

Особенности экспресс-контроля летучих углеводородных сред и их смесей в видимом свете

Г.В. Степаненков,* Д.В. Ваколина†

*Санкт-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 14.05.2023; подписана в печать 07.07.2023)*

Рассмотрены проблемы, которые возникают при экспресс-контроле углеводородных сред и их смесей. Особенно отмечены проблемы с контролем летучих углеводородных сред, которые используются в качестве топлива (бензин, керосин, дизельное топливо и т.д.). Определены требования к методам для экспресс-контроля и приборам для их реализации. Рассмотрены особенности контроля летучих углеводородных сред и их смесей с использованием малогабаритных рефрактометров, работающих на эффекте полного внутреннего отражения. Показано, что при использовании этих приборов, получить данные для определения состояния смеси из летучих углеводородных сред, о её составе и о концентрациях компонент невозможно. Разработан новый метод для определения компонент в смеси летучих углеводородных сред и данных о соотношении между концентрациями компонент в ней. Представлена конструкция малогабаритного рефрактометра, который позволяет проводить измерения показателя преломления в видимом свете, для реализации этого метода. Установлены зависимости изменения плотности от температуры T для различных марок бензина для определения состава и концентрации в трехкомпонентной смеси из летучих углеводородных сред. Представлены результаты исследования различных летучих углеводородных сред и их смесей.

PACS: 78.47.+p

УДК: 53.082.539

Ключевые слова: углеводородная среда, смесь, рефракция, экспресс-контроль, показатель преломления, видимый свет, граница свет-тень, концентрация, погрешность измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Сокращение в мире энергетических ресурсов, а также высокие цены на сырьё привели к необходимости бережного их использования [1–8]. Одним из приоритетных направлений в области их рационального использования являются разработки быстрых и надежных методов экспресс-контроля состояния конденсированных сред [4, 5, 7, 9–12]. Необходимо отметить, что экспресс-контроль сейчас востребован во многих областях деятельности человека [12–18]. В последние годы к приборам и методам экспресс-контроля стали предъявлять ряд достаточно жестких требований. Основное из них заключается в том, чтобы измерения различных параметров среды не вносили в неё необратимых изменений [4, 5, 13–21]. Почти для всех жидких сред это необходимо для получения подтверждения результатов экспресс-контроля на приборах высокого разрешения в специальной лаборатории [22–24]. Кроме того, используемые в экспресс-контроле методы должны быть применимы для исследования большого числа сред. Погрешность измерения параметров должна быть не более 1.5%. Данным требованиям в настоящее время удовлетворяют только два метода: ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и рефракция [1, 4, 5, 13–17, 24–28].

Рефрактометры обладают неоспоримым преимуществом перед малогабаритными ЯМР спектрометрами и релаксометрами [26–31] по размеру, массе и стоимо-

сти. Поэтому этим приборам отдают предпочтение при проведении экспресс-контроля состояния различных конденсированных сред. Наибольшее распространение для экспресс-контроля среди рефрактометров получили приборы, принцип работы которых основан на явлении полного внутреннего отражения (ПВО). Погрешность измерения показателя преломления n в таких промышленных приборах составляет от ± 0.1 до ± 0.02 . Все измерения n в этих приборах полностью автоматизированы. Информация о значении n поступает на жидкокристаллический индикатор и может быть выведена на компьютер. Такое построение процесса измерения при реализации экспресс-контроля в ряде случаев создает большие проблемы при определении достоверности полученных результатов. Особенно при исследовании летучих углеводородов и их смесей в месте взятия пробы.

Эти проблемы связаны с автономными элементами питания рефрактометров и процессами стабилизации температуры T исследуемой среды на верхней грани призмы. В промышленных рефрактометрах процесс измерения показателя преломления n реализован при $T = 293$ К. Установление этого режима требует определенного времени и дополнительной энергии аккумуляторов. Может быть холодно или очень тепло. Углеводороды не замерзают и их тестировать приходится при отрицательной температуре.

Другая проблема связана с низкой точностью измерения n . В этом случае определить незначительные отклонения в значении n крайне сложно. Таких задач при использовании углеводородных сред возникает очень много. Например, смесь из двух масел (од-

* 261199g@gmail.com

† cementary.ley@gmail.com

но масло хранилось в емкости, его слили, но не все (осталась малая часть) и добавили другое. Непроизвольно получилась, например, смесь масел с объемной концентрацией 0.96 к 0.04. Такую среду для экспериментов в химии и биологии использовать нельзя. При экспресс-контроле данное несоответствие надо выявить. Подобные ситуации очень часто возникают с бензинами и керосинами. Необходимо отметить, что углеводороды, особенно летучие, в химические реакции между собой не вступают (даже после сильного перемешивания). Они образуют конгломерат.

