

А. А. Щербакова, В. Г. Полосин, М. Н. Морозова

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУТИ ПРОТОЧНОЙ КЮВЕТЫ В ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕНЗИНОВ

A. A. Shcherbakova, V. G. Polosin, M. N. Morosova

THE CALCULATION OF THE OPTIMUM OPTICAL PATH LENGTH FLOW CELL IN THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF A GASOLINE SPECTROMETRIC RESEARCH

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Представлен расчет оптимальной длины оптического пути кюветы для товарных бензинов на основе спектральных коэффициентов поглощения бензинов и его компонентов в ближней инфракрасной области. Объектом исследования являются информационно-измерительная система для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости топлива. Предметом исследования являются спектральные характеристики бензинов и их компонентов. Целью работы является определение оптимальной длины оптического пути проточной системы информационно-измерительной системы на основе анализа спектров поглощения бензинов и их компонентов. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач использовались методы решения некорректных задач при спектральном анализе, методы математического моделирования, статистической обработки данных, метод энергетического расчета с помощью программы *OptiSystem*, расчет проведен в программной среде *Visual Basic for Applications (VBA) Microsoft Excel*. *Результаты.* Представлены критерий оценки и математическая модель длины оптического пути кюветы. По результатам расчетов определены рабочий диапазон коэффициентов пропускания и ошибки измерений. *Выводы.* Использование предлагаемого расчета оптимальной длины оптического пути кюветы является задачей спектроскопии и состоит в изучении спектрального состава светового излучения, характеризующегося функцией зависимости распределения плотности энергии по спектру от частоты. Расчет позволяет определить потери, вносимые исследуемым объектом (бензином в кювете с выбранной длиной оптического пути) в работу оптического тракта системы. Информация о потерях, вносимых кюветой с бензином, необходима для оценки потерь оптического тракта системы методом энергетического расчета и моделирования с помощью программного обеспечения *OptiSystem*.

A b s t r a c t. *Background.* The article presents the calculation of the optimal optical path length of the cell for commercial gasoline on the basis of spectral absorption coefficients of gasoline and its components in the near infrared region. The object of the study is an information-measuring system for the identification of components, determining the composition and detonation resistance of fuel. The subject of the study is the spectral characteristics of components and gasoline. The aim of the work is to determine the optimal length of the optical path of the flow system of information-measuring system based on the analysis of the absorption spectra of gasoline and its components. *Materials and methods.* To solve the problems we used the

methods of solving incorrect problems in spectral analysis, methods of mathematical modeling, statistical data processing, energy calculation method using the program OptiSystem, the calculation is carried out in the software environment Visual Basic for Applications (VBA) Microsoft Excel. **Results.** A criterion for estimating and mathematical model of the length of the optical path of the cell are presented. The calculations determined the working range of the coefficients of transmission and error measurements. **Conclusions.** The use of the proposed calculation of the optimal optical path length flow cell is the task of spectroscopy and consists in the study of the spectral composition of light radiation characterized by the function of the dependence of the energy density distribution over the spectrum on the frequency. The calculation allows to determine the losses introduced by the object under study (gasoline in the cuvette with the selected optical path length) in the optical path of the system. Information about the losses introduced by the cuvette with gasoline in dB is necessary to estimate the losses of the optical path of the system by the method of energy calculation and modeling using the OptiSystem software.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бензин, проточная кювета, длина оптического пути кюветы, спектральный коэффициент поглощения, информационно-измерительная система.

К e y w o r d s: gasoline, flow cell, optical path length of the cell, spectral absorption coefficient, information and measuring system.

Наиболее информативным методом определения состава товарного бензина является спектроскопия в ближней инфракрасной (ИК) области в диапазоне длин волн 900–2550 нм, поскольку позволяет проводить измерения концентрации компонентов и октанового числа товарного бензина непосредственно на технологическом потоке в режиме реального времени, что особенно важно при построении современных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) [1, 2]. Использование основных доступных технологий, применяемых для оценки состава и детонационной стойкости бензинов в ближней ИК области заключается в выборе оптимального анализатора с системой отбора проб.

Современный рынок кювет для спектрофотометрических измерений представлен огромным ассортиментом кювет для исследования образцов жидких сред. Вид кюветы и длина оптического пути различны и определяются химико-физическими свойствами веществ. Оптические методы для исследования бензинов являются перспективным направлением в связи с возможностью применения их в искро-, взрывопожароопасных условиях эксплуатации.

