

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ПОЛИМЕТРИЧЕСКОГО
СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОНТРОЛИРУЕМЫХ СРЕД**

Жуков Ю.Д., Гордеев Б.Н., Зивенко А.В., Сливинский А.П.

Анотація

Розглядається метод визначення електрофізичних характеристик газоподібних, рідких і сипучих середовищ за допомогою формування та аналізу поліметричного сигналу. Запропонований підхід дозволяє оцінити електрофізичні параметри середовища при впливі температури, тиску і інших факторів впливу. В основі цього методу лежить можливість оцінки коефіцієнта заломлення і поглинання середовища за параметрами відбитих імпульсів поліметричного сигналу, шляхом розрахунків часових та амплітудних параметрів сигналу. Наведені оцінки коефіцієнта поглинання і діелектричної проникності на прикладі рідкої пропан-бутанової суміші.

Ключові слова: поліметричний сигнал, показник поглинання, заломлення, рефлектограмма.

Аннотация

Рассматривается метод определения электрофизических характеристик газообразных, жидких и сыпучих сред с помощью формирования и анализа полиметрического сигнала. Предложенный подход позволяет оценить электрофизические параметры при влиянии температуры, давления и других влияющих факторах. В основе этого метода лежит возможность оценок коэффициента преломления и поглощения среды по параметрам отраженных

импульсов полиметрических сигналов, путем учета временных и амплитудных параметров сигнала. Приведены оценки коэффициента поглощения и диэлектрической проницаемости на примере жидкой пропан-бутановой смеси.

Ключевые слова: полиметрический сигнал, показатель поглощения, преломления, рефлектограмма.

Abstract

The method for determining the electrical characteristics of the liquid, gaseous and granular materials using polymeric pulse signal. Proposed technique allows online estimation of the electrophysical parameters under the influence of various factors such as temperature, pressure and others. The basis of this method is the possibility of estimation of the refractive and absorption indexes using the parameters of the reflected pulses of the signal by taking into account time and amplitudes signal parameters. Estimates of the absorption coefficient and the dielectric constant for example liquid propane-butane are given.

Keywords: polymeric signal absorption coefficient, refractive index, reflectograms.

Введение. Измерение электрофизических параметров является важной промежуточной составляющей процесса оценки характеристик жидких и сыпучих сред. В полиметрических системах информация об электрофизических параметрах контролируемых сред используется для оценки количественных характеристик (толщины слоев), определения качественных характеристик продуктов влажности сыпучих продуктов, косвенной оценки октанового/цетанового чисел топлив, концентрации компонентов растворов, плотности жидких продуктов и т.п. [1-3]. Применяемый сегодня метод оценки диэлектрической проницаемости (или ее частотной зависимости) заключается в анализе полиметрических сигналов –

совокупности зондирующего и отраженных от неоднородностей (границы разделов сред) импульсов [4]. Такой подход обладает рядом недостатков: 1) точность оценки сильно зависит от выбора настроек алгоритма [5-6]: величины временных окон, начальных приближений и предположений; 2) стабильность работы сильно ограничена разрешающей способностью по частоте; 3) высокая ресурсоемкость алгоритма; 4) в расчет берутся только основные отраженные импульсы, а значит часть информации сигнала не применяется.

Целью работы является разработка сравнительно простого и устойчивого, менее ресурсоемкого алгоритма оценки электрофизических параметров сред, который может быть применен без операции предварительной настройки и калибровки каналов (или со значительным сокращением затрат на эти процедуры).

Изложение основного материала. Одним из способов формирования полиметрического сигнала является контактное зондирование среды с помощью коротких электромагнитных импульсов. Распространяясь вдоль линии специальной конструкции, погруженной полностью или частично в исследуемую среду, электромагнитный импульс отражается от неоднородностей волнового сопротивления (несмешиваемые «слои», имеющие различные физико-химические характеристики). Энергия излученного импульса частично затухает на протяжении распространения импульса, частично отражается от неоднородностей обратно к генератору/приёмнику. Зондирующий, отраженные и переотраженные импульсы формируют полиметрический сигнал – рефлектограмму или картину отражений. По положению импульсов на временной оси можно оценить расстояние между слоями, а информация о совокупности параметров отраженных импульсов (амплитуда, форма, протяженность и положение) содержит информацию о характере неоднородности волнового сопротивления, а значит и о электрофизических параметрах среды распространения импульса.