Еще одна проблема при измерениях в промышленных рефрактометрах для экспресс-контроля заключается в следующем. Для стабилизации температуры смеси до $T = 293$ К необходимо определенное время. Это время зависит от температуры окружающей среды. За это время в смеси бензинов или других легких углеводородных соединений (например, керосин, дизельное топливо и т.д.) могут произойти изменения. Более легкие смеси поднимутся вверх, тяжелые опустятся вниз. Получится ситуация, когда нижняя грань призмы будет граничить со смесью, которую мы проверяем. А все примеси в смеси будут выше этого слоя. Прибор их наличие в смеси определить не позволит. В итоге будет измерено значение n_m смеси, которое соответствует стандартному значению, например, бензина Аи-92, который мы проверяем. Аналогичная ситуация относится к керосину, авиационному топливу, средам, предотвращающим обледенение воздушных объектов и т.д. Исследуем бензин с примесями, прибор показывает, что бензин идеален (соответствует стандарту).

Поэтому целью работы является разработка методики и способа её практической реализации для решения этих задач, актуальность которых постоянно возрастает.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЯ РЕФРАКТОМЕТРА

На основе анализа результатов ранее проведенных исследований используемых методов для измерения n_m и конструкций рефрактометров для экспресс-контроля была разработана следующая методика. В мерный объем 10 мл помещается исследуемая проба с летучими углеводородами. Среда в этом объеме встряхивается и перемешивается. Рассмотрим самый сложный вариант, мы не знаем состава среды или смеси, кроме того, что они относятся к углеводородным. После перемешивания из среды берется проба, которая размещается между призмами. Грани призмы, которые соприкасаются со средой, снабжены специальными прокладками из силикона. Эти прокладки образуют небольшой герметичный объем (вес верхней призмы и конструкция прижимает одну прокладку к другой). Это значительно сократит скорость испарения летучих углеводородных смесей. Для границы свет-тень, по которой будем измерять показатель преломления

n_m , будем использовать дневной свет (например излучение Солнца). В его спектре присутствует желтая линия Na ($\lambda = 589.3$ нм), на которой проводятся измерения показателей преломления конденсированных сред для сравнения со стандартными, выполненными в лабораториях. Для этого необходимо, чтобы свет поступал только на грань одной из призм. На вторую призму свет поступать не должен. В итоге на выходе из призмы 1 (нижняя призма) формируется граница свет-тень и измеряется n_b . Далее поступление света на призму 1 перекрывается и свет поступает на призму 2 (верхняя призма) и измеряется n_t . Температура T исследуемой среды (воздуха, если рефрактометр и среда, например, долго находились на улице) постоянно контролируется. При проведении наших измерений n_t и n_b необходимо все реализовать очень быстро (за 6–8 с), чтобы не произошли существенные перемещения между средами в измеряемых слоях. В предложенном нами герметичном объеме испарения летучих углеводородных сред за такое время не произойдут. Температура так быстро также не изменяется.

В этом случае должно получиться следующее: $n_t = n_b$. Это означает, что среда хорошо перемешана. Если это соотношение не выполняется, среду необходимо еще раз перемешать. Это является одной из особенностей разработанной нами методики для видимого света, которая позволяет заранее исключить ошибку при измерениях. Эта ошибка очень часто возникает при использовании промышленных малогабаритных рефрактометров, работающих на явлении ПВО, для экспресс-контроля углеводородных сред. Далее измеренное значение n_t с учетом температуры T сравнивается со стандартными значениями летучих углеводородных сред (бензинов, керосинов и т.д.). Если произошло совпадение, то процесс экспресс-контроля данной среды завершен. Если среду установить не удалось (проба при этом находится между призмами), то процесс измерения продолжается. Необходимо между первыми измерениями n_t и n_b подождать 120–130 с. За это время в исследуемом слое смеси, размещенном почти в герметичном объеме, произойдут изменения. Легкая фракция поднимется наверх и у неё будет контакт с гранью верхней призмы. Тяжелая фракция опустится вниз, и у неё будет контакт с нижней гранью призмы. Испарятся в первую очередь будет легкая фракция. Поэтому измерения надо начинать с верхней грани призмы. Измеряется n_m^t и температура T , далее свет подается на нижнюю призму и измеряется n_m^b при той же T . По измеренным значениям n_m^t и n_m^b с учетом температуры можно определить среды на верхнем и нижнем уровне смеси. Это позволит определить состав смеси.

Смесь, состоящая из трех летучих углеводородных сред, встречается крайне редко. В качестве топлива для различного транспорта такие смеси использовать сложно. Этот вариант также будет рассмотрен в статье.

Для определения концентраций сред в смеси исполь-

зуем уравнение рефракции [26, 27]:

$$n_m = F_1 n_1 + F_2 n_2 + \dots + F_n n_n, \quad (1)$$

где n_m — измеренный в начальный момент показатель преломления среды ($n_m = n_t = n_b$), n_1, n_2, \dots, n_n — значения показателей преломления сред, из которых может состоять исследуемая смесь, F_1, F_2, \dots, F_n — коэффициенты, которые характеризуют относительное содержание различных сред в исследуемой смеси (в случае необходимости определения процентного содержания эти коэффициенты умножают на 100%).