Структура ИИС идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости высокооктанового топлива

Для измерения спектральных характеристик каждого отдельного компонента и бензинов в информационно-измерительной системе (ИИС) идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости топлива установка промышленных проточных кювет в технологический процесс приготовления товарного бензина предлагается в двух вариантах: с установкой промышленных проточных кювет на каждой технологической линии компонентов и готового бензина (рис. 1) и с установкой одной промышленной проточной кюветы на весь технологический поток (с подключением всех компонентов и готового бензина к одной кювете) (рис. 2).

Основными элементами ИИС являются: источник излучения, в качестве которого выбран перестраиваемый квантовый генератор (лазер) ближнего ИК диапазона длин волн, проточная кювета, соединенная волоконно-оптическим кабелем с источником излучения и фотоприемником (ФП), микроконтроллер (МК), выполняющий функции устройства преобразования информации и управления работой ИИС, персональный компьютер (ПК) для обработки измеренной информации. Число измерительных каналов определяется количеством технологических линий с исследуемыми объектами (компонентами и готовыми бензинами).

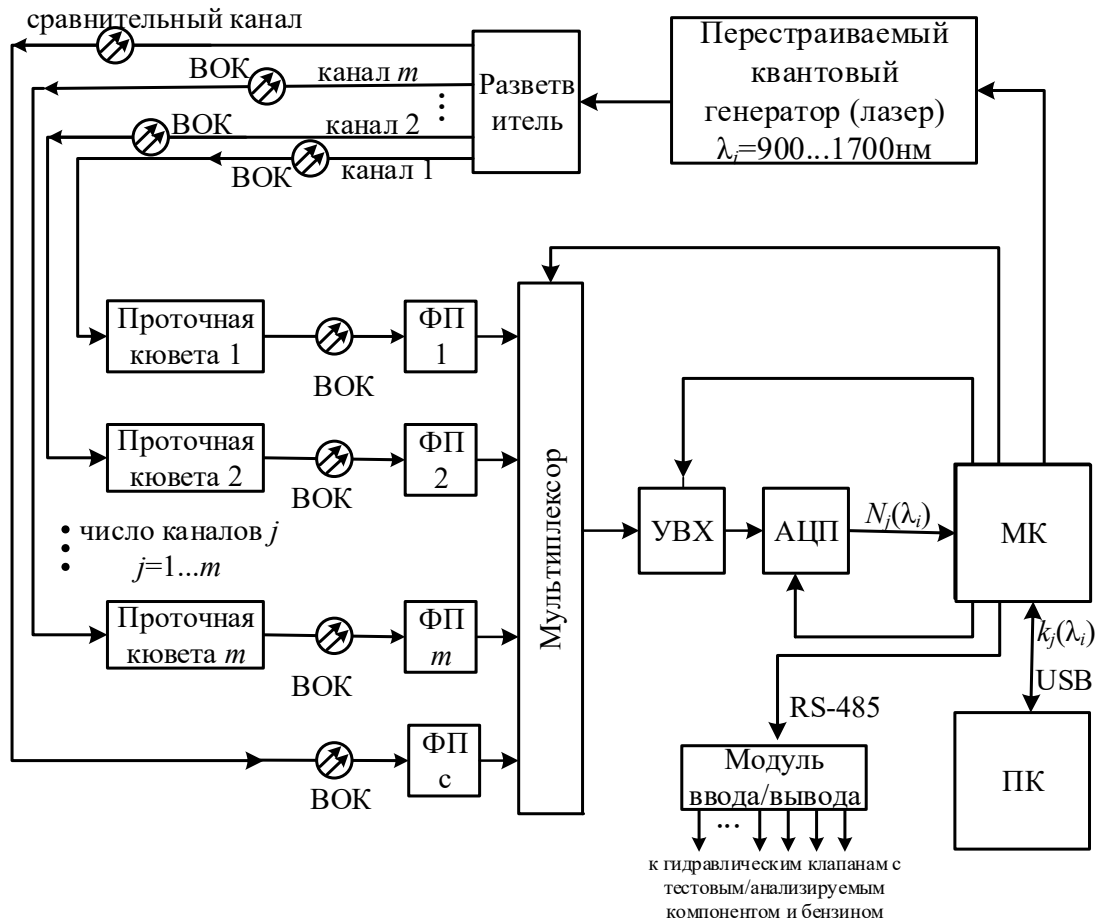


Рис. 1. Структура информационно-измерительной системы идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости топлива с проточными кюветами на каждой технологической линии

