

Особенности контроля состояния вязких сред методом рефракции

В.А. Бажанова,^{1*} В.В. Давыдов^{1,2,3†}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251 Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
Россия, 193232, Санкт-Петербург

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии. Россия, 143050,
Московская область, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, вл. 5
(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 08.07.2023)

Обоснована необходимость контроля жидких сред с использованием рефрактометра. Предложена методика контроля жидких сред, включая смеси, с использованием рефрактометрических измерений. Составлена система уравнений для определения состава среды, которая состоит из компонент, не вступивших между собой в химическую реакцию. Представлены результаты экспериментальных исследований.

PACS: 07.60.Nv

УДК: 535.8

Ключевые слова: жидкость, рефракция, показатель преломления, концентрация, граница свет-тень, контроль состояния среды.

ВВЕДЕНИЕ

Человек, который заботится о своем здоровье [1–3] постоянно задумывается о том, какие продукты он употребляет в пищу, и как это может влиять на его здоровье. Для этого многие проводят экспресс-контроль состояния своего здоровья [4, 5]. В рационе человека очень популярны блюда, требующие жарки на растительном масле или блюда, требующие заправки этим же маслом (например, салаты из овощей). Благодаря содержанию витамина Е и ненасыщенных жирных кислот растительное масло полезно для профилактики атеросклероза, инфаркта миокарда и других сердечно-сосудистых заболеваний. Повышение цен на все виды услуг и товаров привело к тому, что качество масла ухудшается по различным причинам. Сокращается количество циклов очистки масла, в подсолнечное масло добавляют менее ценные сорта масла (соевое, хлопковое, рапсовое и прочие), смешивают рафинированное и нерафинированное масло и многое другое.

Определить подмену в таких смесях с использованием приборов для экспресс-контроля крайне сложно. Это реализуют с использованием химических методов или спектрометров высокого разрешения [6–8, 11]. Данный контроль возможен только в стационарной лаборатории. Разработанные рентгеновские приборы для экспресс-контроля не удовлетворяют условиям решения данной задачи, так как при исследованиях не должны происходить изменения в химическом составе и физической структуре исследуемой пробы. Данная проба в случае выявленного отклонения должна быть в дальнейшем исследована в стационарной лаборатории для получения подтверждения. Особенно это относится к случаю смешивания рафинированного и нера-

финированного масла. Нерафинированное масло содержит фосфатиды, жирорастворимые витамины (А, Е, К), воски, каротин, ароматические вещества и другие соединения. Нерафинированное масло не может долго храниться, быстро мутнеет и не подходит для жарения в отличие от рафинированного. Использование такой смеси может привести к большому вреду для здоровья человека.

В настоящее время для экспресс-контроля различных жидких сред разработано большое число малогабаритных и мобильных рефрактометров различных типов с погрешностью измерения показателя преломления n до 0.00005 [12–16]. Эти приборы работают на явлении полного внутреннего отражения (ПВО) и при измерении в их конструкции не учитывается ряд особенностей. Эти особенности возникают как при проведении измерений n , так и при определении состава смеси. Особенно это относится к исследованию различных масел. Поэтому целью работы является установление этих особенностей для пищевых масел и дополнение методики контроля смесей из пищевых масел новыми соотношениями для однозначного определения состава смеси из двух компонент.

1. ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СМЕСИ ИЗ ПИЩЕВЫХ МАСЕЛ

При экспресс-контроле пищевого масла важно учесть одну из особенностей — рафинированность или нерафинированность масла. Это позволит в дальнейшем правильно обработать полученные результаты для определения состава смеси из двух масел и их концентрации. Для этого, в месте взятия пробы необходимо определить данное состояние масла с использованием рефракции. Предполагаем, что мы не знаем сорт исследуемого масла, кроме того что оно пищевое. Была разработана методика, которая позволяет определить рафинированность масла с использованием двух изме-

* veronika.bazhanova.2003@mail.ru

† davydov_vadim66@mail.ru

рений положения границы свет-тьнь по ПВО и нарушенному ПВО. Измерения по определению положения границы свет-тьнь по нарушенному ПВО в промышленных конструкциях рефрактометров для экспресс-контроля реализовать невозможно. Поэтому необходимо будет использовать другую конструкцию рефрактометра. Нерафинированное масло содержит в составе различные компоненты и красящие вещества. Из-за наличия в составе этих компонентов граница свет-тьнь по нарушенному ПВО будет существенно отличаться от границы свет-тьнь для ПВО. В смеси рафинированного и нерафинированного масла разница в структуре границ свет-тьнь будет зависеть от соотношения между концентрациями этих масел в исследуемой смеси.