Опыт работы с летучими углеводородными средами и анализ результатов различных исследований [15, 16, 20, 22, 26, 27, 31] показал, что в уравнении (1) необходимо оставить первоначально два члена:

$$n_m = F_1 n_1 + F_2 n_2. \quad (2)$$

С учетом разработанной нами методики измерения и полученных данных уравнение (2) принимает следующий вид:

$$n_m = n_t = n_b = F_1 n_m^t + F_2 n_m^b. \quad (3)$$

В уравнении (3) известны три значения показателя преломления (n_t, n_m^t, n_m^b). В этом случае, в соответствии с теоремой Коши, уравнение (3) имеет единственное решение относительно коэффициентов F_1 и F_2 . Если смесь состоит только из двух сред, значения коэффициентов F_1 и F_2 получаются однозначно.

Если решение (3) относительно коэффициентов F_1 и F_2 не существует по причине нарушения физических законов (в смеси находится три среды и более), то уравнение (3) необходимо преобразовать в следующий вид (для трех сред):

$$n_m = n_t = n_b = F_1 n_m^t + F_2 n_m^b + F_3 n_3. \quad (4)$$

Однозначного решения уравнения (4) относительно коэффициентов F_1, F_2, F_3 и выбранного значения n_3 для трех известных значений (n_t, n_m^t, n_m^b) нет. Будет большое число вариантов по коэффициентам F_1, F_2, F_3 с учетом выбора реального показателя преломления n_3 третьей среды. Например, смешать с бензинами дизельное топливо не имеет смысла (среды отличаются по цвету (бензин — бледно-желтый, дизельное топливо — цвет заваренного чая)). Это очень хорошо видно визуально. Поэтому после получения значений F_1, F_2, F_3 необходимо провести анализ полученных данных. Отклонить те результаты, которые противоречат логике и реальной жизни. Например, получилась смесь из бензинов Аи-95, Аи-92 и спирта (метанол) в пропорции 0.4:0.3:0.3. Такое в реальности произойти не может, специально это делать никто не будет (автомобиль скорее всего не заведется или сильно «чихнет»). Из реальных результатов решения (4) останется еще достаточно большое число вариантов (каждый из этих вариантов может возникнуть с разной вероятностью). В этих вариантах мы знаем состав смеси и их весовые

коэффициенты. Для однозначного определения коэффициентов и третьей компоненты в смеси мы разработали следующую методику, основанную на соотношении масс. Для её реализации предварительно перед измерением показателей преломления необходимо пробу исследуемой смеси объемом $V_m = 100$ мл взвесить. Получится M_m — масса смеси объемом 100 мл. При экспресс-контроле на территории скорее всего придется взвешивать смесь объемом 10 мл, при возможности лучше взвешивать 100 мл. Далее составляется следующая пропорция:

$$M_m = V_m(\rho_1 F_1 + \rho_2 F_2 + \rho_3 F_3), \quad (5)$$

где ρ_1, ρ_2 и ρ_3 — значения плотностей двух установленных нами в пробе сред и одной предполагаемой (с учетом температуры).

Выполнение соотношения (5) позволяет однозначно установить истинные значения F_1, F_2, F_3 , а также наименование третьей среды. Поэтому при использовании данной методики в экспресс-контроле необходимо для решения этой задачи иметь мерные сосуды объемом 10 и 100 мл и весы с погрешностью измерения 0.1 г или менее. Необходимо отметить, что вопрос влияния погрешности измерения M_m на выбор однозначного решения уравнения (5) должен быть исследован отдельно.

Может получиться, что нет решения для уравнения (2). Кроме того, измеренное значение $n_m = n_t = n_b$ не соответствует ни одной известной углеводородной среде и с течением времени не изменяется. В этом случае исследуемая среда признается некачественной. Она утилизируется или её пробу отправляют на экспертизу в стационарную лабораторию (среда временно не используется). Можно утверждать, что в среде содержатся растворенные примеси, которые не имеют отношения к углеводородам.

Для практической реализации разработанной нами методики была собрана новая оптическая конструкция лабораторного макета рефрактометра. В конструкции было реализована возможность размещения жидкой среды в герметичном объеме, который располагается между двумя призмами. Также был реализован контроль поступления видимого света на две призмы (возможность измерять показатель преломления среды с использованием верхней или нижней призмы). На рис. 1, а, б представлены структурная схема рефрактометра и ход оптических лучей для двух случаев измерения: (а) — n_t , (б) — n_b .

Положение границы свет-тень связано с углом поворота пластины 10 по отношению к углу α_h . В случае размещения границы свет-тень в перекрестье, угол поворота пластины становится критическим и значение n_m определяется из следующего соотношения:

$$\alpha_h = \arcsin(n_m/n_p), \quad (6)$$

где α_h — критический угол (угол полного внутреннего отражения), n_p — показатель преломления материала, из которого изготовлена призма.