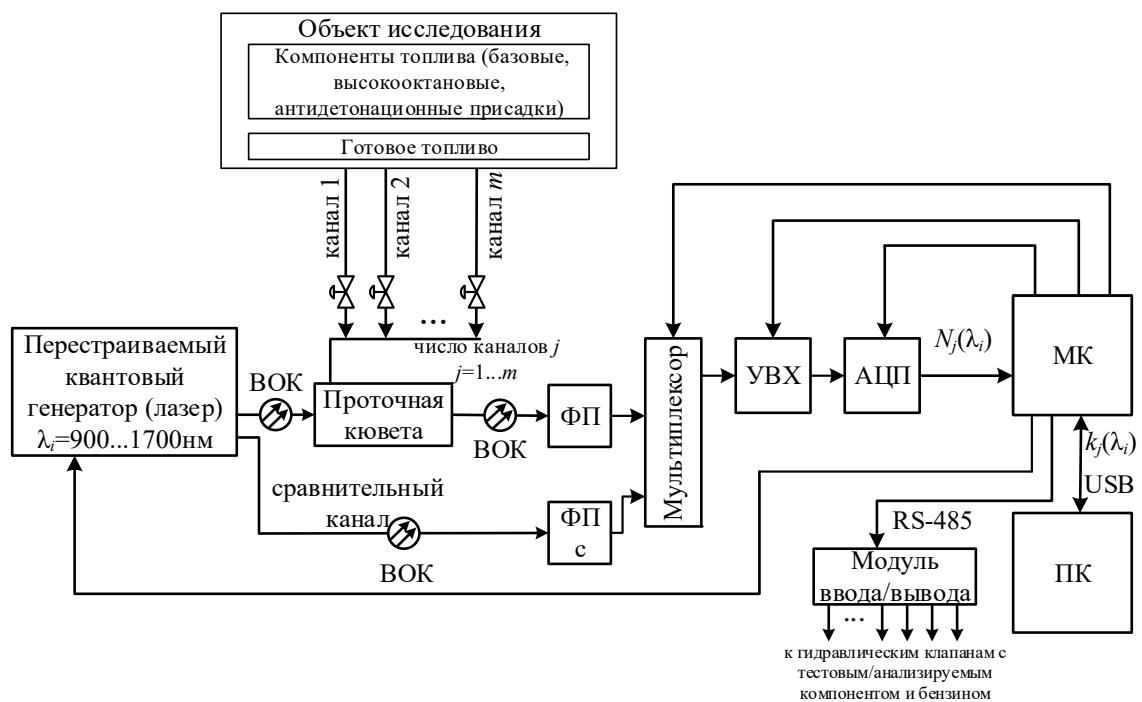


Рис. 2. Структура информационно-измерительной системы идентификации компонентов определения состава и детонационной стойкости топлива с одной проточной кюветой

В ИИС с проточными кюветами на каждой технологической линии достигается высокое быстродействие за счет одновременного опроса сигналов измерительных каналов на всех длинах волн [3].

ИИС с одной проточной кюветой работает на основе гидравлического мультиплексирования измерительных каналов, когда по команде МК через модуль ввода/вывода открывается гидравлический клапан измерительного канала 1 и промышленная проточная кювета заполняется исследуемым объектом. Измерительная информация сохраняется в ПК, после чего МК по интерфейсу RS-485 дает команду модулю ввода/вывода на закрытие гидравлического клапана измерительного канала 1 и открытие гидравлического клапана канала 2. Работа ИИС повторяется, пока не будут измерены и сохранены сигналы, соответствующие всем компонентам и бензинам.

Данная ИИС имеет низкое быстродействие, по сравнению с представленной выше ИИС, поскольку время измерений будет определяться транспортным запаздыванием в гидравлических линиях кюветы [4].

В первом случае длина кюветы определяется индивидуально для каждого компонента и смеси. Во втором случае необходимо подобрать такую длину оптического пути кюветы, которая для всех компонентов будет оптимальной.

Бензины в ИК области в спектре образуют полосы поглощения, а для получения максимальной информации с минимальной ошибкой измерения (3–5 отн. %) необходимо подобрать оптимальную длину пути кюветы таким образом, чтобы значения коэффициентов поглощения бензинов укладывались в интервале 0,3–1.