Если нерафинированное масло просрочено, то на дне емкости образуется мутный осадок. Чтобы не изменить цвет масла, обычно сливаю верхний прозрачный слой и добавляю его в рафинированное или нерафинированное масло. В просроченном нерафинированном масле в осадок выпадают тяжелые компоненты и красящие вещества. Воски остаются в верхнем слое масла. Показатель преломления воска n_w колеблется от 1.4445 до 1.4473. У исходного подсолнечного масла показатель преломления выше (порядка 1.46–1.47 в зависимости от региона производства). Верхний слой масла просроченного нерафинированного масла будет обладать меньшим показателем преломления чем исходное просроченное масло за счет наличия воска. Поскольку размер молекулы воска в масле очень мал, рассеивания света на $\lambda = 589.3$ нм не будет [17]. Необходим другой способ определения рафинированности масла и наличия компонент в исследуемой смеси. Это предлагается реализовать с использованием уравнения масс, так как изменяется плотность масла ρ при выпадении части элементов в осадок. Также плотность масла зависит от степени его очистки. Для различных сортов масла значение ρ отличаются. Кроме того, значение ρ зависит от температуры T . В этом случае для исследования смесей масла можно использовать систему из двух уравнений (1): уравнения рефракции и уравнения масс.

$$\begin{cases} k_1 n_1 + k_2 n_2 = n_{12}, \\ V(k_1 \rho_1 + k_2 \rho_2) = m_{12}. \end{cases} \quad (1)$$

где n_{12} — показатель преломления смеси масел, n_1 и n_2 — показатели преломления масел, измеренные заранее, k_1 and k_2 — коэффициенты, которые показывают, в каком отношении смешаны масла в исследуемой смеси (для процентного соотношения коэффициенты домножаются на 100), ρ_1 и ρ_2 — значения плотностей масел (с учётом температуры), m_{12} — масса исследуемой смеси, V — объём исследуемой смеси, из которого было получено значение m_{12} .

Решив систему уравнений (1), можно однозначно определить состав смеси из двух пищевых масел и концентрации компонент в ней.

2. КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РЕФРАКТОМЕТРА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации разработанной нами методики исследования смесей из пищевых масел была разработана новая оптическая конструкция мобильного рефрактометра. Особенность конструкции заключается в наличии дополнительных систем для поступления света на грани призмы, которые соприкасаются с исследуемой средой. Это позволяет проводить измерения показателя преломления n , как при дневном, так и при искусственном свете. Также преимуществом прибора является отсутствие питания от сети, что позволяет исследовать большое число вязких сред. На рис. 1 представлена модернизированная оптическая конструкция рефрактометра, позволяющая проводить измерения показателя преломления конденсированной среды с использованием верхней и нижней призмы.

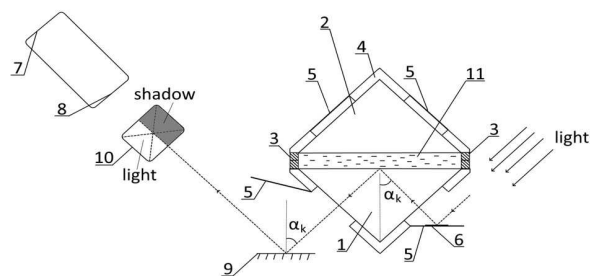


Рис. 1. Схема оптической части рефрактометра и прохождения света через нижнюю призму: 1 — нижняя треугольная призма (из лейкосапфира), 2 — верхняя треугольная призма (из лейкосапфира), 3 — силиконовые прокладки, 4 — шарнир призмы, 5 — подвижная крышка, 6 — зеркало, 7 — окуляр, 8 — объектив на подвижном креплении, 9 — зеркало, 10 — пластина с сеткой в форме перекрестия, 11 — исследуемая среда

На рис. 1 представлен случай измерения значения n_{12} с использованием явления ПВО. Для реализации измерений значения n_{12} с использованием явления нарушенного ПВО крышка 5 с зеркалом 6 закрывается (свет прекращает поступать на призму 1). Открывается крышка 5 без зеркала и свет поступает на верхнюю призму 2. И также по границе свет-тьнь измеряется показатель преломления и фиксируются изменения в структуре границы свет-тьнь.

Для подтверждения разработанных нами методик были проведены исследования смесей из различных масел. На рис. 2 представлены результаты измерения показателя преломления n_{12} смеси из рафинированного и нерафинированного масел.

