

УДК 621.396.6:621.317.1/.3-024.87-047.27](045)

# Дистанционная температурная радиометрическая идентификация жидкостей

Павлюченко А. В.<sup>1</sup>, Лошмужий П. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский центр “Айсберг”, г. Киев

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

E-mail: andy\_pavluchenko@ukr.net

Рассматривается возможность использования радиометрических измерений в миллиметровом диапазоне длин волн, для дистанционной идентификации и аутентификации жидкостей, находящихся в герметически закрытой диэлектрической таре. Исследуются температурные зависимости тепловых портретов и их характерные особенности для различных типов жидкостей, находящихся в разных тарах. Разработанная методика позволяет получить тепловые портреты жидкостей и сравнивая их с имеющимися эталонными образцами жидкостей в различных видах тары позволяет провести их идентификацию при нормальных климатических условиях. Методика позволяет дистанционно обнаруживать взрывоопасные и огнеопасные жидкости в диэлектрической таре и отличать их от неопасных жидкостей. Экспериментально показана возможность дистанционно различать жидкости по изменениям их температурных тепловых портретов, получаемых радиометрическими методами в 8-ми мм диапазоне длин волн. Различия в физико-химических свойствах жидкостей приводят к изменению их тепловых портретов, которые отчетливо фиксируются.

*Ключевые слова:* радиометрическая система; тепловой портрет; поляризация электромагнитной волны; диэлектрическая тара; водные растворы; продукты нефтепереработки.

DOI: [10.20535/RADAP.2019.76.44-57](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.44-57)

## Введение

Для определения параметров жидкостей, в зависимости от конкретных условий и требований, разработаны и используются различные методы измерений и приборы [1–5]. Эти методы измерения чаще всего основаны на изменениях, которые происходят с заданным зондирующим сигналом при его взаимодействии с измеряемой жидкостью.

Большинство этих методов не могут быть использованы или приспособлены для дистанционного анализа жидкостей, из-за невозможности реализации непосредственного взаимодействия измеряемого раствора с измерительной аппаратурой. Задача еще более усложняется, если жидкость или раствор находится в закрытой диэлектрической емкости (таре). В литературе встречаются единичные работы, посвященные данному вопросу [6].

Для бесконтактной диагностики жидких сред необходима разработка совершенно нового метода измерения физико-химических свойств жидкостей. В методе определения свойств жидкостей целесообразно использовать собственные спонтанные колебания жидкостей, которые являются результатом взаимодействия молекул раствора между собой при наличии броуновского движения. Спонтанные колебания молекул сами могут являться случайным

(стохастическим) зондирующим сигналом, измерения изменений которых связаны с параметрами исследуемой жидкости. Эти измерения оказываются возможными или в легко доступной промежуточной среде между аппаратурой и объектом исследования, или дистанционно, методом радиолокации [7–9]. Под радиолокацией здесь подразумевается идентификация объектов, основанная главным образом на приеме их собственного или отраженного сигнала излучения. В настоящей работе использован термин радиометрия, который понимается в значении микроволновая радиометрия в ближней радиолокации. При температуре выше абсолютного нуля для любого физического объекта, его атомы или молекулы совершают собственные спонтанные колебания, которые трансформируются в электромагнитные колебания теплового излучения. Эти излучения зависят не только от абсолютной температуры тела, но и от свойств самого тела и его взаимодействием, в том числе и тепловым, с окружающей средой. При этом эффективная температура объекта выделяется на соответствующем фоне, и если контрастности недостаточно, как в случае замкнутых пространств, используют “подсветку” с целью увеличения эффективной температуры исследуемого объекта [8].

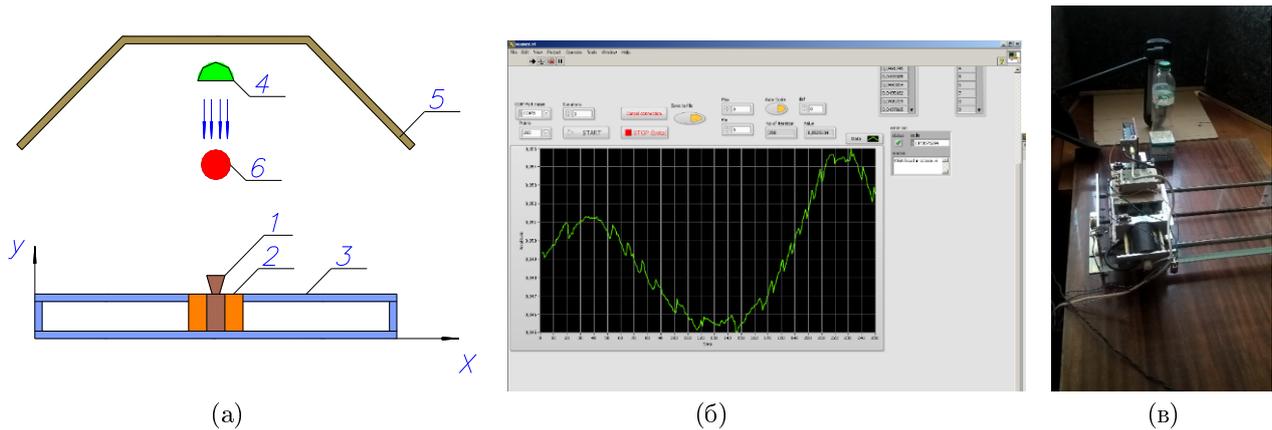


Рис. 1. Радиометрическая измерительная установка. а) схема: 1 — приемник; 2 — платформа; 3 — направляющие; 4 — ИШП; 5 — поглощающий материал; 6 — тара с жидкостью; б) графический интерфейс измерительной установки с ТП объекта исследований; в) фото измерительной установки.