Рассмотрим распространение излученного импульса с амплитудой E_0 в средах 1 (газ) и 2 (жидкость). С возможностью последующего обобщения ограничимся рассмотрением девяти отраженных импульсов пришедших на вход приёмника в моменты времени $t_1 - t_9$, испытавших не более одного отражения на границе раздела двух сред, как это отображено на схеме рис. 1. Генератор/приемник импульсов и расположен на высоте L_1 над поверхностью раздела двух сред и L – общая длина линии.

С использованием коэффициентов Френеля для отраженных сигналов с нормированными амплитудами $\frac{E_i}{E_0} = a_i$ можно записать:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \exp(-2\alpha_1 L_1), \\
 a_2 &= \frac{4n_2 n_1}{(n_2 + n_1)^2} \exp(-2\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-2\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_3 &= -\frac{4n_2 n_1 (n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)^3} \exp(-2\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-4\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_4 &= \frac{4n_2 n_1 (n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)^3} \exp(-4\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-2\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_5 &= -\frac{16n_2^2 n_1^2}{(n_2 + n_1)^4} \exp(-4\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-4\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_6 &= \frac{16n_2^2 n_1^2 (n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)^5} \exp(-4\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-6\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_7 &= -\frac{64n_2^4 n_1^4 (n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)^7} \exp(-6\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-4\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_8 &= \frac{64n_2^4 n_1^4}{(n_2 + n_1)^6} \exp(-6\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-6\alpha_2 (L - L_1)], \\
 a_9 &= \frac{64n_2^4 n_1^4 (n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)^7} \exp(-8\alpha_1 L_1) \cdot \exp[-6\alpha_2 (L - L_1)].
 \end{aligned} \tag{1}$$

