

Новая методика управления дискретностью шкалы в дифференциальном мобильном рефрактометре

Д.С. Проводин^{1,*}, М.А. Якушева^{2,†}, В.В. Давыдов^{1,2,‡}, Д.Д. Цыганова^{2,§}

¹Санкт-Петербургский Политехнический университет имени Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 1. 29 литера Б

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
факультет инфокоммуникационных сетей и систем, кафедра фотоники и линий связи

Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1

(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 16.06.2024)

Обоснована необходимость проведения измерения показателя преломления жидкой среды в диапазоне от 1.230 до 2.830 с погрешностью 0.0001 для однозначного экспресс-контроля её состояния. Предложена методика управления дискретностью шкалы измерения n_D для перехода от погрешности измерения 0.001 к погрешности измерения 0.0001 без смены лазера и фотодиодной линейки, и расстояния между ними. С использованием новой методики на разработанной ранее конструкция мобильного рефрактометра с дифференциальной кюветой Андерсона проведены исследования различных сред и их смесей. Проведено сопоставление полученных результатов измерений n_D с данными на промышленном рефрактометре. Подтверждена адекватность разработанной методики и целесообразность её использования.

PACS: 07.60.-j

УДК: 535.015

Ключевые слова: рефрактометр, лазерное излучение, кювета Андерсона, фотодиодная линейка, жидкость, погрешность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научно-технического прогресса привело к увеличению числа жидких сред и их смесей, которые используются в различных исследованиях, промышленном и фармацевтическом производстве и прочие [1–4]. Для получения достоверных результатов, как при исследованиях, так и обеспечении технологического цикла на производстве необходим контроль состояния жидкой среды [1, 2, 5–8]. Наибольшие сложности возникают при экспресс-контроле жидких сред. Они связаны с тем, что прибор для экспресс-контроля с одной стороны должен быть мобильным, с другой стороны, обеспечивать измерения для контроля состояния большого числа жидких сред и их смесей [8–11]. В настоящее время этим требованиям удовлетворяют только два прибора: ядерные магнитные измерители и рефрактометры [9–15].

Наибольшее предпочтение среди этих двух приборов получили рефрактометры по причине простоты эксплуатации, весу конструкции и стоимости. На сегодняшний день разработано большое число различных мобильных рефрактометров для экспресс-контроля жидких сред. У всех этих приборов есть ограничение по типу измеряемой жидкости и погрешности измерения параметров жидкой среды, что ограничивает их применение в разных сферах. Одним из наиболее перспективных вариантов решения данных проблем является

использование разработанного нами дифференциального рефрактометра [8, 15], который позволяет проводить измерения показателя преломления жидкой среды в диапазоне от 1.23 до 2.63 (все существующие жидкие среды и их смеси).

Еще одним преимуществом разработанного мобильного дифференциального рефрактометра является то, что используемая для измерений кювета Андерсона может быть с герметичной крышкой. Это обеспечивает возможность продолжительных исследований опасных и летучих сред (испарения от среды должны быть или исключены, или минимальны).

Проблемой, которая возникает при измерениях в мобильном дифференциальном рефрактометре связана с обеспечением погрешности измерения n_D не выше 0.0001 во всем диапазоне от 1.23 до 2.63. Прямым измерением n_D в конструкциях дифференциальных рефрактометрах это обеспечить крайне сложно, так как фотодиодная линейка в своем составе содержит 4096 пикселей, что при шаге измерения n_D в 0.0001 не позволит обеспечить измерения во всем диапазоне. Поэтому цель нашей работы является разработка новой методики измерения, которая позволит управлять дискретностью шкалы измерения n_D для обеспечения погрешности измерения 0.0001 в диапазоне от 1.23 до 2.63.

1. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ КЮВЕТА АНДЕРСОНА И НОВАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОСЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основным измерительными элементами в конструкции дифференциального рефрактометра является кювета Андерсона и фотодиодная линейка, на пикселях

* provodindanya@gmail.com

† yakusheva.maria666@gmail.com

‡ davydov_vadim66@mail.ru

§ diana.diana.tsyanova@mail.ru

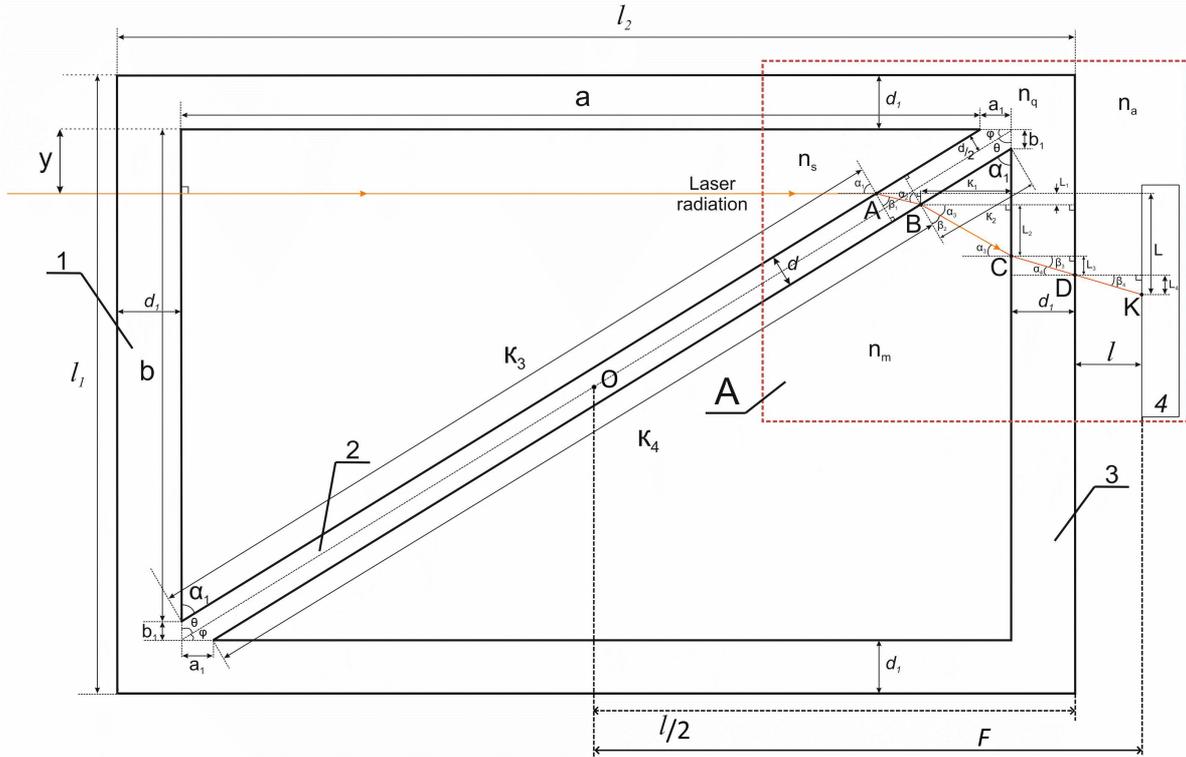


Рис. 1. Структурная схема оптической части лабораторного макета дифференциального рефрактометра для измерения показателя преломления: 1 — стенка кюветы Андерсона, через которую вводится лазерное излучение; 2 — перегородка в дифференциальной кювете Андерсона; 3 — грань кюветы для вывода лазерного излучения; 4 — фотодиодная линейка

которой регистрируется положение оптической оси лазерного излучения. На рис. 1 представлена конструкция кюветы Андерсона и изменение траектории оптической оси лазерного излучения для расчета его смещения на фотодиодной линейке

Для регистрации положения оси лазерного излучения в разработанной нами конструкции рефрактометра [8, 15] используется фотодиодная линейка с 2048 сенсорами (пикселями). Это позволяет на первом шаге измерения проводить контроль изменения показателя преломления n_m в диапазоне от 1.230 до 2.630 с шагом 0.001 (при запасе по сенсорам 600 на каждый край в линейке). При таком построении необходимый диапазон измерения n_m обеспечивается с 20% запасом, что отвечает современным требованиям к измерительным приборам. Такое построение схемы регистрации оси лазерного излучения позволяет начинать

