

Особенности экспресс-контроля трехкомпонентной смеси из летучих углеводородных сред в видимом диапазоне лазерного излучения

Г.В. Степаненков,^{*} Д.В. Вакорина,[†] Д.Д. Цыганова[‡]

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора 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 03.10.2024)*

Рассмотрены проблемы, которые возникают при экспресс-контроле углеводородных сред и их смесей в том случае, если смесь состоит из трех компонент. Для решения проблемы определения состава смеси и концентрации компонент, из которых она состоит, была разработана новая методика с использованием измерений показателя преломления n на трех длинах волн. Для реализации методики предложена система уравнений, в которой учтены особенности проводимых измерений с использованием трех длин волн. Для проверки адекватности использования системы уравнений были проведены исследования изменения показателя преломления в смеси углеводородных сред от изменений её состава и концентрации компонент на различных длинах волн. Определены особенности проведения данных исследований и представлены результаты, а также выполнен расчёт концентраций для изготовленных углеводородных смесей. Полученные результаты подтвердили обоснованность использования разработанной системы уравнений в новой методике определения состава и концентрации компонент смеси трех углеводородных сред.

PACS: 78.47.+p

УДК: 53.082.539

Ключевые слова: углеводородная среда, смесь углеводородных сред, экспресс-контроль, полное внутреннее отражение, показатель преломления, лазерное излучение, длина волны, концентрация, погрешность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений в области рационального использования энергетических ресурсов и сохранения окружающей среды являются разработки быстрых и надежных методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред [1–4]. Для решения различных задач экспресс-контроля используются два типа приборов: малогабаритные и мобильные. В последние годы к приборам и методам экспресс-контроля стали предъявлять ряд достаточно жестких требований. Основное из них обусловлено тем, что измерения различных параметров среды не должны вносить в неё необратимых изменений [2, 4–7]. Это связано с тем, что для ряда жидких сред (например, кислоты, хлорбензол и прочие), медицинских суспензий или биологических растворов, различных типов топлива и т.д. в случае выявления отклонения необходимо получить подтверждение результатов экспресс-контроля на приборах высокого разрешения в специальной лаборатории. Кроме того, используемые в экспресс-контроле методы должны быть применимы для исследования большого числа сред (прибор для экспресс-контроля должен быть многофункциональным). Погрешность измерения различных физических параметров при экспресс-контроле должна быть менее 0.5% [4–8]. В настоящее время данным требованиям для экспресс-контроля удовлетворяют только два

метода: ядерный магнитный резонанс и метод рефракции [5, 6, 8–11]. Другие различные методы, в том числе и оптические, используются при экспресс-контроле для проверки ограниченного числа конденсированных сред.

Рефрактометры обладают неоспоримым преимуществом перед малогабаритными и мобильными ЯМР спектрометрами и релаксометрами по размеру, массе и стоимости [8–14]. Поэтому этим приборам отдают наибольшее предпочтение при проведении экспресс-контроля состояния различных конденсированных сред. Одним из наиболее сложных направлений в экспресс-контроле является работа с углеводородными средами и их смесями, так как кроме определения состояния среды, требуется информация о составе её компонент и их концентрациях (это в первую очередь относится к различным типам топлива и моторным маслам) [8, 11, 12, 15]. Для решения задач по определению состава и концентрации компонент углеводородных сред были разработаны различные методы [9, 14–18], в том числе для проведения экспресс-контроля. Опыт эксплуатации разработанного нами лабораторного макета мобильного рефрактометра для экспресс-контроля с использованием видимого света [8, 15, 19] показал ряд проблем, которые возникают при измерениях, связанных с применением уравнения масс [8, 15, 19, 20] в полевых условиях. В этом случае для измерений требуется большое количество мерных пробирок по 10 мл, так как пробирки можно использовать лишь один раз (дальше их требуется мыть специальными средствами в лаборатории). Кроме того, использование дополнительных приборов, таких как весы или плотномер, затрудняет процесс экспресс-контроля в полевых условиях и вносит

* 261199g@gmail.com

† cementary.ley@gmail.com

‡ diana.diana.tsyanova@mail.ru

дополнительные погрешности при определении концентрации компонент сред, из которых состоит исследуемая смесь. Поэтому нами предлагается новая методика определения состава и концентрации компонент смеси, состоящей из трех углеводородных сред, что при контроле топлива возникает довольно часто по различным причинам [5, 8, 11, 15, 19–21]. В этой методике предлагается использовать измерения показателей преломления на трех длинах волн, а также новые уравнения для определения компонент смеси и их концентрацию. При проведении исследований могут возникнуть ряд особенностей, которые необходимо будет установить, чтобы обеспечить при измерениях погрешность при определении концентраций компонент не выше 0.5%, что соответствует требованиям экспресс-контроля. Решение этой комплексной задачи и будет целью нашего исследования, результаты которого представляются в данной работе.