На практике длину пути кюветы выявляют экспериментально, заполняя кювету средней толщины 1 или 2 см тестовым компонентом или бензином. Если значения спектральных коэффициентов поглощения измеряемых жидкостей лежат в середине оптимального интервала (0,5–0,6), то длина оптического пути кюветы выбрана верно. Если значения спектральных коэффициентов поглощения измеряемых жидкостей выходят за пределы оптимального интервала, то проверяют соответствие измерений с кюветами меньшей или большей длины оптического пути [5].

Для решения задачи определения истинного спектра поглощения целесообразно применить метод некорректного решения задач при спектральном анализе [6], который сводится к решению интегрального уравнения относительно функции распределения плотности числа частиц и функции экспериментального спектра (пропуская излучение через измерительную аппаратуру).

Применение закона Бугера – Ламберта – Бера для расчета оптимальной длины пути кюветы для многокомпонентных смесей

Для выбора оптимальной длины оптического пути кюветы проверяют выполнение закона Бугера – Ламберта – Бера, в соответствии с которым спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda_i)$ для m -компонентной смеси определяется по формуле

$$\tau(\lambda_i) = e^{-L \sum_{j=1}^m k_j(\lambda_i) c_j}, \quad (1)$$

где L – длина оптического пути кюветы; $k_j(\lambda_i)$ – спектральный коэффициент поглощения j -го компонента на i -й длине волны; c_j – концентрация j -го компонента. Здесь оптические коэффициенты являются функцией длины волны падающего излучения.

Изменение спектрального коэффициента пропускания бензина на i -й длине волны связано с изменением концентрации j -го компонента и определяется как дифференциал функции (1) по концентрации j -го компонента:

$$\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial c_j} = -k_j(\lambda_i) L e^{-L \sum_{j=1}^m k_j(\lambda_i) c_j}. \quad (2)$$

Очевидно, что чем больше $\frac{\partial \tau(\lambda_i)}{\partial c_j}$, тем меньше ошибка измерения.

Зная, что спектральный коэффициент пропускания зависит от коэффициента поглощения и длины оптического пути кюветы ($\Delta\tau(\lambda_i) = f(\Delta k(\lambda_i), \Delta L)$), получаем выражение

$$\Delta\tau(\lambda_i) = f(\sqrt{\Delta k(\lambda_i)^2 + \Delta L^2}). \quad (3)$$

Величины коэффициента поглощения и оптической плотности независимы, продифференцируем функцию (3) по двум показателям:

$$d\tau(\lambda_i) = \frac{\partial(e^{-k(\lambda_i)L})}{\partial k(\lambda_i)} dk(\lambda_i) + \frac{\partial(e^{-k(\lambda_i)L})}{\partial L} dL, \quad (4)$$

где $\frac{\partial\tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)} = L \cdot e^{-k(\lambda_i)L}$ – дифференциал по коэффициенту поглощения, $\frac{\partial\tau(\lambda_i)}{\partial L} = k(\lambda_i) \cdot e^{-k(\lambda_i)L}$ –

дифференциал по оптической длине пути кюветы.

Подставим дифференциалы (5) и (6) в выражение (4):

$$d\tau(\lambda_i) = -Le^{-k(\lambda_i)L} dk(\lambda_i) - k(\lambda_i)e^{-k(\lambda_i)L} dL. \quad (5)$$

На основе этих выражений построен ряд кривых для различных стандартных размеров кювет 1–100 мм. Для удобства использования этих кривых при коэффициентах поглощения на различных длинах волн по оси ординат отложено отношение $\frac{\partial\tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)}$.

Оптимальной длиной кюветы является значение L , при котором максимальное приращение $d\tau(\lambda_i)$ соответствует максимальному приращению $dk(\lambda_i)$. Данное условие соответствует наибольшему значению графика, которое находится производной первого порядка.

Линия оптимума определяется производной первого порядка, приравненной к нулю $\left(\frac{\partial\tau(\lambda_i)}{\partial k(\lambda_i)}\right)' = 0$. Тогда: $k(\lambda_i) \cdot L \cdot e^{-k(\lambda_i)L} - e^{-k(\lambda_i)L} = 0$, $k(\lambda_i) \cdot L = 1$. Откуда

$$L = \frac{1}{k(\lambda_i)}. \quad (6)$$

Из выражений (1) и (6) следует, что спектральный коэффициент пропускания исследуемого объекта в рабочем диапазоне длин волн будет определяться величиной, обратной экспоненте, и примерно равен $0,37$ ($\tau(\lambda_i) = \frac{1}{e} \approx 0,37$) [5], при этом ошибка измерения будет минимальной.