Уровень теплового излучения объекта задается произведением его излучательной способности на функцию черного тела Планка, соответствующую его температуре. Коэффициент излучения изменяется от нуля (для объектов, полностью отражающих) до единицы (для объектов, которые не имеют отражения). Уровень спектрального излучения задается функцией черного тела Планка, в единицах мощности (Ватт) на площадь излучающей поверхности при температуре  $T$ , на стерадиан пространства, на единицу ширины полосы излучения (в обеих поляризациях), на длине волны  $\lambda$ , равен:

$$I(T, \lambda) = \frac{2hf}{\lambda^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота излучения;  $\lambda$  — длина волны;  $c$  — скорость света,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана [10]. Когда тепловая энергия источника ( $kT$ ) значительно больше энергии фотона ( $hf$ ), приведенное выше уравнение упрощается до формулы Рэлея-Джинса, а именно:

$$I(T, \lambda) = \frac{2kT}{\lambda^2}. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для большинства наземных источников, имеющих частоты значительно ниже так называемой частоты дискриминации, определяемой выражением  $hf = kT$ , что соответствует длине волны 10 микрон для источников, имеющих температуру окружающей среды. Этот режим включает в себя терагерцовый, субмиллиметровый, миллиметровый диапазоны и более низкие частотные диапазоны. В работе для проведения исследований используется 8-ми миллиметровый (мм) диапазон длин волн. Для достижения наилучшего возможного пространственного разрешения для радиометра выбирается режим дифракции нулевого порядка. Наивысшая эффективность получаемых результатов достигается за счет перехода к одной

поляризации. В этих условиях мощность электромагнитной волны (ЭМВ), принимаемая приемником, определяется выражением:

$$P(T, BRF) = kTBRF,$$

где  $BRF$  — полоса частот приемника. Эта мощность не зависит от частоты принимаемого излучения, так как она представляет мощность, полученную в одном режиме работы приемника [10].

Целью данной работы является возможность получения и исследования статических температурных зависимостей тепловых портретов (ТП) и определение их характерных особенностей, получаемых радиометрическими методами для дистанционной идентификации жидкостей, находящихся в различных видах тары.

## 1 Методика экспериментальных исследований

Исследования проводились с помощью измерительной установки методами, описанными в [8, 9]. В работе использован малошумящий широкополосный приемник прямого усиления с рупорной антенной в 8-ми мм диапазоне длин волн. Приемник обеспечивает флуктуационную чувствительность  $2,4 \cdot 10^{-20}$  Вт/Гц в рабочей полосе частот 30-37 ГГц и коэффициенте усиления линейной части приемника не менее 55дБ. Схема измерительной установки показана на рис. 1 а. На рисунке показан приемник с антенной 8-мм диапазона длин волн 1 и источник шумового излучения (подсвечивания) 4. Приемник установлен на платформе 2, которая перемещается по направляющим 3 в двух взаимно перпендикулярных направлениях. С целью проведения поляризационных радиометрических измерений приемник имеет возможность поворачиваться относительно оси на  $90^\circ$ . Ось тары с жидкостью 6, располагалась вертикально — перпендикулярно фронту распространения электромагнитной волны.

Радиометрические измерения проводятся в экранированном боксе, стенки которого покрыты поглощающим материалом 5. Измеренное значение коэффициента поглощения для используемого материала составляло величину не менее 35 дБ в рабочем диапазоне частот. Исследования проводились в замкнутом объеме (лаборатории), где нет естественных источников, обеспечивающих необходимый радиояркий контраст объектов, поэтому радиометрическая измерительная установка содержит источники шумовой подсветки (ИШП) [11]. В качестве ИШП использована настольная энергосберегающая люминесцентная лампа. Уровень подсвечивающего шумового излучения в экспериментах составляет величину  $20 \text{ дБ}/kT_0$  в рабочем частотном диапазоне. При проведении экспериментов баллоны энергосберегающей лампы располагались вертикально. Поляризация излучения принципиально зависит от наличия отражателя. Наличие металлического отражателя изменяет плоскость поляризации генерируемого излучения, перекрывающего рабочий диапазон частот используемого канала приема [8].

Перед началом измерений приемник калибровался по радиотепловому фону — радиояркой температуре поглощающего материала. Для учета различных дестабилизирующих факторов калибровки осуществлялись в начале, конце и в течение измерений. Расстояние между панелями с поглощающим материалом и антенной приемника составляет  $L = 300$  мм. Измерения проводились температуре окружающей среды  $+(20 \dots 27)^\circ\text{C}$ .

Исследуемые жидкости были в герметичных емкостях (бутылках) серийного производства объемом  $0,33 \text{ дм}^3$ . Емкости изготовлены из пластика и стекла зеленого цвета. Диэлектрическая проницаемость для стеклянных емкостей [9] находится в диапазоне  $\epsilon \approx 16$ . Диэлектрическая проницаемость для пластиковых емкостей находится в диапазоне  $\epsilon = 2,4 \dots 3$ . Разброс величины диэлектрической проницаемости связан с процентным содержанием различных добавок, применяемых при производстве стекла. Толщина стенок пластиковых емкостей составляла величину  $0,3 \dots 0,5$  мм. Толщина стенок стеклянных емкостей составляла величину  $1,5 \dots 3$  мм. Наружный диаметр емкостей был в диапазоне  $50 \dots 52$  мм, высота  $200$  мм.

Исследуемые жидкости условно разделены на группы: к первой группе относятся водные и спиртовые растворы, ко второй группе продукты нефтепереработки — бензин, ДТ, растворители. 8-ми мм частотный диапазон выбран с целью минимизации ошибок в процессе измерений связанных с позиционированием объектов исследования и люфтов. Точность позиционирования объектов исследования и люфты перемещения кареток сканера не превышали величину  $0,5$  мм.

Измерительная установка автоматизирована. Графический интерфейс представлен на рис. 1б, а

фото экспериментальной измерительной установки на рис. 1в. В каждой точке области сканирования производится три измерения принятого сигнала, затем эти значения усредняются, записываются в файл выходных данных и отображается в виде точки на графике в квазиреальном масштабе времени. Полное время линейного сканирования и получения выходных экспериментальных данных составило  $42$  секунды. Среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных в экспериментах не превышало величину  $3,6\%$ .

## 2 Радиотепловой портрет объектов

Для описания линейной однородной изотропной среды [10] обычно вводят следующие основные параметры среды: комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , комплексная магнитная проницаемость  $\mu = \mu' - j\mu''$  и комплексная проводимость  $\sigma = \sigma' - j\sigma''$ . Параметры  $\sigma$  и  $\epsilon$  появляются в сочетании:

$$\sigma + j\epsilon\omega = \sigma' + \omega\epsilon'' + j\omega\left(\epsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}\right) = \sigma_e + j\omega\epsilon_e.$$

Приведенное уравнение определяет вещественную эквивалентную проводимость:  $\sigma_e \equiv \sigma' + \omega\epsilon''$  и вещественную эквивалентную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_e = \epsilon' - \sigma''/\omega$ . Иногда удобно ввести комплексную эквивалентную диэлектрическую проницаемость

$$\tilde{\epsilon} \equiv \epsilon - \frac{j\sigma}{\omega} = \epsilon_e - \frac{j\sigma_e}{\omega} = \epsilon_e(1 - jp_e),$$

где  $p_e = \frac{\sigma_e}{\omega\epsilon_e} = \frac{\sigma' + \omega\epsilon''}{\omega\epsilon' - \sigma''}$  — тангенс угла потерь.