1. НОВАЯ МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ СОСТАВА СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД, СОСТОЯЩИХ ИЗ ТРЕХ КОМПОНЕНТ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая установленные нами ранее сложности в проведении измерений была предложена следующая новая методика для определения состава смеси из трех углеводородных сред и концентраций их компонент. Для её реализации предлагается использовать три длины волны лазерного излучения. Особенностью измерений в данном случае является выбор длин волн из видимого диапазона. Измерения показателя преломления можно проводить на любой длине волны лазерного излучения. Но при экспресс-контроле важно пользователю быть уверенным в работоспособности рефрактометра (попадает лазерное излучение на призму или нет). Это предпочтительнее делать в видимом диапазоне лазерного излучения.

Исходя из этого и были выбраны три длины волны лазерного излучения $\lambda_1 = 436.4$ нм, $\lambda_2 = 589.3$ нм и $\lambda_3 = 657.2$ нм. Выбор желтой линии излучения оправдан тем, что все эталонные измерения проводятся для $\lambda_2 = 589.3$ нм. В углеводородах наименьшее поглощение лазерного излучения смещается к ИК диапазону, поэтому выбирается $\lambda_3 = 657.2$ нм. Выбор длины волны $\lambda_1 = 436.4$ нм, можно обосновать тем, что при оптических измерениях (не обязательно в рефрактометрии, например с использованием волокон) рекомендуется чтобы между длинами волн была разница в 100 нм, так как возможна передача сигнала по ВОЛС. Технология изготовления полупроводниковых лазеров на $\lambda_1 = 436.4$ нм хорошо отработана, поэтому был выбран этот источник излучения.

Далее для реализации процесса определения компонент смеси с использованием измерений на трех длинах волн составляется следующая система уравнений, в которой изменения показателя преломления n будут

зависеть от длины волны.

$$\begin{aligned} n_m(\lambda_1) &= K_1 n_1(\lambda_1) + K_2 n_2(\lambda_1) + K_3 n_3(\lambda_1), \\ n_m(\lambda_2) &= K_1 n_1(\lambda_2) + K_2 n_2(\lambda_2) + K_3 n_3(\lambda_2), \\ n_m(\lambda_3) &= K_1 n_1(\lambda_3) + K_2 n_2(\lambda_3) + K_3 n_3(\lambda_3), \end{aligned} \quad (1)$$
$$K_1 + K_2 + K_3 = 1,$$

где $n_{1,2,3}$ — показатели преломления компонент исследуемой смеси.

Система уравнений (1) описывает зависимость показателя преломления n_m смеси на разных длинах волн от показателей преломления $n_{1,2,3}$ различных компонент этой смеси на этих же длинах волн.

Необходимо отметить, что особенность проведения данных измерений n_m и реализацией методики определения состава смеси и концентраций компонент (коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 в (1)) при изменении длины волны не изменяются, также они не изменяются при изменениях температуры смеси T , так как углеводородные среды не вступают между собой в химическую реакцию. Это позволяет использовать разработанную методику для различных значений T , что соответствует требованиям экспресс-контроля.

Измерения проводятся на многоволновом рефрактометре Anton Paar Abbemat MW (рис. 1)



Рис. 1. Многоволновой рефрактометр Anton Paar Abbemat MW

Перед началом измерений необходимо измерить каждый из существующих видов топлива на разных длинах волн. Это понадобится для последующей подстановки данных значений в качестве $n_{1,2,3}$. При этом мы учитываем, что заранее известно, какие именно компоненты входят в смесь, для того чтобы определить их концентрацию. В качестве исследуемых образцов были взяты следующие виды топлива:

1. Аи-92;
2. Аи-92, хранившийся в условиях, приводящим к снижению октанового числа (Аи-92 ст.);
3. Аи-95;
4. Аи-95+;
5. Аи-95, хранившийся в условиях, приводящим к снижению октанового числа (Аи-95 ст.);
6. Аи-98;
7. Аи-100.

Результаты измерений при разных температурах представлены в табл. 1–7.

