

Разработка малогабаритного рефрактометра для экспресс-контроля летучих углеводородных сред и их смесей в видимом свете

А.Д. Беляев^{1,*} В.В. Давыдов^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет имени профессора М.А. Бонч-Бруевича
Россия, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22

²Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого
Россия 195251, Санкт-Петербург, Политехническая улица, 29
(Поступила в редакцию 13.06.2025; подписана в печать 02.12.2025)

Обоснована необходимость разработки малогабаритного мобильного рефрактометра для экспресс-контроля состояния углеводородных смесей для определения их состава и концентрации компонент в случае, если среда представляет собой смесь из двух углеводородных сред. Этот метод позволит осуществлять комплексный контроль углеводородных сред на месте взятия пробы и принимать обоснованное решение по их использованию по назначению без дополнительных исследований в стационарной лаборатории. Это позволит сэкономить время и ресурсы при решении многих задач, которые связаны с использованием топлива (например, для подвижных объектов и прочие). Новый метод отличается быстрой проведения измерений и не требует специальной пробоподготовки. Погрешность измерения показателя преломления ± 0.0002 , что достаточно для достоверного экспресс-контроля. Приведены исследования углеводородных сред и их смесей. Полученные результаты подтвердили адекватность разработки нового метода и конструкции рефрактометра для его реализации на основании достоверности определения состава смеси углеводородов и концентрации компонент в ней.

PACS: 78.47.+p УДК: 535.3

Ключевые слова: рефракция, показатель преломления, углеводороды, видимый свет, длина волны, полное внутреннее отражение, граница свет-тень, концентрация.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях увеличения потребления углеводородов в различных сферах постоянно повышаются требования по контролю их качества. Это приводит к возникновению ряда задач для контроля их состояния в месте взятия пробы [1–4]. Особенno эти требования возрастают к топливу для подвижных объектов, в которых маневренность и скорость движения сильно зависят от качества топлива [5–7]. В такой ситуации в оценке состояния топлива методы экспресс-контроля становятся крайне востребованными. Их использование позволяет на месте взятия пробы определить её состояние в реальном времени и определить как в дальнейшем использовать данное топливо. Среди топлива наибольшее потребление среди пользователей получили бензины и керосины для различных подвижных объектов [7, 9, 11–14]. Качество бензина и керосина оценивается на основе таких показателей, как октановое число, плотность, содержание серы, ароматических углеводородов и других химических компонентов. Если качество не отвечает необходимым нормам, то это приводит к неэффективной работе мотора подвижного объекта, к ухудшению экологической обстановки с работающим двигателем, а также к разрушению механической части двигателя (например, прогоранию клапанов и быстрой деградации поршней). Для быстрой и точной оценки содержания различных веществ в бензине

используют различные приборы [5–9, 11–14]. Большинство из них настольные и для мобильных измерений на месте взятия пробы их применять сложно.

Одним из перспективных направлений в экспресс-анализе состояния углеводородов является использование различных рефрактометров, так как каждая конденсированная среда обладает уникальным показателем преломления [12, 14–18]. С другой стороны, при эксплуатации этих приборов при исследовании смесей углеводородных сред по измеренному значению показателя преломления можно установить только наличие отклонения в её составе от стандартного значения (по изменению значения n). Этого, как показывает практика, недостаточно для многих пользователей, так не ясно, можно ли использовать данное топливо по назначению, если отклонения небольшие в измеренном значении n . Поэтому целью нашей работы является разработка нового метода для определения состава и концентрации компонент в смеси углеводородных сред, который можно реализовать при экспресс-контроле, а также конструкции мобильного рефрактометра для реализации предложенного метода.

1. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА СМЕСИ ИЗ УГЛЕВОДОРОДОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТ В НЕЙ

При смешивании двух углеводородов не происходит химической реакции между ними. Углеводороды образуют конгломерат. Если данную смесь перед измерением хорошо перемешать в небольшом герметичном кон-

* adbelyaev05@gmail.com

тейнере, например, пластмассовой кювете с крышкой объемом 10–15 мл, то можно измерить результирующий показатель преломления n_m от двух сред, которые её образовали. Показатель преломления этой смеси можно описать следующим уравнением рефракции:

$$n_m = K_1 n_1 + K_2 n_2, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления сред, из которых может состоять исследуемая среда (название среды, которую мы проверяем при экспресс-контроле, знаем), K_1 и K_2 — коэффициенты, которые характеризуют относительное содержание этих сред в исследуемой среде (для определения процентного содержания их умножают на 100%).