измерения n_m с 310 сенсора, что значительно уменьшает краевые эффекты, которые возникали ранее при использовании 1024 сенсоров в фотодиодной линейке. Для определения значения n_m (исследуемой жидкости) в двух отделениях кюветы Андерсона эталонная и измеряемая жидкость (рис. 1). Далее под прямым углом в кювету заводится лазерное излучение (рис. 1), ось которого после нескольких преломлений регистрируется фотодиодной линейкой 4. Относительно первоначального положения оси лазерного излучения на фотодиодной линейке (без кюветы Андерсона) определяется с учетом параметров кюветы, расстояния l и значений n_m и n_s (эталонная жидкость) его смещение L . В работах [8, 15] подробно рассмотрены процессы преломления оси лазерного излучения и различные условия для его поступления на сенсоры фотодиодной линейки и выведено соотношение для определения L :

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = \sin \alpha_1 \left(d \left(1 - \frac{n_s \cos \alpha_1}{\sqrt{n_q^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1}} \right) + \left(\sqrt{n_m^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1} - n_s \cos \alpha_1 \right) \times \right. \\
 \times \left(\frac{l}{\sqrt{n_a^2 - \sin^2 \alpha_1} \left(n_m^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1 + n_s^2 \cos^2 \alpha_1 - 2n_s \cos \alpha_1 \sqrt{n_m^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1} \right)} + \right. \\
 \left. + \frac{d_1}{\sqrt{n_q^2 - \sin^2 \alpha_1} \left(n_m^2 + n_s^2 \cos^2 \alpha_1 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1 - 2n_s \cos \alpha_1 \sqrt{n_m^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1} \right)} + \right. \\
 \left. + \frac{K_1}{\cos \alpha_1 \sqrt{n_m^2 - n_s^2 \sin^2 \alpha_1} + n_s \sin^2 \alpha_1} \right) \Bigg).$$

Для получения достоверного значения, в соответствии с требованиями экспресс-контроля, показатель преломления жидкой среды n_m необходимо измерять с погрешностью 0.0001 и менее. Для этого нами была разработана новая методика изменения дискретности шкалы в мобильном рефрактометре без изменения конструкции линейки и принцип регистрации лазерного излучения. Для измеренного значения n_m необходимо выбрать новую конструкцию кюветы Андерсона и новую эталонную жидкость (новое значение n_s), так чтобы изменению n_m на 0.0001 на фотодиодной линейке соответствовало смещение на один сенсор (рис. 2).

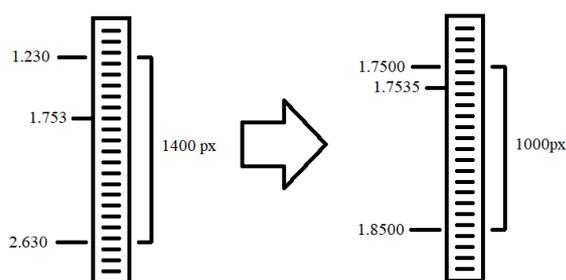


Рис. 2. Методика изменения дискретности шкалы измерения показателя n_m преломления на фотодиодной линейке

До этого ранее было определено значение n_m до третьего знака (например, $n_m = 1.753$). После такой замены диапазон измерения n_m будет осуществляться от 1.7500 до 1.8500 с шагом 0.0001 (погрешность измерения 0.0001). Кроме того, в данной методике есть запас на смещение лазерного излучения по фотодиодной линейке в случае изменения температуры исследуемой и эталонной жидкости.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД И ИХ СМЕСЕЙ

Разработанная методика изменения дискретности шкалы показателя преломления была апробирована на разработанной нами ранее конструкция дифференциального рефрактометра при исследовании углеводородных сред и их смесей. На рис. 3, в качестве примера, представлены результаты исследования изменения показателя преломления различных марок бензинов от изменения T .

Анализ полученных зависимостей показывает, что характер изменения n_m соответствует ранее полученным результатам на стационарных рефрактометрах и отражает физические процессы, происходящие в бензине при его нагреве.