Таблица 1. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-92

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.42822	1.41612	1.41343
10	1.43393	1.42166	1.41891
14	1.43178	1.41956	1.41684
18	1.42965	1.41747	1.41479
22	1.42755	1.41543	1.41270
26	1.42531	1.41328	1.41059
30	1.42310	1.41111	1.40845
34	1.42108	1.40915	1.40652
38	1.41918	1.40724	1.40463
42	1.41747	1.40571	1.40301

Таблица 2. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-92 ст.

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.43374	1.42148	1.41872
10	1.43937	1.42693	1.42416
14	1.43712	1.42474	1.42199
18	1.43490	1.42258	1.41985
22	1.43269	1.42045	1.41773
26	1.43052	1.41833	1.41562
30	1.42837	1.41622	1.41355
34	1.42633	1.41424	1.41157
38	1.42434	1.41228	1.40963
42	1.42254	1.41050	1.40791

Таблица 3. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-95

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.43575	1.42292	1.42005
10	1.44161	1.42861	1.42569
14	1.43920	1.42630	1.42347
18	1.43709	1.42421	1.42136
22	1.43494	1.42214	1.41929
26	1.43277	1.42001	1.41721
30	1.43073	1.41804	1.41522
34	1.42883	1.41618	1.41333
38	1.42711	1.41448	1.41184
42	1.42606	1.41330	1.41053

Таблица 4. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-95+

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.43473	1.42202	1.41917
10	1.44046	1.42757	1.42469
14	1.43829	1.42545	1.42263
18	1.43605	1.42326	1.42045
22	1.43379	1.42109	1.41828
26	1.43170	1.41905	1.41623
30	1.42954	1.41694	1.41416
34	1.42749	1.41494	1.41219
38	1.42556	1.41305	1.41033
42	1.42376	1.41120	1.40862

Таблица 5. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-95 ст.

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.433251	1.420808	1.418015
10	1.438891	1.426273	1.423472
14	1.436702	1.424136	1.421345
18	1.434496	1.422000	1.419201
22	1.432227	1.419796	1.417041
26	1.430047	1.417669	1.414942
30	1.427942	1.415632	1.412876
34	1.425836	1.413613	1.410865
38	1.424089	1.411801	1.409072
42	1.422163	1.409945	1.407289

Таблица 6. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-98

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.43264	1.42007	1.41724
10	1.44479	1.43131	1.42841
14	1.44109	1.42796	1.42517
18	1.43831	1.42539	1.42247
22	1.43617	1.42324	1.42038
26	1.43414	1.42126	1.41842
30	1.43203	1.41922	1.41638
34	1.43009	1.41733	1.41448
38	1.42825	1.41552	1.41271
42	1.42653	1.41378	1.41104

Таблица 7. Изменения значения показателя преломления n бензина Аи-100

$T, ^\circ\text{ircC}$	n , отн. ед.		
	λ , нм		
	436.4	589.3	657.2
20	1.43011	1.41791	1.41521
10	1.43594	1.42362	1.42084
14	1.43382	1.42152	1.41876
18	1.43164	1.41940	1.41667
22	1.42949	1.41730	1.41458
26	1.42725	1.41514	1.41244
30	1.42513	1.41306	1.41039
34	1.42309	1.41106	1.40840
38	1.42125	1.40929	1.40662
42	1.41958	1.40761	1.40497

2. ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СМЕСЕЙ

Для первоначальной проверки разработанной методики были искусственно созданы 6 образцов трехкомпонентных смесей из различных компонент:

1. Аи-95, Аи-95 ст., Аи-92 в соотношении 60/20/20;
2. Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 80/10/10;

3. Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 60/20/20;
4. Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 70/20/10;
5. Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 80/10/10;
6. Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 60/20/20;

Измерения смесей проводились при всех тех же температурах, что и отдельно образцы каждого из видов топлива, однако для проверки достаточно будет использовать только значение n_m , полученное при $T = 20^\circ\text{C}$. Это как мы отмечали не изменит принципов экспресс-контроля с использованием разработанной нами методики. Данные представлены в табл. 8.