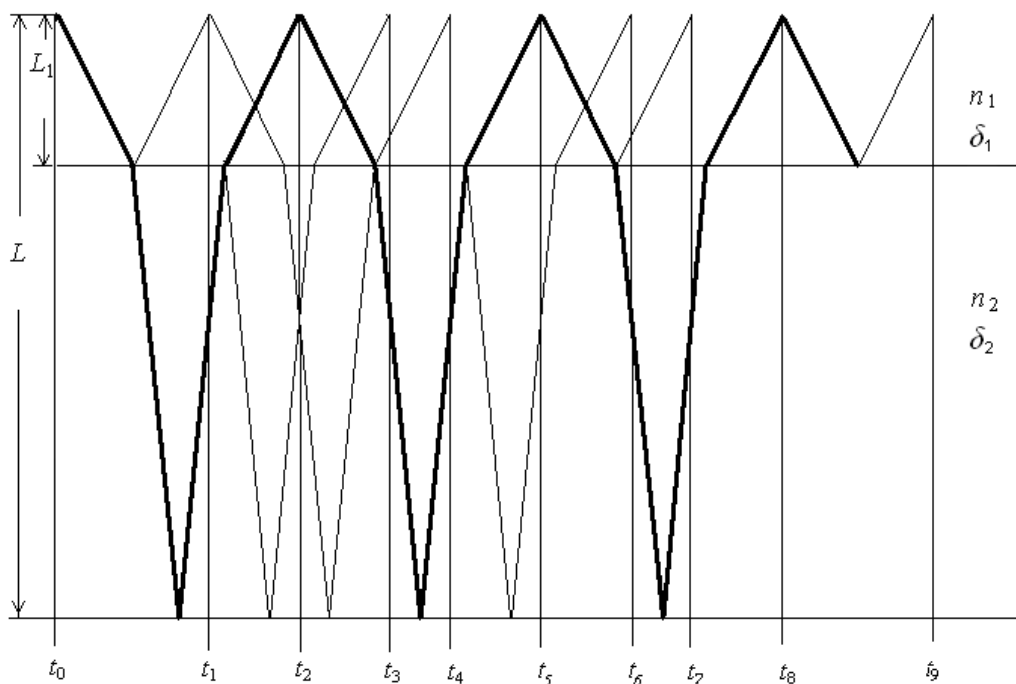


Рис. 1. Условная схема для пояснения формирования сигнала для случая

$$L_1 < L - L_1 \text{ (лучевая модель распространения)}$$

Здесь $\alpha_{1,2}$ коэффициенты погонного затухания энергии импульса на длинах кратных L_1 , либо $L - L_1$ и L — длина линии. Знак коэффициент обусловлен изменением на фазы коэффициента Френеля для отраженной волны. На рис. 1 для сред с относительно низкими значениями показателей преломления n_1 и n_2 траектория с доминирующей энергетикой выделена жирной линией. Далее для удобства анализа во всех случаях отношения $\frac{E_{ii}}{E_0} = a_i$ приводятся по величине модуля, вводятся обозначения $x = \exp(-2\alpha_1 L_1)$, $y = \exp[-2\alpha_2 (L - L_1)]$ и исключается x с использованием первого уравнения системы (1). В результате получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} x, \\ a_2 &= \frac{4n_2 n_1 a_1}{(n_2^2 - n_1^2)} y, \end{aligned} \tag{2}$$

$$a_3 = \frac{4n_2 n_1 a_1}{(n_2 + n_1)^2} y^2,$$

$$a_4 = \frac{4n_2 n_1 a_1^2}{(n_2^2 - n_1^2)} y,$$

$$a_5 = \frac{16n_2^2 n_1^2 a_1^2}{(n_2^2 - n_1^2)^2} y^2,$$

$$a_6 = \frac{16n_2^2 n_1^2 a_1^2}{(n_2 + n_1)^3 (n_2 - n_1)} y^3,$$

$$a_7 = \frac{64n_2^4 n_1^4 a_1^3}{(n_2 + n_1)^4 (n_2 - n_1)^2} y^2,$$

$$a_8 = \frac{64n_2^4 n_1^4 a_1^3}{(n_2 + n_1)(n_2 - n_1)^3} y^3,$$

$$a_9 = \frac{64n_2^4 n_1^4 a_1^4}{(n_2 + n_1)^3 (n_2 - n_1)^3} y^3.$$

Из второго и третьего уравнений системы (2) следует линейная связь между n_1 и n_2 :

$$n_2 = b n_1, \quad (3)$$

где $b = 1 + 2p \pm 2\sqrt{p + p^2}$ и $p = \frac{a_1 a_3}{a_2^2}$.

Из второго и четвертого уравнений системы (2) следует связь линейная СВЯЗЬ:

$$a_4 = a_1 a_2. \quad (4)$$

Из второго и пятого уравнений системы (2) следует связь:

$$a_5 = a_2^2. \quad (5)$$

Из четвертого и пятого уравнений системы (2) следует:

$$a_4^2 = a_5 a_1^2. \quad (6)$$

Из второго третьего и шестого уравнений системы (2) следует:

$$a_2 a_3 = a_6.$$

Из седьмого и пятого уравнений системы (2) следует линейная связь между n_1 и n_2 . Из восьмого и девятого уравнений системы (2) следует:

$$a_9 = a_1 a_8.$$

Согласно рис. 1, моменты времени прихода отраженных импульсов на вход приёмника вычисляются по схеме, в основе которой лежат два опорных времени t_1 и t_2 из которых могут быть определены все остальные временные промежутки:

$$t_3 = 2t_2 - t_1; \quad t_4 = t_2 + t_1; \quad t_5 = 2t_2; \quad t_6 = 3t_2 - t_1; \quad t_7 = 2t_2 + t_1; \quad t_8 = 3t_2; \quad t_9 = 3t_2 + t_1; \quad (7)$$

Анализ экспериментальных сигналов

Выражение (7) позволяет идентифицировать положения импульсов на временной оси. На рис.2 представлен сигнал, полученный в ходе эксперимента при котором $L_1 < L - L_1$ (в качестве среды выступает пропан-бутановая смесь).