Исследования спектров поглощения бензинов

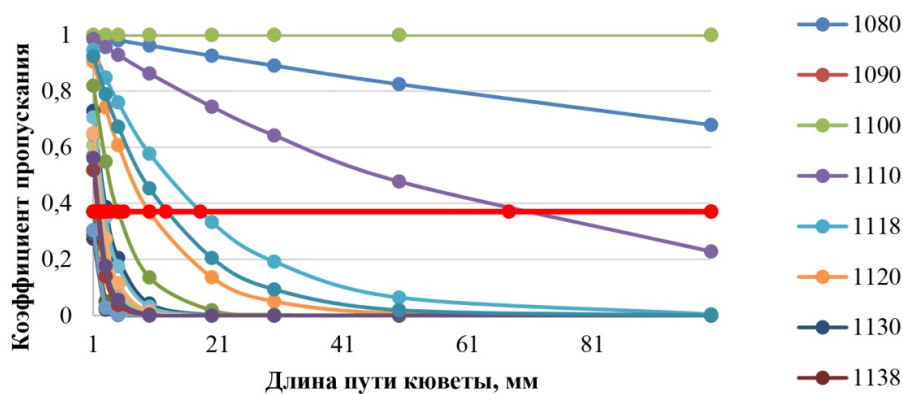
Для исследования значений спектральных коэффициентов поглощения бензинов и его компонентов в зависимости от длины оптического пути кюветы выбран ближний ИК диапазон длин волн 1080–1230 нм, поскольку здесь имеют место зависимости спектрального поглощения бензина от его химического состава и от октанового числа, а интенсивность поглощения бензина на i -й длине волны определяется процентным содержанием в смеси соответствующего компонента. В табл. 1 представлены значения спектральных коэффициентов компонентов (n -гептан, изооктан, толуол, бензол) [7] и бензинов с различным процентным содержанием этих компонентов: А-80 (n -гептан – 19 %, изооктан – 76 %, толуол – 5 %, бензол – 0 %), АИ-92 (n -гептан – 10 %, изооктан – 83 %, толуол – 8 %, бензол – 0 %), АИ-95 (n -гептан – 5 %, изооктан – 84 %, толуол – 0 %, бензол – 11 %), АИ-98 (n -гептан – 3 %, изооктан – 78 %, толуол – 0 %, бензол – 19 %).

На рис. 3 представлены графики зависимости коэффициента пропускания бензина АИ-92 от длины пути кюветы, построенные по стандартному набору кювет от 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50 и 100 мм.

