвижного зеркала (с, д).

1 — треугольная призма; 2 — поворотный предметный стол; 3 — луч света; 4 — неподвижное зеркало; 5 — автоколлиматор

Fig. 2. Diagram of the angles measurements of the beam autocollimation from the faces of the prism (a, b) and the fixed mirror (c, d).

1 — triangular prism, 2 — rotating object table, 3 — light beam, 4 — fixed mirror, 5 — autocollimator

два параметра — ε_1 и n , и существует ее однозначное решение.

Для реализации предложенного метода использована гониометрическая система производства ООО «Инертех»¹, позволяющая измерять углы между плоскими поверхностями объектов с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,25''$ при нормальных условиях эксплуатации. В качестве объекта исследована эталонная мера ПП в виде треугольной призмы из оптического стекла марки К8. Результаты измерений представлены в таблице. По результатам измерений составлена система уравнений (2) и решена с помощью одного из пакетов математического программного обеспечения (например, MATLAB, Mathcad и т. п.). В настоящей работе численное решение найдено с помощью надстройки «Solver» Microsoft Excel, реализующей поиск решения нелинейных задач методом обобщенного приведенного градиента.

¹ [Электронный ресурс]. <http://inertech-ltd.com> (дата обращения: 07.09.2023).

Среднее значение ПП, рассчитанного для трех граней призмы составляет 1,51403, при этом абсолютная погрешность не превышает $\pm 2,0 \cdot 10^{-4}$ по сравнению с результатами, полученными при помощи Государственного первичного эталона единицы ПП ГЭТ 138-2021 [11] для длины волны излучения автоколлиматора гониометрической системы (650 нм), что доказывает применимость предложенного метода.

Таблица. Результаты измерений преломляющих углов и углов достижения автоколлимации для трех граней призмы из стекла марки К8

Table. Measurement results for prism angles and angles of autocollimation at three faces of a prism made of K8 glass

Номер грани	α , рад	φ_{11} , рад	φ_{12} , рад
1	1,04720996	0,75488321	0,97259680
2	1,04718669	0,75521987	0,97287372
3	1,04719600	0,75487085	0,97286117

Литература

1. Рефрактометрические методы в физико-химических измерениях / под ред. Л.А. Конопелько. М.: Триумф, 2020. 208 с. <https://doi.org/10.32986/978-5-907052-08-03-2020-208>
2. Tilton L.W. Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint). Forgotten Books, 2018. 24 p.
3. Афанасьев В.А. Оптические измерения: учебник для вузов / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
4. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Корнышева С.В., Зюзов Г.Н., Людомирский М.Б., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Измерение показателя преломления на гониометре в динамическом режиме // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 12. С. 53–58.

References

1. *Refractometric Methods in Physicochemical Measurements*. Ed. by L.A. Konopelko. Moscow, Triumph Publ., 2020, 208 p. (in Russian). <https://doi.org/10.32986/978-5-907052-08-03-2020-208>
2. Tilton L.W. *Prism Refractometry and Certain Goniometrical Requirements for Precision (Classic Reprint)*. Forgotten Books, 2018, 24 p.
3. Afanasev V.A. *Optical Measurements*. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1981, 229 p. (in Russian)
4. Vishnyakov G.N., Levin G.G., Kornysheva S.V., Zyuzev G.N., Lyudomirskii M.B., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. Measuring the refractive index on a goniometer in the dynamic regime. *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, no. 12, pp. 929–933. <https://doi.org/10.1364/JOT.72.000929>

5. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974. 400 с.
6. Astrua M., Pisani M. Prism refractive index measurement at INRiM // *Measurement Science and Technology*. 2009. V. 20. N 9. P. 095305. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/9/095305>
7. Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Измерение показателя преломления с помощью гониометрической системы // *Оптика и спектроскопия*. 2022. Т. 130. № 12. С. 1899–1903. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54098.4103-22>
8. 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. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-35-39>
9. Юрин А.И., Вишняков Г.Н., Минаев В.Л. Измерение показателя преломления с помощью модифицированного метода постоянной призмы // *Измерительная техника*. 2023. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-2-19-23>
10. Демчук В.Ю., Зайцев И.И. Способ измерения показателя преломления оптического стекла. Авторское свидетельство № 1511647. 1987.
11. Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Бочкарева С.С. Государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138-2021 // *Измерительная техника*. 2022. № 5. С. 4–9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-4-9>
5. Ioffe B.V. *Refractometric Methods in Chemistry*. Leningrad, Himija Publ., 1974, 400 p. (in Russian)
6. Astrua M., Pisani M. Prism refractive index measurement at INRiM. *Measurement Science and Technology*, 2009, vol. 20, no. 9, pp. 095305. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/9/095305>
7. Yurin A.I., Vishnyakov G.N., Minaev V.L. Measurement of the refractive index using a goniometric system. *Optics and Spectroscopy*, 2022, vol. 130, no. 12, pp. 1624–1627. <https://doi.org/10.21883/EOS.2022.12.55252.4103-22>
8. Yurin A.I., Vishnyakov G.N., Minaev V.L. Measurement of the refractive index using a modified constant deviation method. *Measurement Techniques*, 2023, vol. 65, no. 1, pp. 904–908. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02168-y>
9. Yurin A.I., Vishnyakov G.N., Minaev V.L. Refractive index measurement using a modified prism method. *Measurement Techniques*, 2023, vol. 66, no. 2, pp. 96–100. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02195-9>
10. Demchuk V.Iu., Zaitcev I.I. Method for Measuring the Refractive Index of Optical Glass. *Patent 1511647*, 1987. (in Russian)
11. Vishnyakov G.N., Minaev V.L., Bochkareva S.S. GET 138-2021 state primary refractive index standard. *Measurement Techniques*, 2022, vol. 65, no. 5, pp. 307–314. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02090-9>

Авторы

Юрин Александр Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, 119361, Российская Федерация, [sc 15756657400](https://orcid.org/0000-0002-6401-5530), <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>, ayurin@hse.ru

Вишняков Геннадий Николаевич — доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, 119361, Российская Федерация; профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, [sc 7003644474](https://orcid.org/0000-0003-0237-4738), <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>, vish@vniiofi.ru

Минаев Владимир Леонидович — доктор технических наук, начальник научно-исследовательского отделения голографии, оптической томографии, нанотехнологий и наноматериалов, Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, 119361, Российская Федерация; профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000, Российская Федерация, [sc 7007026957](https://orcid.org/0000-0002-4356-301X), <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>, minaev@vniiofi.ru

Красивская Мария Игоревна — старший преподаватель, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000, Российская Федерация, [sc 57215353698](https://orcid.org/0000-0002-6205-0893), <https://orcid.org/0000-0002-6205-0893>, mkrasivskaya@hse.ru

Authors

Alexander I. Yurin — PhD, Associate Professor, Associate Professor, HSE University, Moscow, 101000, Russian Federation; Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, 119361, Russian Federation, [sc 15756657400](https://orcid.org/0000-0002-6401-5530), <https://orcid.org/0000-0002-6401-5530>, ayurin@hse.ru

Gennady N. Vishnyakov — D. Sc., Professor, Head of Laboratory, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, 119361, Russian Federation; Professor, Bauman Moscow State University, Moscow, 105005, Russian Federation, [sc 7003644474](https://orcid.org/0000-0003-0237-4738), <https://orcid.org/0000-0003-0237-4738>, vish@vniiofi.ru

Vladimir L. Minaev — D. Sc., Head of Department, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, 119361, Russian Federation; Professor, HSE University, Moscow, 101000, Russian Federation, [sc 7007026957](https://orcid.org/0000-0002-4356-301X), <https://orcid.org/0000-0002-4356-301X>, minaev@vniiofi.ru

Maria I. Krasivskaya — Senior Lecturer, HSE University, Moscow, 101000, Russian Federation, [sc 57215353698](https://orcid.org/0000-0002-6205-0893), <https://orcid.org/0000-0002-6205-0893>, mkrasivskaya@hse.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2023

Одобрена после рецензирования 13.08.2023

Принята к печати 25.09.2023

Received 28.07.2023

Approved after reviewing 13.08.2023

Accepted 25.09.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»