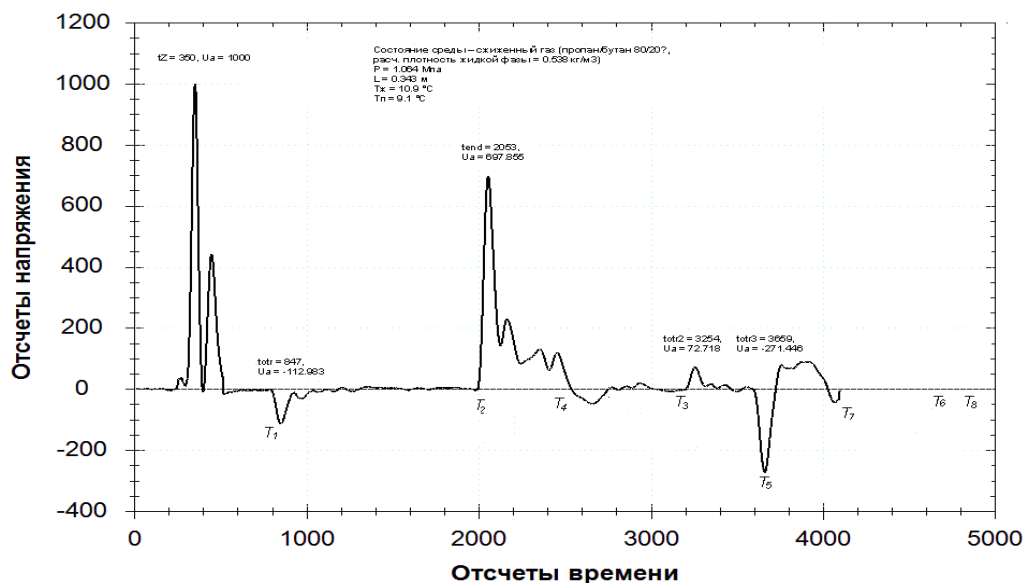


Рис. 2. Экспериментальный сигнал для случая $L_1 < L - L_1$.

Последовательность моментов прихода импульсов на вход приёмника на рис. 2 расставлена в соответствии со схемой (7). Согласно рис.2 можно идентифицировать последовательность моментов прихода импульсов на

приёмник по крайней мере для трёх импульсов a_1 , a_2 и a_5 . На рис. 3, представлен сигнал для случая $L_1 > L - L_1$.