Необходимо отметить, что для коэффициентов K_1 и K_2 выполняется следующее соотношение:

$$K_1 + K_2 = 1. \quad (2)$$

В смеси углеводородов по причине разной плотности более тяжелые (плотные) опускаются вниз, более легкие (менее плотные) поднимаются наверх. Нами была составлена табл. 1 для различных видов топлива, чтобы понимать возможное распределение фракций исследуемой смеси.

Через некоторое время после размещения исследуемой смеси на призме рефрактометра необходимо провести измерения показателей преломления верхнего слоя n_1 и нижнего слоя n_2 . В этом случае по результатам измерений показателей преломления можно определить марки бензинов. Далее рассматривается система уравнений (1) и (2), в которой неизвестными являются значения K_1 и K_2 . Эти значения в данном случае находятся однозначно.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ РАЗРАБОТАННОГО МОБИЛЬНОГО РЕФРАКТОМЕТРА

Для подтверждения, предложенного нами метода определения состава исследуемой смеси и концентрации в ней компонент углеводородов, был разработан рефрактометр на основе явления полного внутреннего отражения для проведения измерений в видимом свете на желтой линии спектра $\lambda = 589.3$ нм. Рефрактометр работает на видимом свете (солнце, лампа накаливания и прочие). Желтая составляющая спектра из видимого диапазона обеспечивается наличием в конструкции прибора узкополосного фильтра на 12 нм с центральной составляющей желтой линией натрия — 23. Это сделано для того, чтобы было удобно наши измерения сопоставлять с другими измерениями, так как данная длина волны является эталонной и многие значения показателей преломления, характеризующие стандартное состояние сред, получены на этой длине волны.

На рис. 1 и 2 представлены структурные схемы разработанного рефрактометра для проведения измерений

показателя преломления от верхнего и нижнего слоя смеси после распределения.

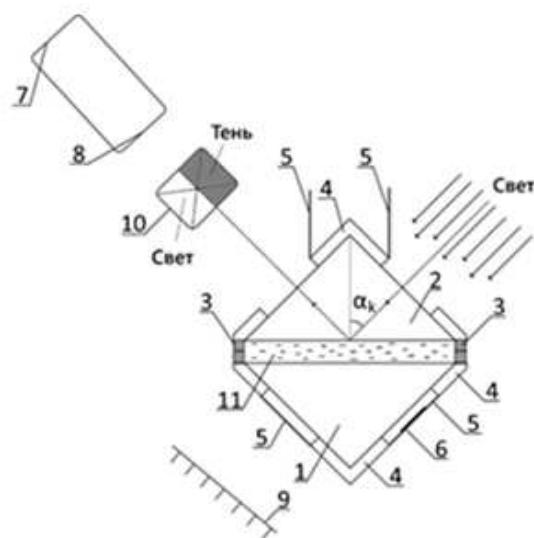


Рис. 1. Структурная схема рефрактометра: 1 — нижняя треугольная призма, 2 — верхняя треугольная призма, 3 — силиконовые прокладки, 4 — поворотное крепление призм, 5 — закрывающаяся заслонка, 6 — зеркало, 7 — окуляр, 8 — линза на подвижном креплении, 9 — зеркало, 10 — пластина для регистрации границы свет-тень, 11 — исследуемая среда