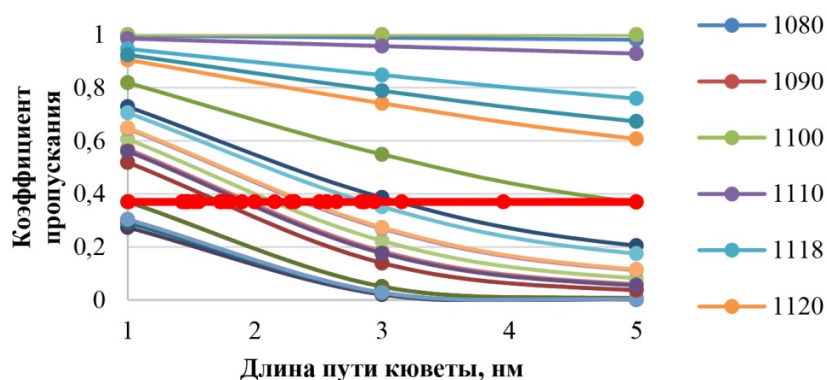
Таблица 1

Спектральные коэффициенты поглощения компонентов и бензинов

Длина волны, нм	Коэффициент поглощения компонентов $k_j(\lambda_i)$				Коэффициент поглощения смесей $k_{см}(\lambda_i)$			
	<i>n</i> -гептан	изооктан	толуол	бензол	А-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
1080	0,004	0,001	0,002	0,03	0,0017	0,0013	0,0041	0,004
1090	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
1100	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
1110	0,011	0,015	0,0125	0,042	0,0141	0,0145	0,0175	0,0176
1120	0,014	0,02	0,1	0,2	0,0228	0,0251	0,0376	0,0378
1130	0,049	0,05	0,325	0,5625	0,0636	0,0692	0,1012	0,1012
1140	0,075	0,125	1,15	1,9	0,1663	0,1923	0,2995	0,301
1150	0,3	0,3625	1,2	1,2	0,3919	0,4155	0,4425	0,4444
1160	0,345	0,4375	0,45	0,2875	0,4196	0,4301	0,4169	0,4197
1170	0,5125	0,6	0,3375	0,1625	0,5694	0,5738	0,551	0,5536
1180	0,75	0,8875	0,413	0,075	0,8363	0,8419	0,798	0,8021
1190	1,6	1,65	0,6	0,0625	1,5875	1,572	1,4883	1,4898
1200	1,45	1,35	0,45	0,0132	1,325	1,296	1,2223	1,2193
1210	1,78	0,7102	0,161	0,0126	0,8967	0,7680	0,7046	0,6725
1220	1,2	0,55	0,629	0,0116	0,6839	0,6140	0,5352	0,5157
1230	0,55	0,3	0,0612	0,0112	0,3381	0,3058	0,2861	0,2786



а)



б)

Рис. 3. График зависимости спектральных коэффициентов пропускания от длины кюветы L для смеси АИ-92: а – график с длиной пути 1–100 мм; б – график с длиной пути 1–3 мм

Линия оптимума определяется по формуле (6), при этом значение коэффициента пропускания на каждой длине волны равно 0,37.

Рабочий диапазон пропускания спектрометров, в котором ошибка изменений минимальна, составляет 20–90 %. Поэтому длина кюветы при проведении количественного анализа

выбирается такой, чтобы значения коэффициентов пропускания бензинов с минимальным и максимальным содержанием анализируемого компонента не выходили за пределы рабочего интервала шкалы пропускания спектрометра.

Значение длины оптического пути кюветы, удовлетворяющее условию оптимума, составляет 3 мм.

Зная длину кюветы, находим коэффициент поглощения по формуле

$$k(\lambda_i) = -\frac{\ln \tau(\lambda_i)}{L}. \quad (7)$$

Определим спектральные коэффициенты поглощения $k(\lambda_i)$ для товарных бензинов, учитывая линию оптимума с длиной кюветы 3 мм (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициент поглощения бензинов при $L = 3$ мм

Длина волны, нм	$k(\lambda_i)$ А-80	$k(\lambda_i)$ АИ-92	$k(\lambda_i)$ АИ-95	$k(\lambda_i)$ АИ-98
1110	0,0017	0,0039	0,0257	0,0049
1120	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1130	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1140	0,0141	0,0148	0,0375	0,0173
1150	0,0228	0,0998	0,1840	0,0442
1160	0,0636	0,3169	0,5237	0,1245
1170	0,1663	1,1103	1,7760	0,3792
1180	0,3919	1,1246	1,1925	0,4962
1190	0,4196	0,4375	0,3123	0,4049
1200	0,5694	0,3489	0,1916	0,5194
1210	0,8363	0,4320	0,1310	0,7429
1220	1,5875	0,6569	0,1542	1,3984
1230	1,3250	0,5004	0,0881	1,1620

Отсюда следует, что потери, вносимые бензином в работу оптического тракта ИИС, будут лежать в диапазоне 0,78–2,78 дБ. Эта информация необходима для энергетического расчета оптического тракта ВОИУС.

Таким образом, определен теоретический расчет оптимальной длины пути кюветы, который показал хорошую сходимость теоретических и экспериментальных результатов исследования товарных бензинов и его компонентов. Наиболее оптимальная длина кюветы составляет 3 мм, при этом поглотится излучения, пройдя кювету, наполненную бензином, не более 9,3 %, а рабочий интервал коэффициентов пропускания спектрометра составит 0,3 – 1. В данном случае ошибка измерений будет составлять от 1,25 до 3,13 %, что позволит идентифицировать компоненты, определить состав и детонационную стойкость бензинов по спектральным коэффициентам поглощения компонентов и бензинов в режиме реального времени.