Различия в диапазонах волн (радиодиазоны и оптические), не вносит принципиальных отличий в формулы, так как размеры систем намного больше длины волны. Используемые диэлектрические емкости имели цилиндрическую форму внутри которых находились исследуемые жидкости, следовательно, для анализа возможно рассматривать эти емкости как многослойные цилиндрические линзы [12]. Устройство подсветки здесь следует рассматривать как облучатель линзы. В оптике поведение материала выражают в значениях комплексного показателя преломления  $\tilde{n}$ , составляющие которого  $n$  и  $jk$  — коэффициент поглощения, удовлетворяют соотношениям:

$$\begin{aligned}\epsilon' - j\epsilon'' &= (n - jk)^2, \\ \epsilon' &= n^2 - k^2, \\ \epsilon'' &= 2nk.\end{aligned}$$

Различные значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь тары и жидкости

приводят к изменению коэффициентов прохождения, отражения и преломления рассматриваемых многослойных структур. В зависимости от материала тары часть энергии будет отражаться обратно в сторону облучателя. В общем случае коэффициент прохождения ЭМВ через многослойную диэлектрическую структуру может быть выражен через коэффициент преломления следующим образом [13]:

$$\tau = \frac{4n(\rho)}{[1 + n(\rho)]^2},$$

таким образом, реальное распределение энергии в раскрыве линзы  $Q(\rho)$  имеет вид:

$$Q(\rho) = P(\Theta) \cdot (4n(\rho) \cos^2(\Theta/2))/[1 + n(\rho)]^2,$$

где  $P(\Theta)$  — диаграмма направленности облучателя линзы;  $Q(\rho)$  — распределение энергии в ее раскрыве;  $\Theta$  — угол выхода луча из облучателя.

Универсальные параметры для жидкости, измеряемые в диапазоне частот, такие как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь, не являются наглядными и их изменения от жидкости к жидкости не значительны. Более удобной и наглядной является запись дифракционной зависимости температуры, излучаемой, поглощаемой или переизлучаемой емкостью с исследуемой жидкостью — ТП объекта. Используемый в работе метод является разновидностью радиометрического метода измерений температуры антенной с синтезированной апертурой [9].

При линейном радиометрическом сканировании [9] ИШП фиксирован в одной точке пространства и расположен перпендикулярно горизонтальной оси сканирования, а приемник перемещается с помощью 2D сканера в соответствующей плоскости. Радиометрический приемник измерял количество энергии ЭМВ прошедшей сквозь исследуемый объект в полуплоскости, в которой он находится. В работе использована диэлектрическая тара, сохраняющая форму цилиндра от основания до расстояния, соответствующего 70 % по высоте, при сканировании использована эта часть тары. Следовательно, с точки зрения геометрической оптики, тару с жидкостью можно рассматривать как двухслойную диэлектрическую линзу [13]. Цилиндрическая линза дает зеркальное изображение объекта, вертикальные размеры которого сохраняются, а падающие, прошедшие и отраженные лучи подчиняются законам геометрической оптики, связанные с диэлектрическими проницаемостями жидкости и тары, следовательно, появляется возможность различать параметры исследуемых жидкостей.

Для рассматриваемой модели считаем, что внешнее, по отношению к таре, пространство имеет минимальное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1 \approx 1$ , а диэлектрические проницаемости тары  $\varepsilon_2$  и исследуемой жидкости  $\varepsilon_3$  могут иметь

различные значения. При этом выполняются законы Снелля для отраженных и преломленных лучей [12]:

$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &= \sin \theta_0; \\ k_2 \sin \theta_0 &= k_1 \sin \theta_0, \end{aligned}$$

где  $\theta_0$  — угол падения;  $\theta_1$  — угол преломления;  $\theta_2$  — угол отражения;  $k_1$  — волновое число преломленного луча;  $k_2$  — волновое число падающего луча.

Формулы Френеля, выражающие электрические и магнитные вектора преломленной и отраженной волны через амплитуду падающей волны, не так просты, так как если одна из сред является проводящей, то угол  $\theta_1$  будет комплексным, следовательно,  $\theta_1$  может быть комплексным даже в том случае, если обе среды являются диэлектриками.

При крайне малых проводимостях сред, т.е. среды прозрачны, закон Снелля можно записать в виде:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_0} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} = n_{12},$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — диэлектрические проницаемости сред;  $n_{12}$  — относительный показатель преломления сред.

Если  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ , то  $n_{12} < 1$ , и каждому углу падения  $\theta_0$  соответствует действительный угол преломления  $\theta_1$ . В случае  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ , то есть ЭМВ распространяется из среды более плотной в среду менее плотную и слабо поглощающую, тогда  $\theta_1$  действительно только для тех  $\theta_0$ , для которых выполняется условие  $n_{12} \sin \theta_0 \leq 1$ . При условии  $n_{12} \sin \theta_0 > 1$  возникает явление полного отражения, не наблюдается преломление луча, то есть энергия ЭМВ как бы скользит по пограничному слою и возвращается в первую среду. Минимальный (предельный) угол падения, при котором не наблюдается преломленного луча, определяется соотношением [12]:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = n_2/n_1 = n,$$

где  $n_1 < 1$ ,  $\alpha_{\text{пр}}$  — предельный угол наблюдения объекта. Ход лучей в двухслойной диэлектрической линзе представлен на рис. 2.

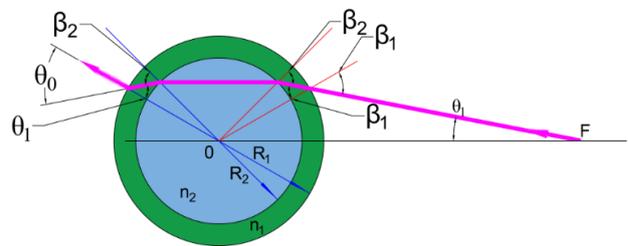


Рис. 2. Ход лучей в двухслойной диэлектрической линзе [12].