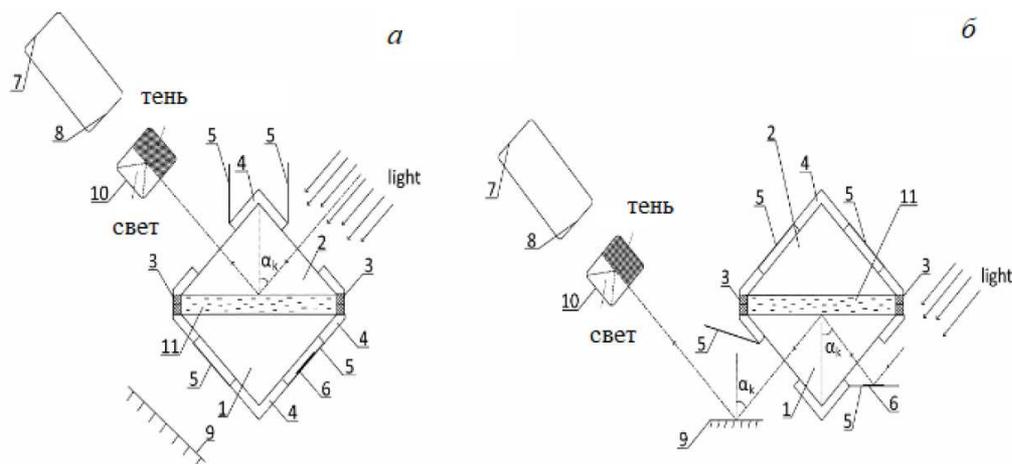


Рис. 1. Структурная схема оптической части рефрактометра и ход лучей для верхней (а) и нижней (б) призм: 1 — нижняя треугольная призма (материал лейкосапфир), 2 — верхняя треугольная призма (материал лейкосапфир), 3 — силиконовые прокладки, 4 — поворотное крепление призм, 5 — закрывающая заслонка, 6 — зеркало, 7 — окуляр, 8 — линза на подвижном креплении, 9 — зеркало, 10 — пластина для регистрации границы свет-тень, 11 — исследуемая среда

Таблица 1. Значение плотностей ρ жидких сред, используемых в качестве топлива при $T = 278$ К

Вид топлива	Среднее значение плотности ρ по топливу кг/л	Вид топлива	Среднее значение плотности ρ по топливу, кг/л
Бензин А-76 неэтилированный	0.730	Топливо РТ	0.778
Нормаль 80 неэтилированный	0.730	Авиационный керосин ТС	0.780
А-80 этилированный (галоша)	0.730	АИ-98 неэтилированный	0.780
АИ-95 неэтилированный	0.750	Керосин	0.810
Прямоугольный авиационный керосин	0.755	Топливо Т1	0.819
АИ-92 неэтилированный	0.760	Дизельное топливо	0.840
Авиационный керосин ТС-2	0.766	Осветительный керосин	0.840

Градуировка шкалы рефрактометра выполнена в соответствии с соотношением (6). Точность измерения n_m определяется механикой подстройки положения пластины 10 и обеспечением условия падения света, используемого для измерений, на грань призмы под углом 90° .

Для реализации предложенной нами методики была составлена таблица плотностей всех топлив, которые в настоящий момент используются в российской федерации для подвижных объектов и для бытовой техники (примусы, лампы различной модификации и т.д.).

В случае проведения измерений при другом значении T , значение ρ соответствующее этому значению можно пересчитать с использованием следующей формулы:

$$\rho(n) = \rho_0 - \Delta\rho(T_0 - T_1), \quad (7)$$

где ρ_0 — значение плотности при температуре $T_0 = 293$ К, n — номер среды в смеси, $\Delta\rho_n$ — значения тем-

пературной поправки, которое является известным для всех выпускаемых нефтепродуктов, T_1 — температура смеси при измерении n_m^t и n_m^b .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2–4 для примера представлены результаты исследования различных углеводородных сред и их смесей с использованием двух призм.

В начальный момент времени измерения $n_t = n_b = 1.4121 \pm 0.0004$ (при $T = 300.1$ К). Далее было через 140 с выполнено два измерения с использованием верхней — 1 и нижней треугольных призм (рис. 1).

Измеренное значение $n_m^t = 1.3850 \pm 0.0004$ (при $T = 300.1$ К). Это значение соответствует бензину АИ-80.

Измеренное значение $n_m^b = 1.4235 \pm 0.0004$ (при $T = 300.1$ К). Это значение соответствует бензину АИ-92.

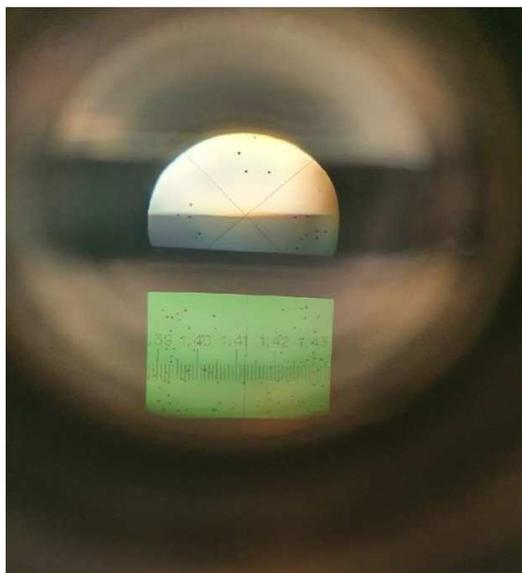


Рис. 2. Граница свет-тьнь и шкала рефрактометра при измерении смеси из двух бензинов Аи-92 и Аи-80 в пропорции 0.7 к 0.3)