Заключение

В данной статье обоснована структура ИИС для оценки состава и детонационной стойкости топлива путем расчета оптимальной длины оптического пути кюветы. Результаты показали, что длина оптического пути кюветы не должна превышать 3 мм. В работе предложена математическая модель обработки спектров поглощения компонентов и бензинов, причем точность измерений и необходимая достоверность идентификации компонентов и точность определения состава бензинов будет определяться калибровкой измерительного канала ИИС [8]. Предлагаемая ИИС с проточными кюветами позволит в режиме реального времени управлять процессами смешения нефтепродуктов. В связи с этим были определены перспективные направления совершенствования информационно-измерительной системы (ИИС) для идентификации компонентов, определения состава и детонационной стойкости товарного топлива, которая в автоматизированном режиме будет анализировать спектры поглощения бензинов и его компонентов.

Библиографический список

1. *Bakeev, K. A. Process Analytical Technology* / K. A. Bakeev. – Blackwell Publishing Ltd, 2005. – 445 с.
2. *Куляс, М. О. Оптоэлектронные спектрометрические устройства измерения октанового числа бензинов* : дис. ... канд. техн. наук / Куляс М. О. – Самара, 2000. – 166 с.
3. *Щербакова, А. А. Промышленная система измерения спектральных коэффициентов поглощения бензинов в технологических линиях* / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев // *Науковедение*. – 2015. – Т. 7, № 3 (28). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN315.pdf>
4. *Щербакова, А. А. Информационно-измерительная система определения состава и октанового числа бензинов в промышленных условиях на основе параметрического квантового генератора* / А. А. Щербакова // *Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2015. – № 4 (14). – С. 38–42.
5. *Вечкасов, И. А. Приборы и методы анализа в ближней инфракрасной области* / И. А. Вечкасов, Н. А. Кручинин, А. И. Поляков, В. Ф. Резинкин. – Москва : Химия, 1977. – 280 с.
6. *Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач* / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1979. – 285 с.
7. *Веснин, В. Л. Характерные особенности спектров поглощения бинарных смесей углеводородов в области длин волн 1090–1240 нм на примере изооктана, n-гептана, толуола, бензола* / В. Л. Веснин, В. Г. Мурадов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2009. – Т. 11, № 3. – С. 29–32.
8. *Щербакова, А. А. Искусственная нейронная сеть для идентификации компонентов, определения состава топлива по спектральным коэффициентам поглощения* / А. А. Щербакова, В. А. Соловьев, Д. В. Артамонов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2015. – № 3 (35). – С. 36–45.

References

1. Bakeev K. A. *Process Analytical Technology*. Blackwell Publishing Ltd, 2005, 445 p.
2. Kulyas M. O. *Optoelektronnye spektrometricheskie ustroystva izmereniya oktanovogo chisla benzinov: dis. kand. tekhn. nauk* [Optoelectronic spectrometric devices for measuring the octane number of gasoline: dis. ... cand. tech. sciences]. Samara, 2000, 166 p. [In Russian]
3. Shcherbakova A. A., Solov'ev V. A. *Naukovedenie* [Science of science]. 2015, vol. 7, no. 3 (28). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/58TVN315.pdf> [In Russian]
4. Shcherbakova A. A. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 38–42. [In Russian]
5. Vechkasov I. A., Kruchinin N. A., Polyakov A. I., Rezinkin V. F. *Pribory i metody analiza v blizhney infrakrasnoy oblasti* [Instruments and methods of analysis in the near infrared]. Moscow: Khimiya, 1977, 280 p. [In Russian]
6. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
7. Vesnin V. L., Muradov V. G. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2009, vol. 11, no. 3, pp. 29–32. [In Russian]
8. Shcherbakova A. A., Solov'ev V. A., Artamonov D. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 3 (35), pp. 36–45. [In Russian]

Щербакова Анна Алексеевна

программист,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: anutka7790@mail.ru

Shcherbakova Anna Alekseevna

programmer,
sub-department of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Полосин Виталий Германович

доктор технических наук, профессор,
кафедра медицинской кибернетики
и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Polosin Vitalij Germanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of medical cybernetics and informatics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Морозова Мария Николаевна

инженер-электроник,
кандидат технических наук,
научно-технический центр – 2,
НПП «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)
E-mail: anutka7790@mail.ru

Morozova Mariya Nikolaevna

electronics engineer,
candidate of technical sciences,
scientific and technical center – 2,
NPP «Rubin»
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Щербакова, А. А. Расчет оптимальной длины оптического пути проточной кюветы в информационно-измерительной спектрометрической системе исследования бензинов / А. А. Щербакова, В. Г. Полосин, М. Н. Морозова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 14–22. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-2.