Горизонтальное сечение тары рис. 2 представляет собой линзу радиусом  $R_1$  с фокусом, расположенным вне линзы в точке  $F$  с координатам  $(R_0, 0)$ . Внутренний радиус тары с жидкостью обозначен через  $R_2$  и имеет коэффициентом преломления  $n_2$ .

Внешний радиус тары совпадает с радиусом линзы и равен  $R_1$ , а коэффициент преломления —  $n_1$ .  $\theta_1$  — угол выхода луча из фокуса, в котором находится ИШП. Углы падения обозначим  $\beta_i$ , углы преломления —  $\beta'_i$ , тогда основные расчетные формулы для двухслойной линзы согласно [13] представляются как:

$$\begin{aligned}\sin \beta_1 &= \frac{R_0}{R_1} \sin \theta_1, & \sin \beta_2 &= \frac{R_0}{R_2 n_1} \sin \theta_1, \\ \sin \beta'_1 &= \frac{R_0}{R_1 n_1} \sin \theta_1, & \sin \beta'_2 &= \frac{R_0}{R_2 n_2} \sin \theta_1, \\ \Psi &= 2(\beta_1 + \beta_2 - \beta'_1 - \beta'_2) - \Theta_1.\end{aligned}$$

Лучи, пересекающие оба слоя линзы, выходят из точки  $F$  под углом:

$$0 < \theta_1 < \arcsin \frac{R_2 n_1}{R_0}.$$

Полный угол облучения линзы равен:

$$\theta_{1max} = \arcsin \frac{R_1}{R_0}.$$

Ордината точки выхода луча из линзы определяется как:

$$y = R_1 \sin(\beta - \Psi),$$

где  $\Psi$  — угол, образуемый выходящим из линзы лучом и осью  $x$ .

Следовательно, структура ТП представляет собой пространственное распределение амплитуд принимаемого сигнала со стороны расположения ИШП, прошедшего сигнала (если он не поглотился) и отраженного от тары сигнала. При углах падения луча касательно к внутренней поверхности тары (при выходе из тары), волны распространяются вблизи изогнутых границ раздела двух сред, на выпуклой поверхности тары образуются колебания, которые на ТП отражаются как высокочастотные колебания малой амплитуды [14, 15].

При температуре жидкости и тары значительно отличающейся (ниже) от температуры окружающей среды, на поверхности тары образуется дополнительный тонкий диэлектрический слой — иней или роса. Это обстоятельство приводит к изменениям свойств линзы, она становится трехслойной, и, следовательно, ТП исследуемых образцов изменяются. На ТП в плоскости сканирования для ЭМВ, прошедшей сквозь многослойную диэлектрическую линзу наблюдается дифракция. Дифракционные процессы, возникающие при исследованиях жидкостей, находящихся в диэлектрической таре, иллюстрируются восстановленной 3D картиной сцены эксперимента для принимаемого сигнала (рис. 3). Эта 3D картина получена для сцены при перемещении приемника вдоль горизонтальной оси  $X$  на 220мм с шагом 0,5мм и вдоль оси  $Y$  на 300мм с шагом 10мм. По оси  $Z$  отложена амплитуда принятого

продетектированного сигнала. На рис. 3 возможно выделить три области дифракции: центральная, соответствующая сигналу, прошедшему сквозь объект исследования и характеризующая его поглощающие свойства, и две боковые области, расположенные слева и справа, которые соответствуют преломлению и переотражению ИШП.

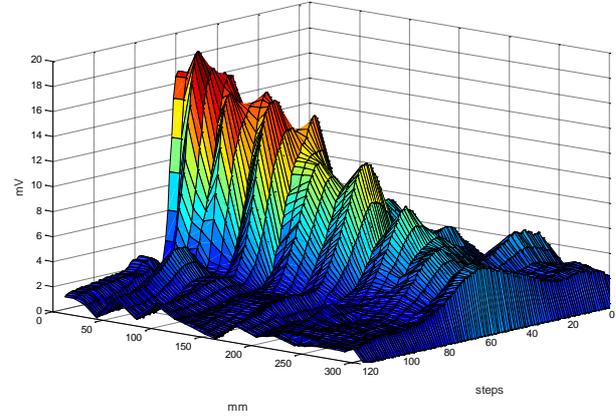


Рис. 3. 3D образ принимаемого сигнала.

### 3 Результаты экспериментальных исследований

Как указывалось, выше в экспериментах использованы несколько групп жидкостей: к первой группе относятся водные и спиртовые растворы, ко второй группе продукты нефтепереработки — бензин, ДТ, растворители [16].

Предварительно тара с раствором охлаждалась в морозильной камере до температуры  $-10^\circ\text{C}$  в течение 8 часов, затем ее помещали на измерительную установку при температуре окружающей среды  $+(20..27)^\circ\text{C}$ . Измерения температуры окружающей среды производились тремя спиртовыми стеклянными термометрами, показания которых усреднялись. Для измерения температуры исследуемых жидкостей был использован ИК датчик семейства MLX90614. Погрешность показаний такого датчика по паспортным данным составляет величину  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . С целью минимизации ошибок ИК датчик располагался на расстоянии 10мм от исследуемой тары с жидкостью. Погрешность измерений температурных зависимостей сигнала составляла  $\pm 0,5\text{ mV}$ .