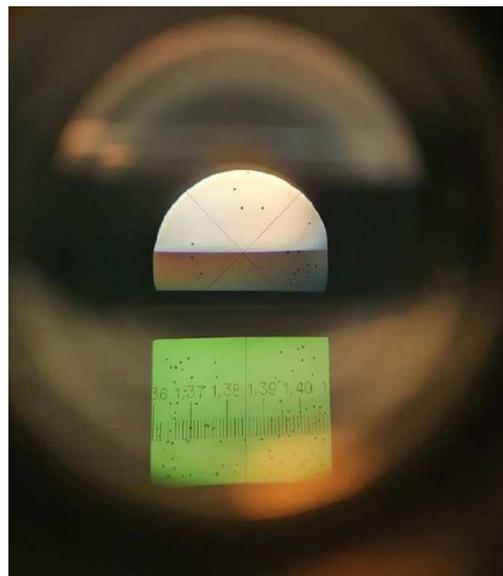


Рис. 3. Граница свет-тьнь и шкала рефрактометра при измерении смеси из двух бензинов (Аи-92 и Аи-80) при использовании нижней призмы 2. Бензины Аи-92 и Аи-80 были смешаны в пропорции 0.7 к 0.3

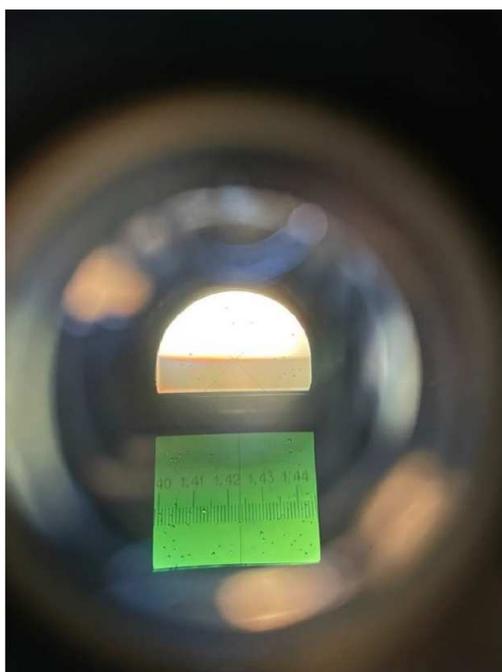


Рис. 4. Граница свет-тьнь и шкала рефрактометра при измерении смеси из двух бензинов (Аи-92 и Аи-80) при использовании верхней призмы 1. Бензины Аи-92 и Аи-80 были смешаны в пропорции 0.7 к 0.3

С использованием (3) для измеренных значений показателей преломления n_t , n_m^t , n_m^b были получены коэффициенты $F_1 = 0.7022$ и $F_2 = 0.2978$. Значение

коэффициентов F_1 и F_2 с несущественной погрешностью соответствует содержанию бензинов Аи-92 и Аи-80 в приготовленной смеси. Это подтверждает адекватность предложенной нами методики.

Для проверки надежности работы разработанной нами оптической конструкции было реализовано сравнение измеренных показателей преломления n_m водно-спиртового 50% раствора этанола при небольшом изменении температуры T в лаборатории. Изменение n_m от T измерялось промышленным рефрактометром Аббе NAR-2Т (погрешность измерения ± 0.0002). В табл. 2 представлены результаты исследований n_m с использованием двух рефрактометров.

Полученные результаты совпадают в пределах погрешности измерения. Это подтверждает достоверность в проведении измерений показателей преломления с использованием разработанной нами конструкции рефрактометра. Необходимо отметить, что водно-спиртовой 50% раствор этанола является летучим соединением с большой скоростью испарения. Это еще раз показывает надежность работы предложенной нами конструкции рефрактометра и широкие его функциональные возможности.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТ В СМЕСИ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ТРЕХ ЛЕТУЧИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД

В ряде случаев решения уравнения (3) относительно коэффициентов F_1 и F_2 может не быть. Это означает,

Таблица 2. Изменение показателя преломления n_m водно-спиртового 50% раствора этанола от температуры T

T, K	Лабораторный макет разработанного рефрактометра	Промышленный рефрактометр Аббе NAR-2T
274.2 ± 0.1	1.4337 ± 0.0004	1.4335 ± 0.0002
278 ± 0.1	1.4335 ± 0.0004	1.4333 ± 0.0002
283 ± 0.1	1.4333 ± 0.0004	1.4335 ± 0.0002
288 ± 0.1	1.4327 ± 0.0004	1.4328 ± 0.0002
293 ± 0.1	1.4319 ± 0.0004	1.4317 ± 0.0002
298 ± 0.1	1.4309 ± 0.0004	1.4311 ± 0.0002
303 ± 0.1	1.4291 ± 0.0004	1.4292 ± 0.0002
308 ± 0.1	1.4268 ± 0.0004	1.4267 ± 0.0002
313 ± 0.1	1.4239 ± 0.0004	1.4241 ± 0.0002
316.8 ± 0.1	1.4214 ± 0.0004	1.4212 ± 0.0002

Таблица 3. Значения коэффициентов F_1 , F_2 и F_3 для случая, если третья среда – Аи-95