Для определения достоверности разработанной методики изменения дискретности шкалы измерения показателя преломления n_m были проведены исследования смесей бензинов при различных температурах

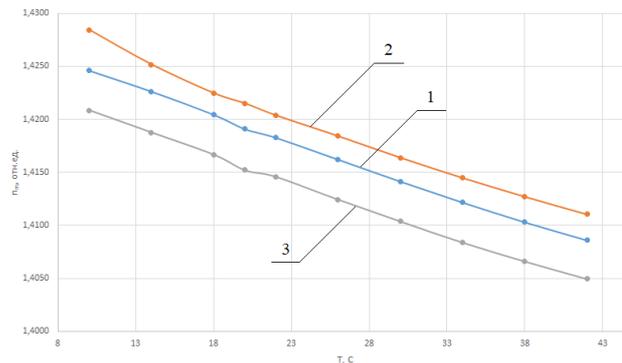


Рис. 3. Изменение показателя преломления n_m от температуры T различных марок бензинов. Графикам 1, 2 и 3 соответствует бензин: АИ-95+, АИ-98 и АИ-100

и проведено их сравнение с результатами измерений на промышленном рефрактометре СНЕЛ-105 (погрешность измерения 0.00005). В табл. 1 и 2 представлены результаты исследований с использованием двух приборов.

Таблица 1. Изменение показателя преломления n_m смеси бензинов АИ-95 и АИ -95+ в соотношении 50% на 50% от температуры T

T, C	Лабораторный макет дифференциального рефрактометра	Промышленный рефрактометр СНЕЛ-105
10.0 ± 0.1	1.4239 ± 0.0001	1.42384 ± 0.00005
14.0 ± 0.1	1.4217 ± 0.0001	1.42165 ± 0.00005
18.0 ± 0.1	1.4194 ± 0.0001	1.41936 ± 0.00005
20.0 ± 0.1	1.4185 ± 0.0001	1.41844 ± 0.00005
22.0 ± 0.1	1.4173 ± 0.0001	1.41723 ± 0.00005
26.0 ± 0.1	1.4151 ± 0.0001	1.41493 ± 0.00005
30.0 ± 0.1	1.4131 ± 0.0001	1.41305 ± 0.00005
34.0 ± 0.1	1.4110 ± 0.0001	1.41093 ± 0.00005
38.0 ± 0.1	1.4092 ± 0.0001	1.40914 ± 0.00005
42.0 ± 0.1	1.4074 ± 0.0001	1.40733 ± 0.00005

Анализ данных в табл. 1 и 2 показывает, что результаты измерений n_m совпадают в пределах погрешности измерения, что подтверждает достоверность разработанной нами методики измерения с использованием изменения дискретности шкалы, что позволяет обеспечить погрешность измерения 0.0001 и менее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что изменение параметров дифференциальной кюветы Андерсона и показателя преломления n_s эталонной жидкости

Таблица 2. Изменение показателя преломления n_m смеси трех бензинов в следующем соотношении: АИ-100 — 60%, АИ-98 — 20%, АИ-95 — 20% от температуры T

T, C	Лабораторный макет дифференциального рефрактометра	Промышленный рефрактометр СНЕЛ-105
10.0 ± 0.1	1.4262 ± 0.0001	1.42613 ± 0.00005
14.0 ± 0.1	1.4244 ± 0.0001	1.42434 ± 0.00005
18.0 ± 0.1	1.4222 ± 0.0001	1.42214 ± 0.00005
20.0 ± 0.1	1.4205 ± 0.0001	1.42043 ± 0.00005
22.0 ± 0.1	1.4202 ± 0.0001	1.42014 ± 0.00005
26.0 ± 0.1	1.4182 ± 0.0001	1.41815 ± 0.00005
30.0 ± 0.1	1.4162 ± 0.0001	1.41613 ± 0.00005
34.0 ± 0.1	1.4144 ± 0.0001	1.41434 ± 0.00005
38.0 ± 0.1	1.4125 ± 0.0001	1.41244 ± 0.00005
42.0 ± 0.1	1.4110 ± 0.0001	1.41093 ± 0.00005

позволяет управлять дискретностью шкалы измерения n_m в различных пределах, что обеспечивает погрешность измерения 0.0001 в диапазоне изменения показателя преломления исследуемой среды от 1.23 до 2.63. Это полностью удовлетворяет требованиям экспресс-контроля.