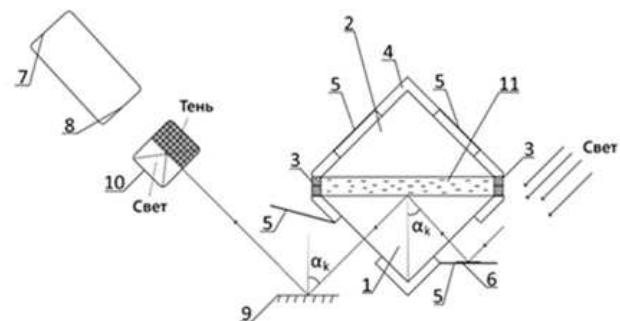


Рис. 2. Структурная схема рефрактометра: 1 — нижняя треугольная призма, 2 — верхняя треугольная призма, 3 — силиконовые прокладки, 4 — поворотное крепление призм, 5 — закрывающая заслонка, 6 — зеркало, 7 — окуляр, 8 — линза на подвижном креплении, 9 — зеркало, 10 — пластина для регистрации границы свет-тень, 11 — исследуемая среда

На исследуемую смесь, размещенную между двумя призмами, направляется луч света, который падает на измерительную призму 1 или 2. На пластинке 10 по причине явления полного внутреннего отражения формируется граница свет-тень. Положение границы определяется критическим углом падения света

Таблица 1. Значения плотности топлива при температуре $T = 288$ К

| Вид топлива | Ср. значение плотности (уд. веса), кг/л | Вид топлива | Ср. значение плотности (уд. веса), кг/л |
|-----------------------------------|---|-----------------------------|---|
| Сжиженный газ | 0,530 | Авиационный керосин TS2 | 0.778 |
| А-76 НЭ (неэтилированный) | 0.725 | АИ-98 НЭ | 0.780 |
| Нормаль 80 НЭ | 0.730 | Авиационный керосин TS | 0.780 |
| АИ-93 НЭ | 0.745 | Керосин | 0.810 |
| АИ-95 НЭ | 0.750 | Топливо Т1 | 0.819 |
| Прямоугольный авиационный керосин | 0.755 | Дизельное топливо | 0.840 |
| АИ-95 Премиум | 0.754-0.758 | Осветительный керосин | 0.840 |
| АИ-92 | 0.760 | Деароматизированный керосин | 0.850 |
| АИ-96 НЭ | 0.770 | Биодизельное топливо | 0.870 |

на грань призмы, которая соприкасается с измеряемой средой. Из значения критического угла и показателя преломления призмы рассчитывается показатель преломления исследуемой среды. Подобные измерения можно провести как для верхней, так и для нижней среды, открывая верхнюю и нижнюю крышку рефрактометра соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ СМЕСЕЙ

В работе в качестве примера приведены результаты по исследованию смеси бензинов АИ-92 и АИ-80 в пропорции 7:3. Это вариант разбавления топлива встречается в Ленинградской области при неправильном хранении и транспортировке. До определенного соотношения между бензинами данную смесь можно использовать для лодочных моторов, бензопил и прочие. При меньшем соотношении между бензинами, например, 9:1 данную смесь можно использовать в дизель-генераторах, а при соотношении 98:2 при одной заправке в автомобилях. Поэтому крайне важно определить кроме компонент бензинов в смеси, также концентрации. На рис. 3 представлены результаты измерения показателя преломления смеси поле перемешивания (встряхиванием).

Измеренное значение $n_m = 1.4121 \pm 0.0002$ (при $T = 300.3$ К). Далее смесь находилась между призмами порядка 4 минут (произошло перераспределение фракций) и были проведены измерения показателей преломления на верхнем и нижнем уровне.

По результатам измерения получены следующие значения:

$n_1 = 1.4235 \pm 0.0002$ (при $T = 300.3$ К) для Аи-92.
 $n_2 = 1.3850 \pm 0.0002$ (при $T = 300.3$ К) для Аи-80.