При постоянной внешней температуре происходят ряд процессов с охлажденными тарой и раствором, которые влияют на прохождение, рассеяние и поглощение ЭМВ. Если поверхность тары холоднее окружающей среды или равна точке росы, то на её поверхности выпадет конденсат. Резкое изменение температуры от отрицательной ( $-10^\circ\text{C}$ ) к положительной ( $+20^\circ\text{C}$  и более) ведет к появлению на поверхности тары тонкого слоя росы, который сразу же замерзает, образуя налет инея. В зависимости от

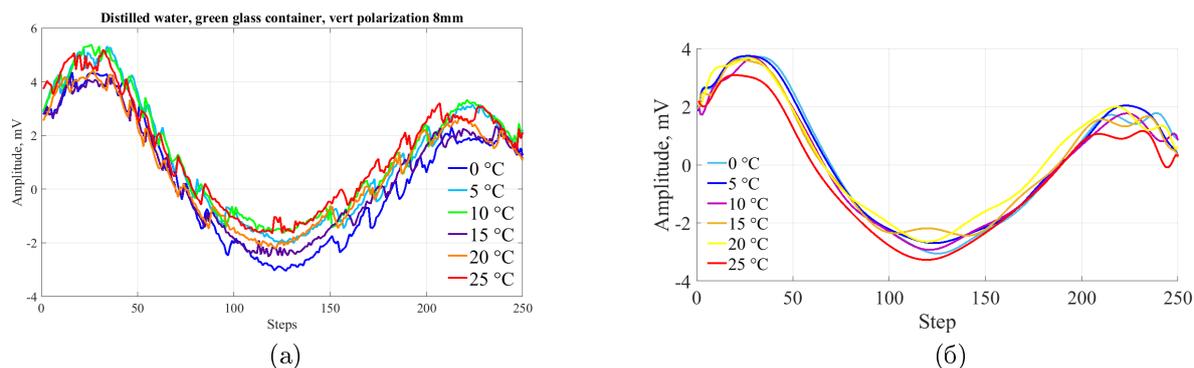


Рис. 4. Предварительная обработка ТП: а) усреднение по результатам 3-х измерений; б) усреднение по результатам 30-ти измерений.

температуры плавления раствора (перехода из твердой фазы в жидкой фазу) возможно образование льда. Дальнейшее пребывание тары с жидкостью при высокой температуре приводит к таянию инея на поверхности тары и льда с внутренней стороны тары. В области таяния, которая со временем расширяется и отделяет боковые стенки от внутреннего льда (для водных растворов), движутся пузырьки газа, которые объединяясь, проскакивают (поднимаются) вверх. Замерзший раствор, отделившийся от стенки, представляет собой прозрачный лед, окруженный видимым столбом пористого (белого цвета) льда, расположенным по центру тары. Иней, образовавшийся на внешней стенке тары постепенно тает превращаясь в мелкие капли, которые объединяются во все большие капли, часть из которых под действием силы тяжести скатывается с тары, а остальные продолжают соединяться, образуя неравномерную, не сплошную поверхность. Крупные капли концентрируются на верхней и нижней поверхности тары, а в центральной (по высоте) части тары остается область с очень мелкими каплями. При положительной температуре капли на поверхности тары постепенно испаряются (уменьшаются в размере). Скорость описанных процессов определяется теплопроводностью жидкости и тары. В итоге при температуре жидкости с тарой, превышающей точку росы, емкость с жидкостью возможно рассматривать как двухслойную линзу.

Теплоемкости всех исследуемых жидкостей, кроме воды, мало различаются, а теплопроводность в передаче тепла для жидкостей играет незначительную роль, следовательно, время, необходимое для изменения температуры, на одинаковую величину не значительно отличается для всех жидкостей. Удельная теплоемкость воды в два раза больше, чем теплоемкость льда, у которого эта величина практически такая же, как у остальных объектов исследований (бензина, спирта, керосина) [16]. Поэтому главное отличие в динамике образования и роста капель связано с фазовыми переходами (процессами таяния льда), если он образовывался, так как лед будет нагреваться в два раза быстрее, чем вода. Только вода, которая замерзала при темпе-

ратуре  $-10^{\circ}\text{C}$ , имела динамику образования капель, отличную от остальных жидкостей.

Диэлектрические характеристики пресной воды в мм диапазоне обладают ярко выраженными частотными особенностями и рассеянием ЭМВ водными частицами на поверхности тары изменяется в зависимости от соотношения физических размеров частиц и рабочего диапазона длин волн. При этом степень стремления к своим предельным теоретическим значениям у экстинкции и рассеяния существенно различные, поэтому у больших капель потери на рассеяние превышают потери на поглощение.

Дистиллированная вода при охлаждении до температуры ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) замерзает, и наличие льда определяет, как процессы на поверхности тары, такие как рассеяние, так и потери внутри объема тары. При линейном сканировании объектов исследования в горизонтальной поляризации (ГП) для принимаемого сигнала на ТП объектов наблюдаются ярко выраженные левый и правый максимумы, между которыми находится четко фиксированный минимум.

Экспериментальные данные, как указывалось выше, получались в результате трех измерений в каждой точке сканирования с последующим их усреднением и отображением на графике в графическом интерфейсе. Экспериментальные данные для каждой точки сканирования сохранялись в отдельном файле путем выполнения серий из десяти экспериментов для каждой жидкости. Усреднением полученных данных удастся снизить ошибки измерений и повысить достоверность получаемой информации. Это проиллюстрировано на рис. 4. Слева представлен ТП рис. 4а полученный в результате однократного сканирования и усреднения в каждой точке трех полученных значений относительных амплитуд сигналов. Справа приведен график, который получен в результате усреднения по результатам 10 экспериментов (рис. 4б). Далее в работе приводятся ТП жидкостей с усредненными экспериментальными данными.

Температурные изменения ТП дистиллированной воды в различных типах тары и при разли-