Таблица 8. Значения показателя преломления n_m бензина смесей из трех компонентов при $T = 20^\circ\text{C}$

Исследуемая среда / λ , нм	436.4	589.3	657.2
Аи-95, Аи-95 ст., Аи-92 в соотношении 60/20/20	1.43476	1.42211	1.41927
Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 80/10/10	1.43359	1.42093	1.41813
Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 60/20/20	1.436187	1.423314	1.420546
Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 70/20/10	1.43306	1.42063	1.41781
Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 80/10/10	1.43074	1.41844	1.41577
Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 60/20/20	1.436098	1.423403	1.420525

3. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИКИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее, с помощью ПО MathCad были произведены подстановки $n_{1,2,3}$ в (1) с известными K_1, K_2, K_3 из табл. 4–10. Получившиеся значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-95, Аи-95 ст., Аи-92 в соотношении 60/20/20 следующие:

$$\begin{aligned}
 K_1(-92) &= 0.2; ; K_2(-95) = 0.6; ; K_3(-95) = 0.2, \\
 \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.42822 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.433251 = 1.4337442, \\
 \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41612 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.420808 = 1.4211376, \\
 \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41343 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.418319.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 80/10/10 следующие:

$$\begin{aligned} K_1(-92) &= 0.1; ; K_2(-95) = 0.1; ; K_3(-98) = 0.8, \\ \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.42822 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.43264 = 1.432509, \\ \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41612 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.42007 = 1.41996, \\ \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41343 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.41714. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 60/20/20 следующие:

$$\begin{aligned} K_1(-92) &= 0.2; ; K_2(-95) = 0.2; ; K_3(-98) = 0.6, \\ \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.42822 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.43264 = 1.432378, \\ \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41612 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.42007 = 1.41985, \\ \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41343 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.41704. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 70/20/10 следующие:

$$\begin{aligned} K_1(-100) &= 0.7; ; K_2(-95) = 0.1; ; K_3(-98) = 0.2, \\ \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.43011 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.43264 = 1.43118, \\ \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41791 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.42007 = 1.418843, \\ \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41521 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.4161. \end{aligned} \quad (5)$$

Значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 80/10/10 следующие:

$$\begin{aligned} K_1(-100) &= 0.8; ; K_2(-95) = 0.1; ; K_3(-98) = 0.1, \\ \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.43011 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.43264 = 1.430927, \\ \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41791 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.42007 = 1.418627, \\ \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41521 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.415897. \end{aligned} \quad (6)$$

Значения n_m из системы уравнений рефракции для Аи-100, Аи-98, Аи-95 в соотношении 60/20/20 следующие:

$$\begin{aligned} K_1(-100) &= 0.6; ; K_2(-95) = 0.2; ; K_3(-98) = 0.2, \\ \lambda_1 &: K_1 \cdot 1.43011 + K_2 \cdot 1.43575 + K_3 \cdot 1.43264 = 1.431744, \\ \lambda_2 &: K_1 \cdot 1.41791 + K_2 \cdot 1.42292 + K_3 \cdot 1.42007 = 1.419344, \\ \lambda_3 &: K_1 \cdot 1.41521 + K_2 \cdot 1.42005 + K_3 \cdot 1.418015 = 1.416584. \end{aligned} \quad (7)$$

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал адекватность разработанной нами методики для определения при экспресс-контроле состава трехкомпонентных смесей углеводородных сред и их концентрации с погрешностью менее 0.5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренных случаях (они представлены в уравнениях (2)–(7)) Δn_m между измеренными значениями и значениями из системы уравнений рефракции составляет менее ± 0.001 , что обеспечивает погрешность определения коэффициентов K_n менее 0.5%. В случае с ситуацией, возникающей при Δn_m большей, чем ± 0.001 , требуется проводить дополнительные исследования. Так например, при измерении смеси Аи-98, Аи-95, Аи-92 в соотношении 60/20/20 уже во время проводимых измерений возникло подозрение, что в смесь

попала вода. Задачей последующих исследований можно поставить как решение проблем с герметичностью конструкции рефрактометра, так и проведение ряда дополнительных измерений, что необходимо, в первую очередь, для последующего внедрения предложенной методики в процесс экспресс-контроля на нефтеперерабатывающих предприятиях.

Необходимо отметить, что представленное решение задачи контроля состояния летучих углеводородных сред значительно расширяет возможности экспресс-контроля с использованием явления рефракции. В дальнейшем можно расширить возможности разработанной нами методики по определению состава и концентраций компонент в смесях, состоящих из четырех углеводородных сред, что возникает при использовании автомобильных «танкеров» для перевозки различных типов бензина. Такая задача также возникает в системе небольших аэропортов и аэродромов, где работает один заправщик по причине ограниченности ресурсов.

[1] Davydov V.V. // Measurement Techniques. **62**, N 2. 1090 (2020).