Далее с использованием уравнений (1) и (2) были получены коэффициенты $K_1 = 0.7022$ и $K_2 = 0.2978$. Сравнение результатов показало, что концентрации

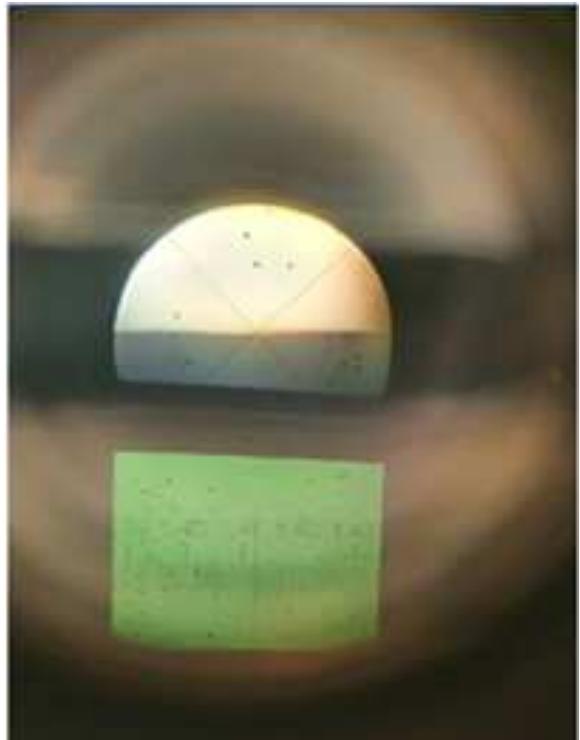


Рис. 3. Граница свет–тень от смеси и данные со шкалой рефрактометра

установленных компонент при измерениях совпадают в пределах погрешности измерения с данными при приготовлении исследуемых смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований показал адекватность разработанного нами метода для определения состояния углеводородных сред при экспресс-контроле, а также состава двухкомпонентных



Рис. 4. Граница свет–тень и данные со шкалы рефрактометра от нижнего слоя смеси

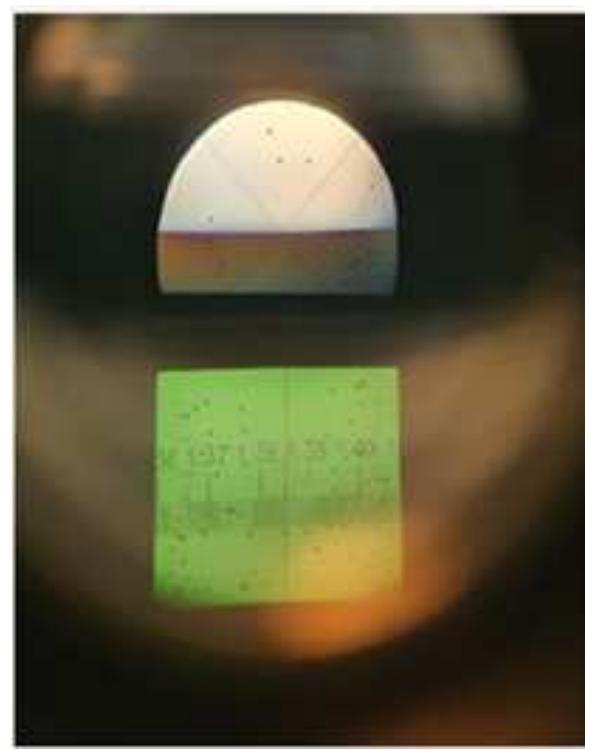


Рис. 5. Граница свет–тень и данные со шкалы рефрактометра от верхнего слоя смеси

смесей и их концентрации. За время измерения порядка 4–5 минут температура исследуемой среды изменяется не значительно, что не вносит существенную погрешность в результаты измерения показателей преломления. Предложенный метод и разработанная конструкция позволяет определять состав смеси в соотношении 98:2. При таком соотношении октановое число смеси топлива (бензины) изменяется незначительно и это не влияет на работу двигателя. Такое соотношение нужно знать только для топлива для болидов. Если увеличить время между измерениями до 10 минут, то можно установить наличие другого углеводорода в базовом углеводороде (по топливу) в соотноше-

нии 99:1. Другие соотношения между компонентами 99.5:0.5 в смесях углеводородных сред для практического использования мало интересны.

Необходимо отметить, что качество топлива при смеси двух сред в концентрации 98:2 проверить измерителем октанового числа сложно, так как погрешность измерения у этого прибора 2% и более.

Разработанная конструкция малогабаритного рефрактометра позволяет проводить измерения значений n_m в видимом свете с погрешностью ± 0.0002 . Данное значение удовлетворяет требованиям экспресс-контроля.