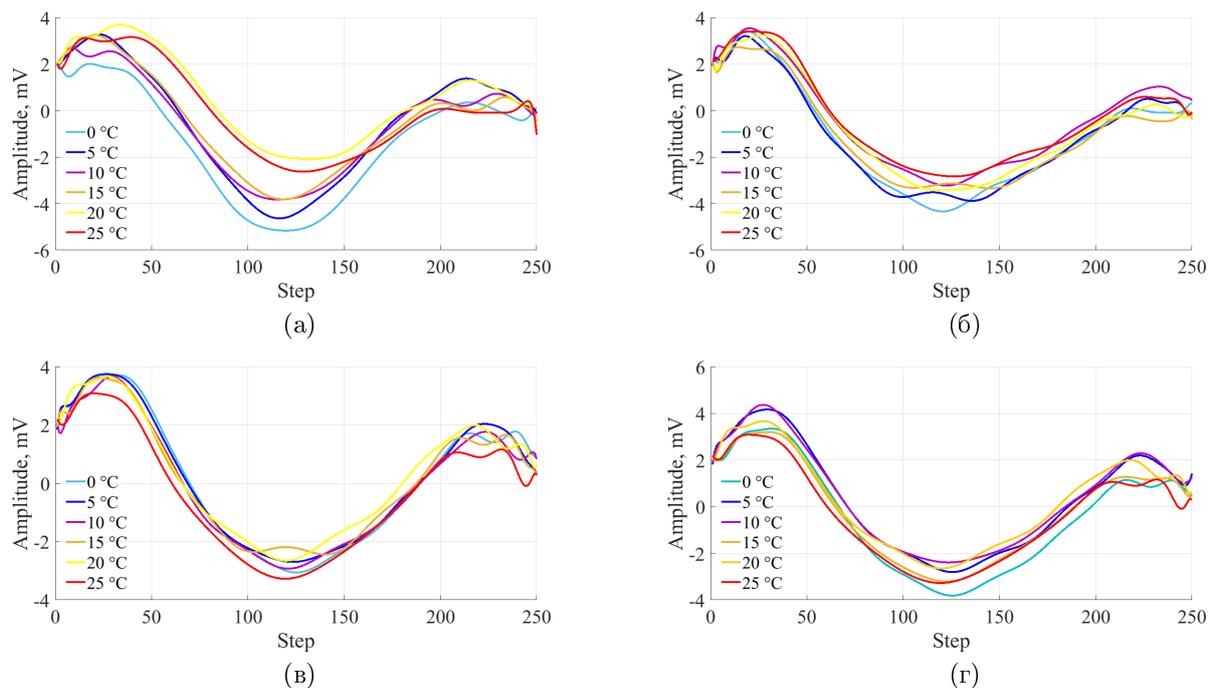


Рис. 5. Температурные изменения ТП для дистиллированной воды: а) пластиковая тара, ГП принимаемого сигнала; б) пластиковая тара, вертикальная поляризация (ВП) принимаемого сигнала; в) тара из зеленого стекла, ГП принимаемого сигнала; г) тара из зеленого стекла, ВП принимаемого сигнала.

ной поляризации принимаемого сигнала приведены на рис. 5. Наибольшие изменения относительных амплитуд принятых сигналов ( $\Delta U \approx 3$  мВ) в температурном диапазоне наблюдаются для тары с меньшим значением диэлектрической проницаемости в области центрального минимума при ГП принимаемого сигнала.

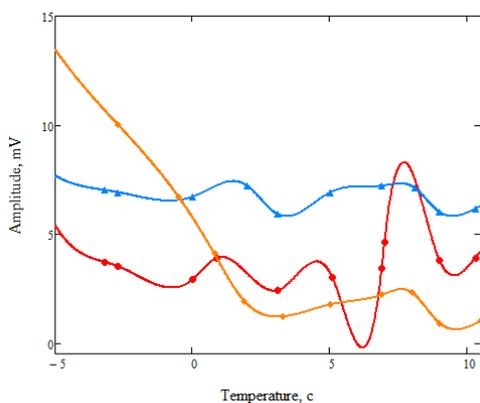


Рис. 6. Температурные изменения относительных амплитуд принимаемых сигналов в характерных точках для дистиллированной воды: правого максимума (синяя кривая), левого максимума (красная кривая), минимума (оранжевая кривая) сигнала.

На рис. 6 приведены относительные изменения амплитуд принятых сигналов при изменении температуры в характерных точках ТП (правый и левый максимумы и минимум) на поверхности пластиковой тары с дистиллированной водой. Не симметрия расположения максимумов на графиках

как объясняется асимметрией в экспериментальной установке и ошибками. На рис. 6 наблюдаются характерные точки перегиба, соответствующие максимумам и минимуму, которые в диапазоне температур  $(7,3 \dots 9)^\circ\text{C}$  связаны с изменением параметров капель на поверхности тары. На кривой минимума рис. 6 (оранжевого цвета) более четко прослеживается падение относительной амплитуды сигнала, связанное с переходом воды из твердой фазы в жидкую.

Этиловый спирт ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) имеет точку плавления ( $-117^\circ\text{C}$ ), которая значительно ниже температуры охлаждения емкости с жидкостью, поэтому фазовый переход, как и в бензине марки АИ-95, не происходит. При линейном сканировании ТП водного раствора спирта представляет собой кривую с двумя областями максимальных значений амплитуд принимаемого сигнала и области между ними, в которой амплитуда принимаемого сигнала имеет минимальные значения. ТП рассматриваемых жидкостей симметричны, а различие в значениях амплитуд для левого и правого максимумов объясняются ошибками позиционирования объектов исследований. Качественно такой вид ТП сохраняется для диапазона температур  $0 \dots 25^\circ\text{C}$ . В качестве примера на рис. 7 а приведен ТП спирта с концентрацией 96% при ГП принимаемого сигнала, а остальные тепловые портреты водно-спиртовых растворов в различных типах тары и различных поляризациях принимаемого сигнала не приводятся. Эксперименты показывают, что при изменении температур наибольшие изменения происходят в обла-

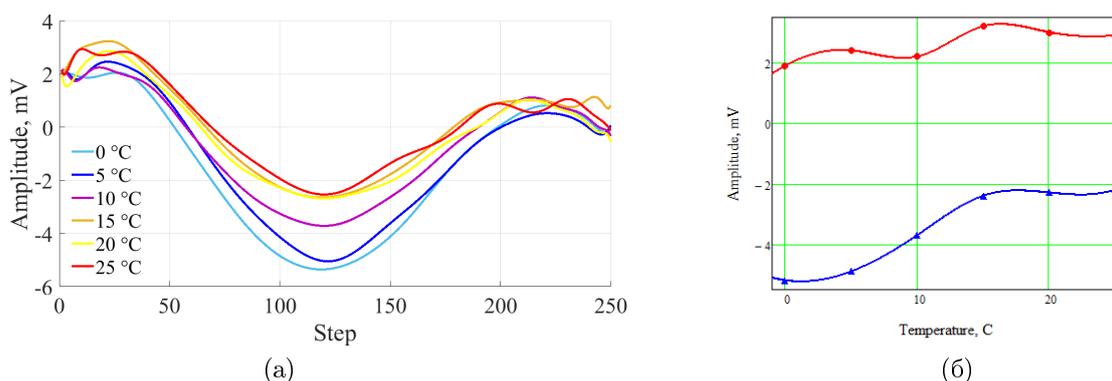


Рис. 7. Этиловый спирт концентрации 96 %: а) изменения ТП от температуры в таре из зеленого стекла для ГП принимаемого сигнала; б) зависимости изменения амплитуд принимаемых сигналов в диапазоне температур: для левого максимума (красная кривая) и минимума (синяя кривая) сигнала.