Анализ данных на рис. 2 показывает, что граница раздела свет-тьнь, полученная методом НПВО, сильно отличается от границы, полученной методом ПВО. Граница свет-тьнь практически размыта, что говорит

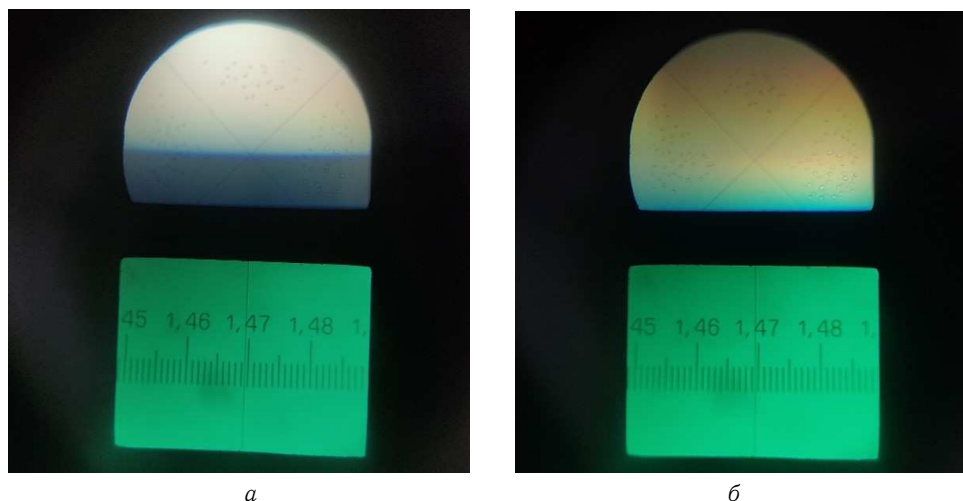


Рис. 2. Измерение показателя преломления n_{12} смеси из рафинированного и нерафинированного масел с использованием метода ПВО (а) и НПВО (б)

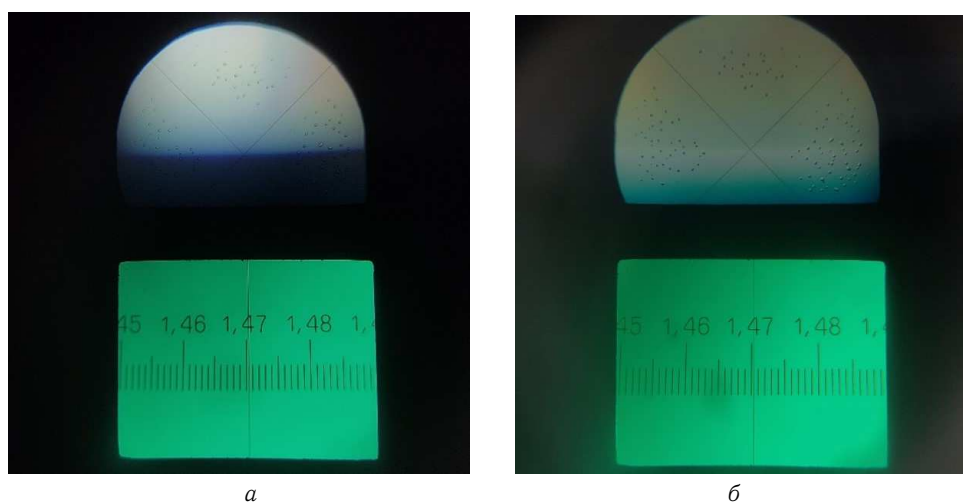


Рис. 3. Измерение показателя преломления рафинированного масла использованием метода ПВО (а) и НПВО (б)

о наличии в смеси компонентов, на молекулах которых происходит рассеивание света, что соответствует нерафинированному маслу.

При исследовании рафинированного масла наблюдается более чёткая граница свет-тьнь (рис. 3)

Для определения концентраций масел в смеси, в систему уравнений (1) были подставлены значения показателей преломления рафинированного и нерафинированного масел n_1 и n_2 , измеренные ранее. Также в эту систему уравнений были подставлены значения плотностей каждого масла ρ_1 и ρ_2 . Взвесив пробу, в которой были смешаны рафинированное и нерафинированное масла в соотношении 10 мл : 10 мл ($V = 20$ мл), можно получить значение m_{12} , которое также подставляется в систему (1):

$$\begin{cases} k_1 \cdot 1.4703 + k_2 = 1.4695 \\ 2 \cdot 10^{-5} (k_1 \cdot 800 + k_2 \cdot 890) = 16.9 \cdot 10^{-3}. \end{cases} \quad (2)$$

Решениями данной системы уравнений являются искомые значения концентраций масел $k_1 = 0.503$ и $k_2 = 0.507$. Полученные значения соответствуют пропорциям, в которых были смешаны рафинированное и нерафинированное масла в пределах погрешности измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показывает адекватность разработанной нами методики для экспресс-контроля. Полученные в результате исследования дан-

ные о составе масел и концентраций в них компонент совпадают с типами масел и их концентрациями, которые были использованы для приготовления исследуемых сред.