-
- [1] *Ocampo Battle E.A., Escobar Palacio J.C., Silva Lora E.E. et al.* // *J. of Cleaner Production.* **311**. 127638 (2021).
- [2] *Davydov V.V.* // *Measurement Techniques.* **62**. N.2. 1090 (2020).
- [3] *Kuzmin M.S., Rogov S.A.* // *Computer Optics.* **43**. N.3. 391 (2019).
- [4] *Myazin N.S., Smirnov K.J., Logunov S.J.* // *Journal of Physics: Conference Series.* **929**, № 1. 012080. (2017).
- [5] *Bocian P., Biernat K., Matuszewska A. et al.* // *Fuel.* **288**. 119620 (2021).
- [6] *Zverev D.G., Lukin S.N., Rodionov A.A. et al.* // *Magnetic Resonance in Solids.* **23**. 21201. (2021).
- [7] *Давыдов В.В., Мязин Н.С., Давыдов Р.В.* // *Измерительная техника.* № 6. 52 (2022).
- [8] *Davydov V.V., Dudkin V.I., Vysoczky M.G.* // *Applied Magnetic Resonance* **51**(7). 653 (2020).
- [9] *Кашаев Р.С., Сунцов И.А., Тунг Ч.В. et al.* // *Журнал прикладной спектроскопии.* **86**. № 2. 277 (2019).
- [10] *Liu I.-C., Chen P.-C., Chau L.-K., Chang G.-E.* // *Optics Express.* **26**(1). 273 (2018).
- [11] *Provodin D.S., Borodaenko V.I.* // *Proceeding of VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT).* Samara, Russian Federation. 2022. 21992029, P. 217.
- [12] *Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina*

- S.N. // Computer Optics. **44**, N 3. 295 (2020).
- [13] Каракин В.И., Кашиев Р.С., Козелков О.В. // Journal of Advanced Research in Technical Science. N 31. 36 (2022).
- [14] Davydov V.V., Provodin D.S., Gol'dberg A.A., Kochetkov I.D. // Computer Optics. **48**, N 2. 217 (2024).
- [15] Wang S., Liu S., Ni W. et al. // Optics Express. **25**, N 13. 14389 (2017).
- [16] Niskanen I., Räty J., Peiponen K.-E. // Applied Spectroscopy. **71**, N 7. 1586 (2017).
- [17] Karabegov M.A. // Measurement Techniques. **47**, N 11. 1106 (2004).
- [18] Grebenikova N.M., Davydov R.V., Rud V.Yu. // Journal of Physics: Conference Series. **1326**, N 1. 012012 (2019).

A new technique for controlling scaled iscretenes in a differential mobil refractometer

D.A. Belyaev^{1,a}, V.V.Davydov^{1,2}

¹St.Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruevich, Faculty of Information and Communication Networks and Systems, Department of Photonics and Communication Lines
St. Petersburg, 193232, Russia

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
St.Petersburg, 195251, Russia
E-mail: ^aadbelyaev05@gmail.com

The necessity of developing a small-sized mobile refractometer for express control of the state of hydrocarbon media and a new method for determining their composition and concentration of components in case the medium is a mixture of two hydrocarbon media is substantiated. This method will allow for comprehensive control of hydrocarbon media at the sampling site and making an informed decision on their intended use without additional studies in a stationary laboratory. This will save time and resources when solving many problems related to the use of fuel (for example, for mobile objects, etc.). The new method is characterized by the speed of measurements and does not require special sample preparation. The error in measuring the refractive index is ± 0.0002 , which is sufficient for reliable express control. The studies of hydrocarbon media and their mixtures confirmed the adequacy of the development and the reliability of determining the composition of the hydrocarbon mixture and the concentration of components.

PACS: 78.47.+p

Keywords: refraction, refractive index, hydrocarbons, visible light, wavelength, total internal reflection, wavelength, concentration.

Received 13 June 2025.

Сведения об авторах

- Беляев Александр Дмитриевич — студент; e-mail: adbelyaev05@gmail.com.
- Давыдов Вадим Владимирович — профессор СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича, e-mail:davydov_vadom66@mail.ru.