В перспективе существует возможность выбором параметров кюветы Андерсона и показателя преломления n_s обеспечить значение погрешности измерения порядка 0.00005 и менее. Для этого надо определиться с допусками на изготовления граней и перегородки в кювете Андерсона и обеспечить значение n_s у эталонной жидкости с точностью не хуже, чем 0.00001. В таком случае, разработанную модель дифференциального рефрактометра можно будет использовать для научных исследований и прочие.

- [1] Davydov V.V. // Measurement Techniques. **62**, N 2. 1090 (2020).
- [2] Kuzmin M.S., Rogov S.A. // Computer Optics. **43**, N 3. 391 (2019).
- [3] Myazin N.S., Smirnov K.J., Logunov S.J. // Journal of Physics: Conference Series. **929**, N 1. 012080 (2017).
- [4] Grevtseva A.S., Smirnov K.J., Greshnevnikov K.V. et al. // Journal of Physics: Conference Series. **1368**, N 2. 022072 (2018).
- [5] Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E. et al. // Measurement Techniques. **61**, N 3. 297 (2018).
- [6] Davydov V.V., Dudkin V.I. // Technical Physics. **63**, N 12. 1845 (2018).
- [7] Grebenikova N.M., Davydov R.V., Rud V.Yu. // Journal of Physics: Conference Series. **1326**, N 1. 012012 (2019).
- [8] Provodin D.S., Borodaenko V.I. // Proceeding of VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara, Russian Federation. **21992029**, 217 (2022).
- [9] Davydov V.V., Dudkin V.I. // Technical Physics. **63**, N 12. 1845 (2018).
- [10] Karabegov M.A. // Measurement Techniques. **47**, N 11. 1106 (2004).
- [11] Davydov V.V., Smirnov K.J. // Measurement Techniques. **62**, N 6. 519 (2019).
- [12] Contreras-Tello H., Garc3a-Valenzuela A. // Applied Optics. **53**, N 21. 4768 (2014).
- [13] Chen J., Guo W., Xia M., Li W., Yang K. // Optics Express. **26**, N 20. 25510 (2018).
- [14] Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. // Computer Optics. **44**, N 3. 295 (2020).
- [15] Davydov V.V., Provodin D.S., Gol'dberg A.A., Kochetkov I.D. // Computer Optics. **48**, N 2. 217 (2024).

A new technique for controlling scale discreteness in a differential mobile refractometer

D.S. Provodin^{1,a}, M.A. Yakusheva^{2,b}, V.V. Davydov^{1,2,c}, D.D. Tsyganova^{2,d}

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, 195251, Russia

²St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M. A. Bonch-Bruевич, Faculty of Information and Communication Networks and Systems, Department of Photonics and Communication Lines
St. Petersburg, 193232, Russia

E-mail: ^aprovodindanya@gmail.com, ^byakusheva.maria666@gmail.com, ^cdavydov_vadim66@mail.ru, ^ddiana.diana.tsyganova@mail.ru

The necessity of measuring the refractive index[?] of a liquid medium in the range from 1.230 to 2.830 with an accuracy of 0.0001 for unambiguous express monitoring of its state is substantiated. A methodology for controlling the discretization of the refractive index[?] measurement scale is proposed to transition from a measurement accuracy of 0.001 to 0.0001 without changing the laser and photodiode array or the distance between them. Using the new methodology on the previously developed design of a mobile refractometer with an Anderson differential cuvette, studies were conducted on various media and their mixtures. The results of the refractive index[?] measurements

obtained were compared with data from an industrial refractometer. The adequacy of the developed methodology and the feasibility of its use were confirmed.

PACS: 07.60.-j

Keywords: refractometer, laser radiation, Anderson cuvette, photodiode array, liquid, measurement error.

Received 2024.

Сведения об авторах

1. Проводин Даниил Сергеевич — аспирант; e-mail: provodindanya@gmail.com.
2. Якушева Мария Андреевна — аспирант; e-mail: yakusheva.maria666@gmail.com.
3. Давыдов Вадим Владимирович — профессор СПбПУ Петра Великого. тел.: (812) 556-27-80, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
4. Цыганова Диана Денисовна — бакалавр; e-mail: diana.diana.tsyanova@mail.ru.