N	F_1 (Аи-80)	F_2 (Аи-92)	F_3 (Аи-95)
1	0.02	0.04	0.94
2	0.03	0.03	0.94
3	0.04	0.02	0.94
4	0.01	0.05	0.94
5	0.01	0.04	0.95
6	0.02	0.03	0.95
7	0.03	0.02	0.95
8	0.04	0.01	0.95
9	0.01	0.03	0.96
10	0.02	0.02	0.96
11	0.03	0.01	0.96
12	0.01	0.02	0.97
13	0.02	0.01	0.97
14	0.01	0.01	0.98
15	0.03	0.04	0.93
16	0.04	0.03	0.93
17	0.02	0.05	0.93
18	0.01	0.06	0.93
19	0.04	0.04	0.92
20	0.03	0.05	0.92
21	0.02	0.06	0.92
22	0.01	0.07	0.92
23	0.04	0.05	0.91
24	0.03	0.06	0.91
25	0.02	0.07	0.91
26	0.01	0.08	0.91
27	0.04	0.06	0.90
28	0.03	0.07	0.90

что исследуемая смесь состоит из трех сред (предполагаем, что это летучие углеводородные среды). Нами была изготовлена смесь из трех бензинов Аи-80, Аи-92 и Аи-95 объемом в 100 мл в пропорции между бензинами 0.04:0.02:0.94.

Далее было предположено, что мы не знаем состав смеси. Были проведены измерения n_t , n_m^t , n_m^b и установлено разделение в смеси по слоям. Значит смесь состоит из углеводородных сред. Другого быть не может, так как произошло разделение в смеси сред по слоям. В химическую реакцию среды не вступали.

Анализ данных по плотностям ρ представленных в табл. 1 показал, что между бензинами марок Аи-80 и Аи-92 могут располагаться только две среды. Это бензин марки Аи-95 и прямогонный авиационный керосин (ПАК). Был выполнен расчет плотностей бензинов и керосина с использованием (7) для температуры $T_1 = 300$ К. Получены следующие результаты по плотностям:

$$\begin{aligned} \rho(\text{Аи-80}) &= 0.7254 \pm 0.0008 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{Аи-92}) &= 0.7562 \pm 0.0008 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{Аи-95}) &= 0.7467 \pm 0.0008 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{ПАК}) &= 0.7483 \pm 0.0008 \text{ кг/л.} \end{aligned}$$

Результаты расчета были сравнены с данными, полученными при измерении плотностей указанных сред с использованием пикнометра DMA 35 EX погрешность измерения 0.0007 кг/л при температуре $T_1 = 299.9 \pm 0.1$ К. Получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} \rho(\text{Аи-80}) &= 0.7253 \pm 0.0007 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{Аи-92}) &= 0.7561 \pm 0.0007 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{Аи-95}) &= 0.7466 \pm 0.0007 \text{ кг/л,} \\ \rho(\text{ПАК}) &= 0.7482 \pm 0.0007 \text{ кг/л.} \end{aligned}$$

В результате расчетов и измерений величины совпали в пределах погрешности. Этими значениями можно пользоваться при решении уравнения (5).

Решая уравнение рефракции (4) для двух возможных вариантов третьей смеси (Аи-95 или ПАК), мы получаем большое количество коэффициентов F_1 , F_2 , F_3 . Часть из них не соответствуют реальности и поэто-

Таблица 3. Значения коэффициентов F_1 , F_2 и F_3 для случая, если третья среда — Аи-95 (Продолжение)

N	F_1 (АИ-80)	F_2 (АИ-92)	F_3 (АИ-95)
29	0.02	0.08	0.90
30	0.01	0.09	0.90
31	0.04	0.07	0.89
32	0.03	0.08	0.89
33	0.02	0.09	0.89
34	0.01	0.1	0.89
35	0.04	0.08	0.88
36	0.03	0.09	0.88
37	0.02	0.1	0.88
38	0.01	0.11	0.88
39	0.04	0.09	0.87
40	0.03	0.1	0.87
41	0.02	0.11	0.87
42	0.01	0.12	0.87
43	0.04	0.1	0.86
44	0.03	0.11	0.86
45	0.02	0.12	0.86
46	0.01	0.13	0.86
47	0.04	0.11	0.85
48	0.03	0.12	0.85
49	0.02	0.13	0.85
50	0.01	0.14	0.85
51	0.04	0.12	0.84
52	0.03	0.13	0.84
53	0.02	0.14	0.84
54	0.01	0.15	0.84
55	0.04	0.13	0.83
56	0.03	0.14	0.83
57	0.02	0.15	0.83
58	0.01	0.16	0.83
59	0.04	0.14	0.82
60	0.03	0.15	0.82
61	0.02	0.16	0.82
62	0.01	0.17	0.82
63	0.04	0.15	0.81
64	0.03	0.16	0.81
65	0.02	0.17	0.81
66	0.01	0.18	0.81
67	0.04	0.16	0.80
68	0.03	0.17	0.80
69	0.02	0.18	0.80
70	0.01	0.19	0.80
71	0.04	0.17	0.79
71	0.03	0.18	0.79

Таблица 3. Значения коэффициентов F_1 , F_2 и F_3 для случая, если третья среда — Аи-95 (Продолжение)