сти центрального минимума принимаемого сигнала для тары с меньшим значением диэлектрической проницаемости и толщины стенок и наибольшей концентрацией спирта в растворе (96 %) при ГП принимаемого сигнала. Описанные температурные изменения ТП для областей правого максимума и центрального минимума иллюстрирует рис. 7б. На рис. 7б красная кривая соответствует области левого максимума на ТП, а синяя кривая – области минимума. Кривая зависимости относительных амплитуд сигнала – минимума рис. 7б от температуры визуально отличается и от кривых для первой (дистиллированная вода) и второй (ДТ и т.д.) групп жидкостей. Эта кривая представляет собой монотонно растущую с температурой зависимость.

Известно [14], что одним из вариантов модели структуры жидкой воды является трехмерная сетка, в которой примерно 10 % водородных связей между молекулами разорваны. Благодаря тепловому движению молекул связи могут разрываться и восстанавливаться. При комнатной температуре общее число разорванных связей флуктуирует около 10 %. Структура жидкой воды – это трехмерная сеть с “дырками”, размеры и положение которых все время изменяются. Именно эти “дырки” обеспечивают основное свойство воды – текучесть. При добавлении этилового спирта, который хорошо растворяется в воде в любых соотношениях, из-за наличия тех же водородных связей, происходит ассоциация как молекул спирта, так и молекул воды, дополнительно образуются комплексы гидратов, в которых молекулы спирта соединены с молекулами воды в соотношении от 1:1 и выше. Водородная связь имеет электростатический характер и зависит от окружающих молекул. Наиболее сильная эта связь, когда каждая молекула спирта окружена пятью молекулами воды (каждый атом водорода радикала соединен с водой), что составляет 15...20 % по массе или 20...25 % по объему водно-спиртового раствора. Таким образом, величина водородной связи чистой воды при добавлении этилового спирта сначала уменьшается, при увеличении концентрации

спирта, величина водородной связи увеличивается благодаря образованию клатратов – объединению молекул воды в объемные многогранники. Дальнейшее увеличение концентрации спирта разрушает эти клатраты, и величина водородной связи раствора приближается к величине водородной связи “чистого” спирта.

На рис. 8 приведены температурные зависимости изменения амплитуды сигналов в области минимальных значений в зависимости от концентрации спирта в растворе при ГП и ВП принимаемого сигнала. На рис. 8 красная кривая соответствует ГП принимаемого сигнала, а синяя кривая соответственно ВП. Анализ показывает, что при концентрации 20...22 % по объему спирта в растворе имеется область, в которой молекулы воды объединяются в объемные структуры вокруг молекул этанола и водородные связи более сильные, чем в чистой воде.

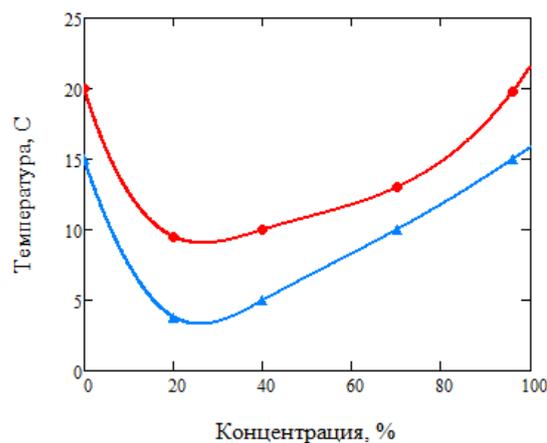


Рис. 8. Зависимости изменения амплитуды сигналов в области минимальных значений от концентрации этилового спирта. Красная кривая – ГП, синяя кривая – ВП принятого сигнала.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований второй группы жидкостей – продуктов нефтепереработки (бензин, и т.д.). ТП для ДТ при различных поляризациях принимаемого си-

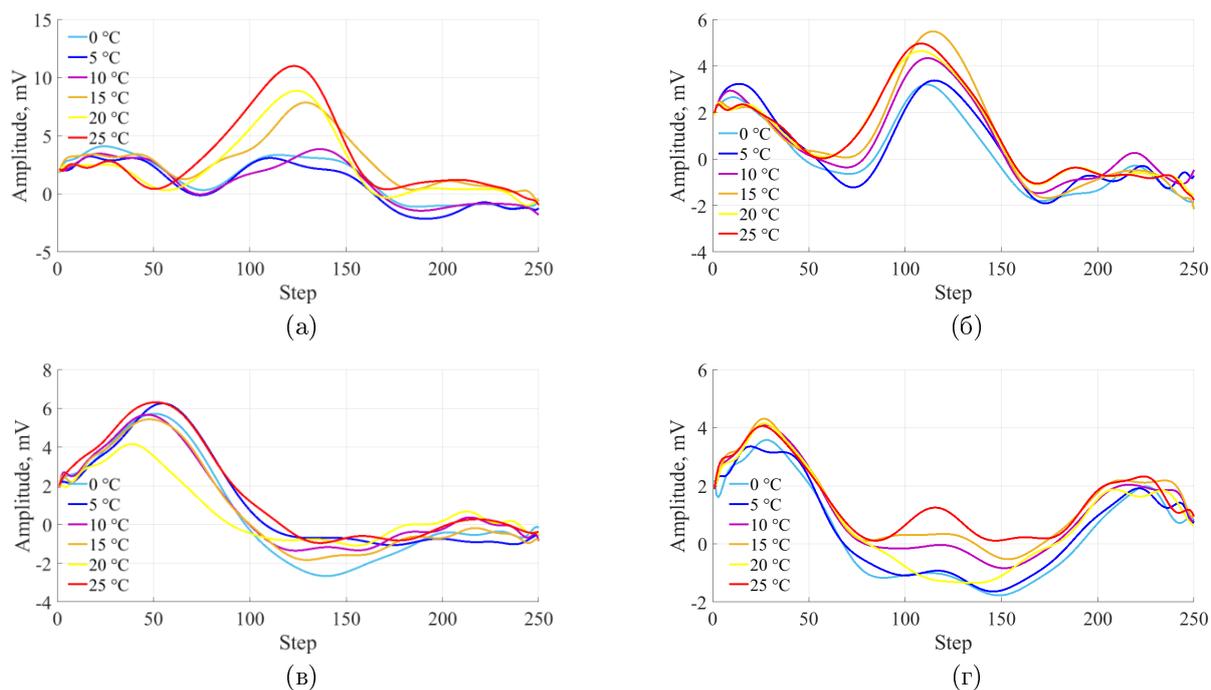


Рис. 9. Температурные изменения ТП для ДТ: а) пластиковая тара, ГП принимаемого сигнала; б) пластиковая тара, ВП принимаемого сигнала; в) тара из стекла зеленого цвета, ГП принимаемого сигнала; г) тара из стекла зеленого цвета, ВП принимаемого сигнала.