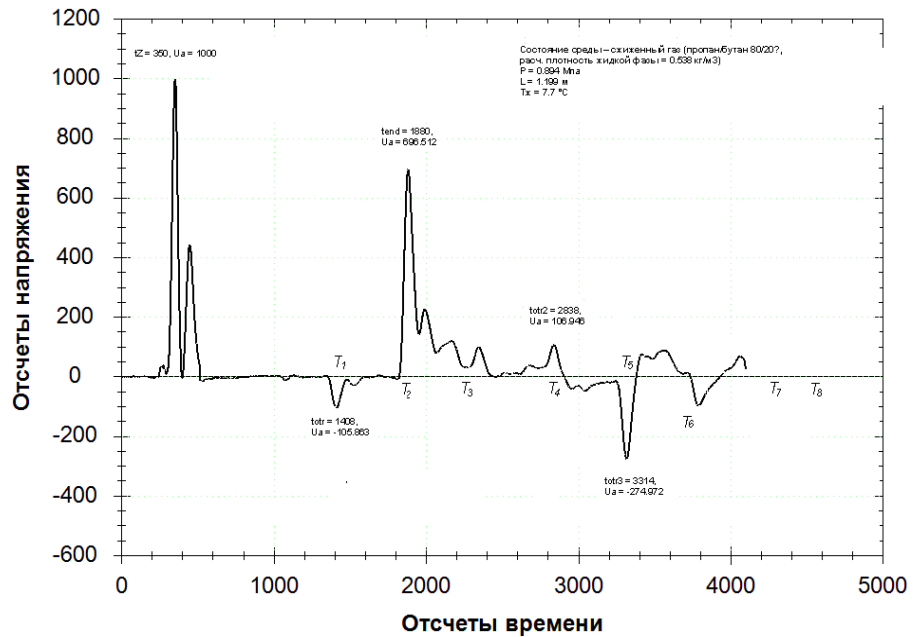


Рис. 3. Экспериментальный сигнал для случая $L_1 > L - L_1$.

По рис. 3 может быть идентифицирована последовательности времён прихода импульсов на приёмник по основным трём импульсам a_1 , a_2 и a_5 . На рис. 4 приведена рефлектограмма для случая $L_1 \geq L - L_1$.

По рис. 4 также можно идентифицировать последовательность моментов прихода отраженных импульсов на приёмник по основным трём импульсам a_1 , a_2 и a_5 . Необходимо отметить, что при сравнении временных промежутков, согласно с данными рис. 2–4, при фиксации моментов t_2 и t_5 по положениям вершин импульсов не выполняется равенство $t_5 = 2t_2$, как это должно быть в соответствии с (7). В этом случае $t_5 < 2t_2$. Равенство $t_5 = 2t_2$ выполняется только в том случае, если момент t_2 отсчитывается от основания переднего фронта зондирующего импульса a_0 до основания переднего фронта импульса a_2 . При этом условии момент t_5 приходится также на основание переднего фронта импульса a_5 . Для восстановления корректности расчета временных промежутков по положениям максимумов амплитуд a_2 и a_5 необходимо учитывать указанное обстоятельство.