N	F_1 (АИ-80)	F_2 (АИ-92)	F_3 (АИ-95)
73	0.02	0.19	0.79
74	0.01	0.20	0.79
75	0.04	0.18	0.78
76	0.03	0.19	0.78
77	0.02	0.20	0.78
78	0.01	0.21	0.78
79	0.04	0.19	0.77
80	0.03	0.20	0.77
81	0.02	0.21	0.77
82	0.01	0.22	0.77
83	0.04	0.20	0.76
84	0.03	0.21	0.76
85	0.02	0.22	0.76
86	0.01	0.23	0.76
87	0.04	0.21	0.75
88	0.03	0.22	0.75
89	0.02	0.23	0.75
90	0.01	0.24	0.75
91	0.04	0.22	0.74
92	0.03	0.23	0.74
93	0.02	0.24	0.74
94	0.01	0.25	0.74
95	0.04	0.23	0.73
96	0.03	0.24	0.73
97	0.02	0.25	0.73
98	0.01	0.26	0.73
99	0.04	0.24	0.72
100	0.03	0.25	0.72
101	0.02	0.26	0.72
102	0.01	0.27	0.72
103	0.04	0.25	0.71
104	0.03	0.26	0.71
105	0.02	0.27	0.71
106	0.01	0.28	0.71
107	0.04	0.26	0.70
108	0.04	0.27	0.69
109	0.04	0.28	0.68

му исключаются из дальнейшего рассмотрения. Вероятность возникновения таких событий близка к нулю. Кроме того, при исключении из рассмотрения набора коэффициентов F_1 , F_2 , F_3 , учитывалась измеренная масса исследуемой смеси M_m . В таблицах 3 и 4 представлены значения коэффициентов F_1 , F_2 , F_3 для двух

вариантов третьей среды (Аи-95 и ПАК) в смеси соответственно.

Таблица 4. Значения коэффициентов F_1 , F_2 и F_3 для случая, если третья среда — ПАК

N	F_1 (АИ-80)	F_2 (АИ-92)	F_3 (ПАК)
1.	0.04	0.95	0.01
2.	0.03	0.96	0.01
3.	0.02	0.97	0.01
4.	0.01	0.98	0.01

Это очень много. В ряде случаев концентрации двух других сред приемлемы для возможного использования топлива, в ряде других случаев при таких концентрациях двух сред в исходном топливе, его использовать нельзя. Для определения истинного решения уравнения (4) относительно F_1 , F_2 , F_3 , используем уравнение (5). В уравнение (5) поочередно подставляются значения F_1 , F_2 , F_3 для двух сред. Объем $V_m = 100$ мл. Измеренная масса этого объема $M_m = 74.6 \pm 0.1$ гр. Ниже представлен пример расчета M_m^c , который позволяет однозначно установить значения коэффициентов F_1 , F_2 , F_3 , а также третью среду.

$$M_m^c = 100 \times (0.7254 \times 0.04 + 0.7562 \times 0.02 + 0.7467 \times 0.94) = 74.61 \pm 0.08 \text{ г.}$$

Результаты расчета и измерений совпали в пределах погрешности измерения. Третьей средой является бензин марки Аи-95. Соотношение концентраций

между средами по мере их расположения в смеси 0.04:0.94:0.02. Эти данные полностью совпадают с составом бензинов и их концентрациями, которые использовались для приготовления данной смеси.

Результат анализа исследуемой смеси — это бензин марки Аи-95, в который добавлены два других бензина. С такими добавками бензин Аи-95 использовать нельзя (двигатель может прекратить работу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал адекватность разработанной нами методики для определения при экспресс-контроле состояния углеводородных сред, а также состава двухкомпонентных и трехкомпонентных смесей и соответствующие их концентрации. Разработанная конструкция малогабаритного рефрактометра с учетом установленных особенностей позволяет проводить измерения значений n_D в видимом свете с погрешностью ± 0.0004 . Данное значение удовлетворяет требованиям экспресс-контроля.

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 и более углеводородных сред. Такая задача на практике возникает в системе (аэропорты и т.д.), где работают с авиационным керосином.