Еще одной особенностью данного метода является зависимость разрешающей способности определения отклонения в смеси масел по границе свет-тень от мощности (или интенсивности) источника света. Этот фактор также связан с концентрациями масел в смеси и требует отдельных исследований.

Проведенные эксперименты показали, что модернизированная конструкция рефрактометра может также быть использована для контроля состояния других сред. Возможно её также можно будет использовать для контроля их смесей при условии, если данные среды не вступили между собой в химическую реакцию. Дополнительный интерес представляют жидкие среды, в которых осуществляется процесс обезжиривания. Это также будет предметом наших следующих исследований.

- [1] Naumova V., Kurkova A., Zaitceva A., Davydov R. // IEEE Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech-2022). **9950822**. 151. (2022).
- [2] Yakusheva M.A., Davydov R.V., Isakova D.D. // IEEE Proceedings 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022). **9848533**. 145. (2022).
- [3] Marusina M.Ya., Karaseva E.A. // Russian Electronic Journal of Radiology. **8**, N 3. 107. (2018).
- [4] Mazing M.S., Zaitceva A.Yu., Kislyakov Yu.Ya. et al. // International Journal of Pharmaceutical Research. **12**, N 2. 1974. (2020).
- [5] Mazing M.S., Zaitceva A.Y., Davydov R.V. // J. of Physics: Conference Series. **2086**, N 1. 012116. (2021).
- [6] Davydov V.V., Moroz A.V., Myazin N.S. et al. // Optics and Spectroscopy. **128**, N 10. 1678. (2020).
- [7] Vakhin A.V., Khelkhal M.A., Mukhamatdinov I.I. et al. // Catalysts. **12**, N 5. 514. (2022).
- [8] Davydov V.V., Dudkin V.I., Grebenikova N.M. // Technical Physics. **63**, N 12. 1845. (2018).
- [9] Sadovnikova M.A., Murzakhanov F.F., Mamin G.V. // Energies. **15**, N 17. 6204. (2022).
- [10] Kashaev R.S., Kien N.C., Tung T.V., Kozelkov O.V. // J. of Appl. Spectr. **86**, N 5. 890. (2019).
- [11] Irfan M., Khan Y., Khonina S.N., Kazanskiy N.J. // Sensors. **22**, N 20. 7790. (2020).
- [12] Karabegov M. A. // Measurement Techniques. **52**, N 1. 97. (2009).
- [13] Karabegov M.A. // Measurement Techniques. **54**, N 10. 1203. (2012).
- [14] Provodin D.S., Davydov V.V. // St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. **15**, N 3.2. 124. (2022).
- [15] Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N. // Computer Optics. **44**, N 3. 295. (2020).
- [16] Chen J., Guo W., Xia M. et al. // Optics Express. **26**, N 20. 25510. (2018).
- [17] Davydov V.V., Kruzhalov S.V., Grebenikova N.M., Smirnov K.J. // Measurement Techniques. **61**, N 4. 365. (2018).

Features a control the state of viscous media by refraction

V.A. Bazhanova^{1,a}, V.V. Davydov^{1,2,3,b}

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

²The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. St.Petersburg, 195251, Russia

³All-Russian Research Institute of Phytopathology. Moscow region, 143050, Russia

E-mail: ^avieronika.bazhanova.2003@mail.ru, ^bdavydov_vadim66@mail.ru

The article grounds a necessity of liquid media control using refractometer. A method for monitoring liquid media, including mixtures, using refractometric measurements is proposed. A system of equations has been developed to determine the composition of the medium, which consists of components that have not reacted chemically. The results of experimental studies are presented.

PACS: 07.60.Hv.

Keywords: liquid, refraction, refractive index, concentration, light-shadow boundary, control of the state of the medium.

Received 30 May 2023.

Сведения об авторах

1. Бажанова Вероника Александровна — студентка; e-mail: vieronika.bazhanova.2003@mail.ru.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.