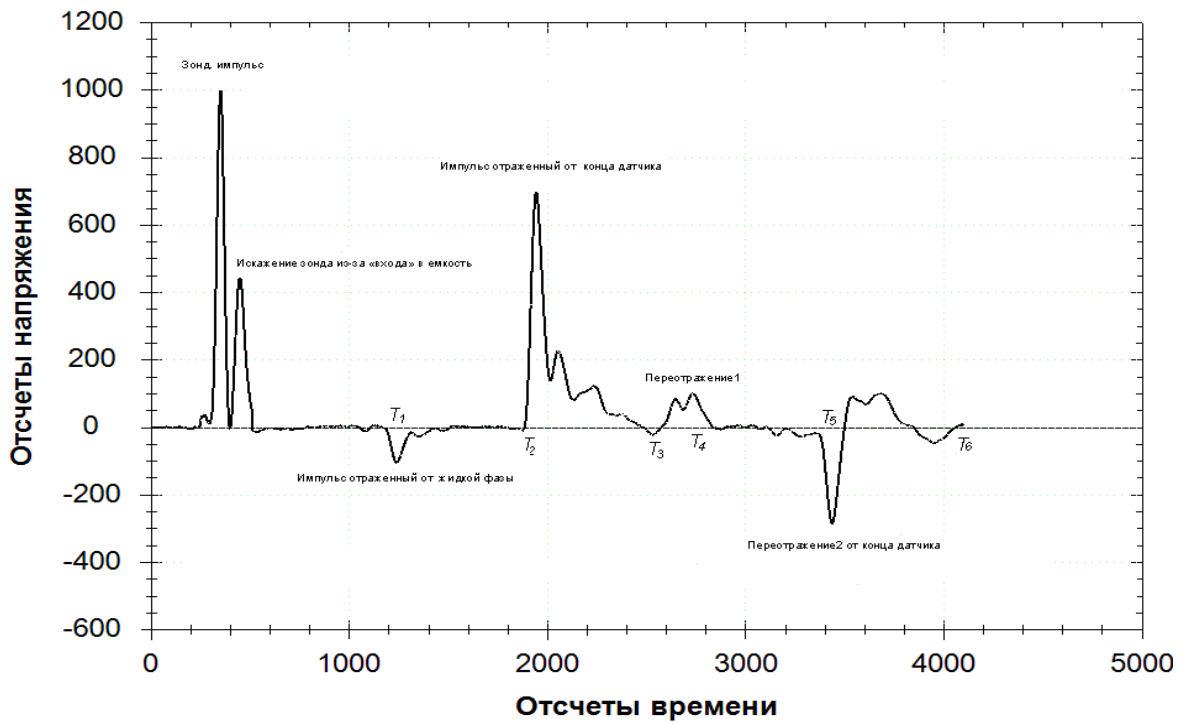


Рис. 4. Экспериментальный сигнал для случая $L_1 \geq L - L_1$.

Рассмотрим далее соответствие теоретических и экспериментальных оценок энергетических параметров. Наиболее устойчивыми наблюдаемыми амплитудами во всех трёх экспериментальных реализациях служат амплитуды a_1 , a_2 и a_5 . Наиболее легко проверить выполнение соотношения (5) $a_5 = a_2^2$, которое может служить инвариантом. По данным, представленным на рис. 2 $a_2^2 \approx 0,48$, $a_5 \approx 0,27$, следовательно, предполагаемые не учитываемые потери амплитуды a_5 составляют $0,27/0,48 \approx 0,56$. По данным представленным на рис. 3 $a_2^2 \approx 0,49$, $a_5 \approx 0,28$, следовательно, предполагаемые не учитываемые потери составляют $0,28/0,49 \approx 0,57$, следовательно a_5 испытывает потери $\sim 0,57$. По данным рис. 4 $a_2^2 \approx 0,49$, $a_5 \approx 0,28$, следовательно, не учитываемые потери составляют $0,28/0,49 \approx 0,57$. Таким образом, не учитываемые потери амплитуды a_5 , составляют величину $\approx 0,57$. Формирование сигнала a_5 , в отличие от a_1 и a_2 , происходит предположительно за счёт отражения от платы приёмника, что может обуславливать дополнительные не учитываемые потери. Отдельно следует отметить, что при идентификации амплитуд, в соответствии с данными представленными на рис. 1, на вход приёмника a_4

приходит по двум независимым путям, что должно приводить к её удвоению. Следовательно, в условиях применения амплитуды a_4 в расчетах этот факт необходимо учитывать.

Пример оценки электрофизических параметров

В реальных условиях при уверенном выделении трёх импульсов среди предполагаемых пяти, с амплитудами $a_1 - a_5$, линейная связь (3) позволяет выразить через неизвестные x и y , ответственные за погонное затухание в средах 1 и 2. Из первых двух уравнений системы (2), с использованием (3), получим:

$$x = a_1 \frac{b+1}{b-1}, \quad y = a_2 \frac{b^2-1}{4ba_1}. \quad (8)$$

В прикладных целях может оказаться удобным использование следующих форм для x и y . Так как $L_1 = ct_1/2n_1$, то $\exp(-2\alpha_1 L_1) = \exp(-\alpha_1 ct_1/n_1)$, а $\exp(-2\alpha_2 (L - L_1)) = \exp(-\alpha_2 c(t_2 - t_1)/n_2)$, или $x = \exp\left[-\frac{\delta_1 \omega t_1}{n_1}\right]$ и $y = \exp\left[-\frac{\delta_2 \omega (t_2 - t_1)}{n_2}\right]$, где $\omega = 2\pi f$ - центральная частота группового пакета волн.