- [1] Davydov V.V., Davydov R.V., Myazin N.S. // Measurement Techniques. **65**, N 4. 279. (2022).
- [2] Kostik N., Bobyl A., Rud V., Salamov I. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **578**, N 1. 012047. (2020).
- [3] Sachenko A.V., Kostilyov V.P., Bobyl A.V. et al. // Tech. Phys. Lett. **44**, N 10. 873. (2018).
- [4] Kashaev R.S., Kien N.T., Tung C.V., Kozelkov O.V. // Petroleum Chemistry. **59**. S21. (2019).
- [5] Davydov R., Davydov V., Dudkin V. // Energies. **15**, N 9. 3259. (2022).
- [6] Yushkova V.V., Davydov R.V., Rud V.Y., Switala F. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **940**, N 1. 012045. (2020).
- [7] Isaenko D., Reznikov B., Rodin S. [2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology \(ITNT\) Accession Number: 21992014 \(2022\)](#).
- [8] Davydov V.V., Myazin N.S., Kiryukhin A.V. // Atomic Energy. **127**, N 5. 274. (2020).
- [9] Ryzhova D., Davydov V. // [2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology \(ITNT\) Accession Number: 21992029](#).
- [10] Fokin G., Lazarev V. // Networks Proceedings of 2019 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications. MTTW. 8897228. 9. (2019).
- [11] Davydov R., Logunov S., Nikolaev D. et al. // Fiber Optic System for Monitoring Coolant Parameters in Nuclear Power Plants. / Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 21st International Conference, NEW2AN 2021, and 14th Conference, ruSMART 2021, St. Petersburg, Russia, August 26–27, 2021, Proceedings. Aug 2021. P. 221.
- [12] Dmitrieva D.S., Pilipova V.M., Davydov R.V. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. **2086**. 012136. (2021).
- [13] Davydov V.V., Moroz A.V., Makeev S.S. // Optics and Spectroscopy. **128**, N 10. 1678. (2020).
- [14] Myazin N.S., Yushkova V.V., Rud V., Dudkin V.I. // J. Phys.: Conf. Ser. **1400**, N 6. 066008. (2019).
- [15] Karseev A., Davydov V., Vologdin V. // J. Phys.: Conf. Ser. **643**, N 1. 012108. (2015).
- [16] Kashaev R.S., Kien N.C., Tung T.V., Kozelkov O.V. // J. of Appl. Spectr. **86**, N 5. 890. (2019).
- [17] Myazin N.S., Yushkova V.V., Davydov V., Davydova T.I.

- // J. Phys.: Conf. Ser. **917**, N 4. 042017. (2017).
- [18] *Mazing M.S., Zaitceva A.Yu., Kislyakov Yu.Ya. et al.* // International Journal of Pharmaceutical Research. **12**. 1974. (2020).
- [19] *Rukin E.V., Myazin N.S., Davydov V., Rud V.Y.* // J. Phys.: Conf. Ser. **1368**, N 4. 042011. (2019).
- [20] *Kashaev R.S., Kozelkov O.V.* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **288**, N 1. 012035. (2019).
- [21] *Marusina M.Ya., Karaseva E.A.* // Russian Electronic Journal of Radiology. **8**, N 3. 107. (2018).
- [22] *Sadovnikova M.A., Murzakhanov M.A., Mamin F.F. et al.* // Energies. **15**, N 17. 6204. (2022).
- [23] *Vakhin A.V., Khelkhal M.A., Mukhamatdinov I.I. et al.* // Catalysts. **12**, N 5. 514. (2022).
- [24] *Davydov V.V., Dudkin V.I., Grebenikova N.M.* // Tech. Phys. **63**, N 12. 1845. (2018).
- [25] *Kuzmin M.S., Rogov S.A., Davydov V.V.* // Computer Optics. **43**, N 3. 391. (2019).
- [26] *Karabegov M.A.* // Measurement Techniques. **52**, N 10. 1126. (2009).
- [27] *Grebenikova N.M., Smirnov K.J., Davydov V.V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. **1135**, N 1. 012055. (2018).
- [28] *Myazin N.S., Davydov V.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. **1236**, N 1. 012026. (2019).
- [29] *Myazin N.S., Davydov V.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. **1124**, N 3. 031004. (2018).
- [30] *Davydov V.V., Karseev A.Y., Dudkin V.I.* // J. of Appl. Spectr. **82**, N 5. 794. (2015).
- [31] *Kashaev R.S., Suntsov I.A., Tung C.V. et al.* // J. of Appl. Spectr. **86**, N 2. 289. (2019).

Features of express control of volatile hydrocarbon media and their mixtures in visible light

G.V. Stepanenkov^a, D.V. Vakorina^b

*St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич
Faculty of Infocommunication Networks and Systems, Department of Photonics and Communication Lines
Russia, 193232, St. Petersburg
E-mail: ^a261199g@gmail.com, ^bcementary.ley@gmail.com*

The problems that arise during the express control of hydrocarbon media and their mixtures are considered. Especially noted the problems with the control of volatile hydrocarbon media that are used as fuel (gasoline, kerosene, diesel fuel, etc.). The requirements to the methods for express control and devices for their implementation are defined. The features of control of volatile hydrocarbon media and their mixtures using small-size refractometers working on the effect of total internal reflection are considered. It is shown that when using these devices, it is impossible to obtain data to determine the state of the mixture of volatile hydrocarbon media, its composition and the concentration of the components. A new method for determining the components in the mixture of volatile hydrocarbon media and data on the ratio between the concentrations of the components in it has been developed. The design of a small-size refractometer, which makes it possible to measure the refractive index in visible light, for the implementation of this method is presented. The dependences of the density change on the temperature T for different grades of gasoline for determining the composition and concentration in a three-component mixture of volatile hydrocarbon media have been established. The results of studies of various volatile hydrocarbon media and their mixtures are presented.

PACS: 78.47. +p.

Keywords: Hydrocarbon medium, mixture, refraction, express control, refractive index, visible light, light-shadow boundary, concentration, measurement error.

Received 14 May 2023.

Сведения об авторах

1. Степаненков Григорий Викторович — студент магистратуры; e-mail: 261199g@gmail.com.
2. Вакорина Дарья Владимировна — студентка; e-mail: cementary.ley@gmail.com.