[2] Yushkova V.V., Davydov R.V., Rud V.Y., Switala

- F.* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **940**, N 1. 012045 (2020).
- [3] *Davydov V.V., Myazin N.S., Kiryukhin A.V.* // Atomic Energy. **127**, N 5. 274 (2020).
- [4] *Greitseva A.S., Smirnov K.J., Greshnevich K.V.* et al. // Journal of Physics: Conference Series. **1368**, N 2. 022072 (2018).
- [5] *Kashaev R.S., Kien N.T., Tung C.V., Kozelkov O.V.* // Petroleum Chemistry. **59**. S21 (2019).
- [6] *Davydov V.V., Karseev A.Y., Dudkin V.I.* // Journal of Applied Spectroscopy. **82**, N 5. 794 (2015).
- [7] *Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E.* et al. // Measurement Techniques. **61**, N 3. 297 (2018).
- [8] *Davydov V., Vakorina D., Provodin D.* et al. // Energies. **16**, N 6. 2529 (2023).
- [9] *Grebenikova N.M., Smirnov K.J., Rud V.Yu., Artemiev V.V.* // Journal of Physics: Conference Series. **1135**, N 1. 012055 (2018).
- [10] *Davydov V.V., Davydov R.V., Myazin N.S.* // Measurement Techniques. **65**, N 4. 279 (2022).
- [11] *Kashaev R.S., Kien N.C., Tung T.V., Kozelkov O.V.* // Journal of Applied Spectroscopy. **86**, N 5. 890 (2019).
- [12] *Давыдов В.В., Мороз А.В., Мязин Н.С.* et al. // Оптика и спектроскопия. **128**, № 10. 1554 (2020).
- [13] *Davydov R., Davydov V., Dudkin V.* // Energies. **15**, N 9. 3259 (2022).
- [14] *Karabegov M.A.* // Measurement Techniques. **52**, N 10. 1126 (2009).
- [15] *Давыдов В.В., Вакорина Д.В., Степаненков Г.В.* // Компьютерная оптика. **48**, № 1. 93 (2024).
- [16] *Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N.* // Computer Optics. **44**, N 3. 295 (2020).
- [17] *Contreras-Tello H., Garcna-Valenzuela A.* // Applied Optics. (2014).
- [18] *Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., Смирнов К.Я.* // Измерительная техника. № 6. 37 (2019).
- [19] *Stepanenko G.V., Vakorina D.V., Reznikov B.K.* // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EICon 2024. 773(2024).
- [20] *Степаненков Г.В., Вакорина Д.В.* // Ученые записки физического факультета Московского университета. № 4. 2341104 (2023).
- [21] *Stepanenko G.V., Vakorina D.V., Davydov V.V., Davydov R.V.* // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. **16**, № S3.2. 137 (2023).

Features of express control of three-component mixture of volatile hydrocarbon media in visible range of laser radiation

G.V. Stepanenko^a, D.V. Vakorina^b, D.D. Tsyganova^c

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

E-mail: ^a261199g@gmail.com, ^bcementary.ley@gmail.com, ^cdiana.diana.tsyganova@mail.ru

The problems that arise in the express control of hydrocarbon media and their mixtures in the case when the mixture consists of three components are considered. In order to solve the problem of determining the composition of the mixture and the concentration of its components, a new technique using refractive index n measurements at three wavelengths has been developed. To realise the technique, a system of equations has been proposed, which takes into account the peculiarities of the measurements carried out using three wavelengths. To verify the adequacy of the system of equations, studies of refractive index changes in a mixture of hydrocarbon media from changes in its composition and concentration of components at different wavelengths were carried out. The peculiarities of these studies were determined and the results were presented, and the concentrations for the produced hydrocarbon mixtures were calculated. The obtained results confirmed the validity of using the developed system of equations in the new technique for determining the composition and concentration of the components of the mixture of three hydrocarbon media.

PACS: 78.47.+p

Keywords: hydrocarbon medium, mixture of hydrocarbon media, express control, total internal reflection, refractive index, laser radiation, wavelength, concentration, measurement error.

Received 10 June 2024.

Сведения об авторах

1. Степаненков Григорий Викторович — аспирант; e-mail: 261199g@gmail.com.
2. Вакорина Дарья Владимировна — студентка; e-mail: cementary.ley@gmail.com.
3. Цыганова Диана Денисовна — бакалавр; e-mail: diana.diana.tsyganova@mail.ru.