Если предположить, что с наперёд заданной точностью для воздушной среды 1 выполняется равенство $n_1 \approx 1$, $\alpha_1 \approx 0$, что можно допустить для случая, когда L_1 значительно меньше $L - L_1$, тогда из первого уравнения системы (1) получим:

$$n_2 \cong \frac{1+a_1}{1-a_1} \quad (9)$$

Выражение (9) с учетом указанных предположений позволяет определить коэффициент погонного затухания α_2 , либо связанный с ним показатель поглощения δ_2 . Из второго уравнения системы (1) $a_2 = \frac{4n_2 n_1 a_1}{(n_2^2 - n_1^2)} \exp[-2\alpha_2(L-L_1)] = (1-a_1^2) \cdot \exp[-2\alpha_2(L-L_1)]$, откуда с использованием (9):

$$a_2 = \frac{\ln \frac{1-a_1^2}{a_2}}{2(L-L_1)} \quad (10)$$

В частности, в соответствии с экспериментальными данными, представленными на рисунке 2, для жидкой смеси пропан-бутана для погонного затухания α_2 получим:

$$\alpha_2 \approx \frac{0,174}{(L-L_1)} \approx 0,0067 \text{ см}^{-1}. \quad (11)$$

Коэффициент поглощения δ_2 связан с погонным затуханием соотношением $\delta_2 = \frac{c}{\omega} \alpha_2$ (где центральная частота группового пакета $f \approx 10^9$ Гц), откуда имеем:

$$\delta_2 \approx 0,032.$$

С другой стороны погонное затухание связано с проводимостью $\sigma_2 = \frac{cn_2\alpha_2}{2\pi}$. Используя оценку (11), а также оценку (9) $n_2 = 1,254$ для проводимости получим:

$$\sigma_2 \approx 4 \cdot 10^7 \text{ См см}^{-1}.$$

Аналогичная процедура проведенная для смеси пропан-бутан с $a_1 = 0,105$, $a_2 = 0,696$, $L = 112$ см, $n_2 = 1,2346$ и отличными термодинамическими параметрами представленными на рис. 5 привела к следующим оценкам затухания и проводимости:

$$\alpha_2 \approx \frac{0,174}{(L-L_1)} \approx 0,0043 \text{ см}^{-1}, \delta_2 \approx 0,02 \text{ и } \sigma_2 \approx 2,5 \cdot 10^7 \text{ См см}^{-1}.$$

Выводы. Предлагаемый метод позволяет оперативно оценивать электрофизические характеристики газообразных, жидких и сыпучих сред используя расчет временных параметров импульсов и их амплитуд. Важными, требующими отдельной проработки вопросами, являются вопросы выбора начальных приближений и анализа траекторий лучей при формировании полиметрического сигнала, а также расчет координат начала импульсов.

Литература

1. Полиметрические системы: теория и практика : Монография [Текст] / Ю.Д. Жуков, Б.Н. Гордеев, А.В. Зивенко, А.Ю. Грешнов, О.А. Зимина, В.Н. Чегринцев, Е.О. Пришепов; под ред. Ю. Д. Жукова. – Николаев : Атолл, 2013. – 382 с. : илл., табл.
2. Б.В. Скворцов, Е.А. Силов. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 11, №5, 2009, с. 64-71.
3. Zhukov Yuriy Polymetric method of operational control of qualitative and quantitative characteristics of aviation fuels [Text] / Yuriy D. Zhukov, Boris N. Gordeev, Alexey V. Zivenko, V.M. Ilchenko // The fifth world congress “Aviation in the XXI century”. Safety in Aviation And Space Technologies. September 25-27, Kyiv - 2012. - pp. 1.9.71–1.9.73.
4. Жуков Ю. Д. Математическая модель полиметрии спиртоводных растворов [Текст] // Жуков Ю. Д., Зивенко А. В. / Вісник Національного університету кораблебудування загальний за 2011 рік. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 404 – 412.
5. Жуков Ю. Д. Оперативная оценка спектра диэлектрической проницаемости в полиметрических системах [Текст] / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко // Вісник Національного університету кораблебудування за 2010 рік. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 320 – 324.
6. Гордеев Б. Н. Алгоритм калибровки полиметрической системы на основе спектров электрофизических параметров жидких сред [Текст] / Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2010. – № 2 (431). – С. 112 – 117.