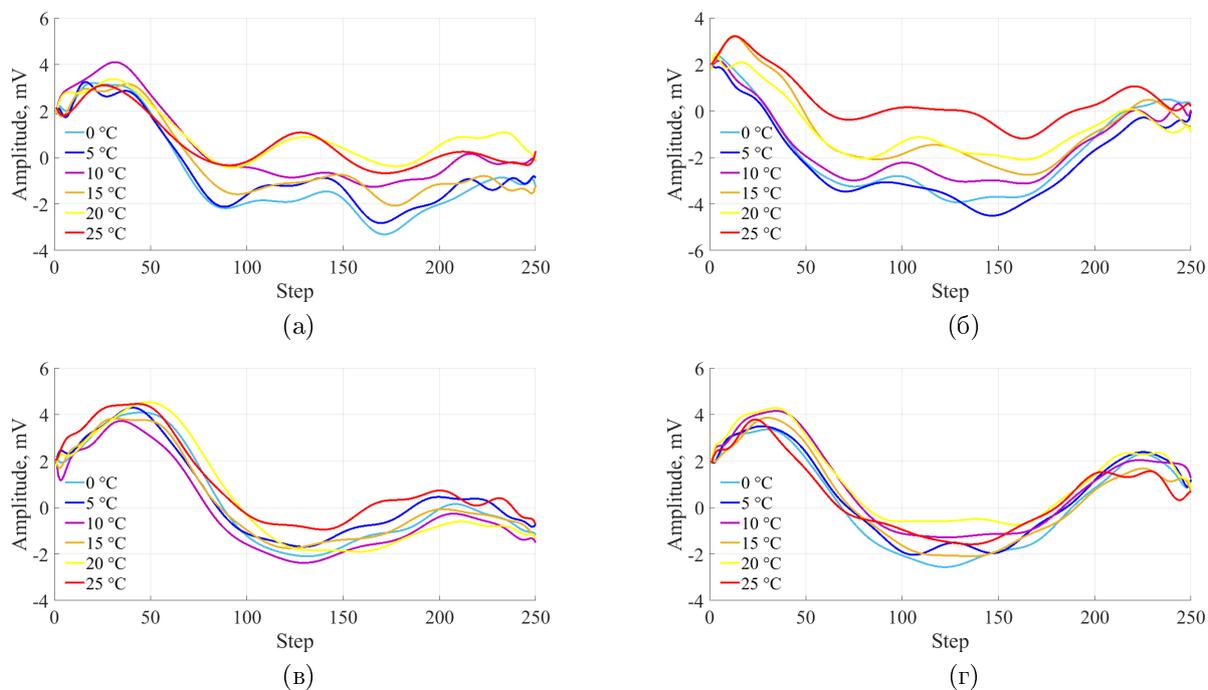


Рис. 10. Температурные изменения ТП для бензина марки АИ-95: а) пластиковая тара, ГП принимаемого сигнала; б) пластиковая тара, ВП принимаемого сигнала; в) тара из стекла зеленого цвета, ГП принимаемого сигнала; г) тара из стекла зеленого цвета, ВП принимаемого сигнала.

сигнала и использовании различных типов тары приведен на рис. 9. ТП ДТ качественно отличаются от водных и спиртовых растворов. Следует отметить значительные изменения ТП для ДТ при изменении типа тары и поляризации сигнала, однако изменения ТП при изменении температур отчетливо видны.

Наибольшие приращения относительной амплитуды сигнала наблюдаются при ГП сигнала с использованием пластиковой тары ( $\Delta U \approx 9$  мВ) и ВП сигнала в таре из стекла зеленого цвета ( $\Delta U \approx 2,2$  мВ). Для ТП характерно увеличение относительной амплитуды сигнала на отдельных участках при увеличении температуры жидкости и тары, которое связано с исчезновением (высыханием) росы на поверхности тары. Точка плавления ДТ значительно ниже температуры охлаждения, следовательно, фазовый переход из твердого состояния в жидкое внутри тары не образуется и кривая минимума представляет собой практически линейные участки с разными наклонами из-за различных размеров, оставшихся на поверхности тары капель. Этот участок графика зависимости относительной амплитуды сигнала от температуры качественно аналогичен участку в диапазоне температур  $+(3 \dots 11)^\circ\text{C}$  для дистиллированной воды.

ТП следующего объекта исследований — бензина марки АИ-95 в температурном диапазоне приведен на рис. 10.

На рис. 11 приведены изменения зависимости относительной амплитуды от температуры при ГП

принимаемого сигнала для левого максимума и минимума ТП на поверхности стеклянной тары.

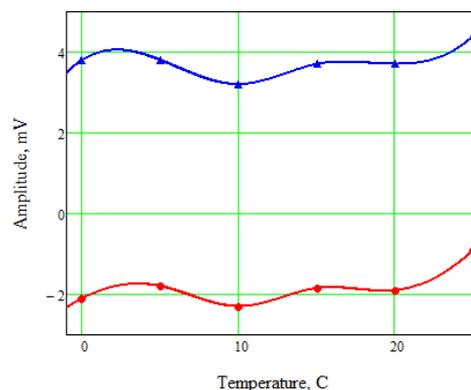


Рис. 11. Температурные изменения амплитуды сигналов для бензина марки АИ-95 в стеклянной таре при ГП принимаемого сигнала: красная кривая — изменения амплитуды левого максимума; синяя кривая — изменения амплитуды минимума кривой.

Точка плавления бензина расположена значительно ниже температуры охлаждения емкости с бензином марки АИ-95, следовательно, фазовый переход внутри тары не происходит, кривая зависимости относительных амплитуд принимаемого сигнала для минимума представляет собой практически линейные участки с разными углами наклона, что связано с различными размерами капель, оставшихся на поверхности тары (рис. 11). Этот участок зависимости

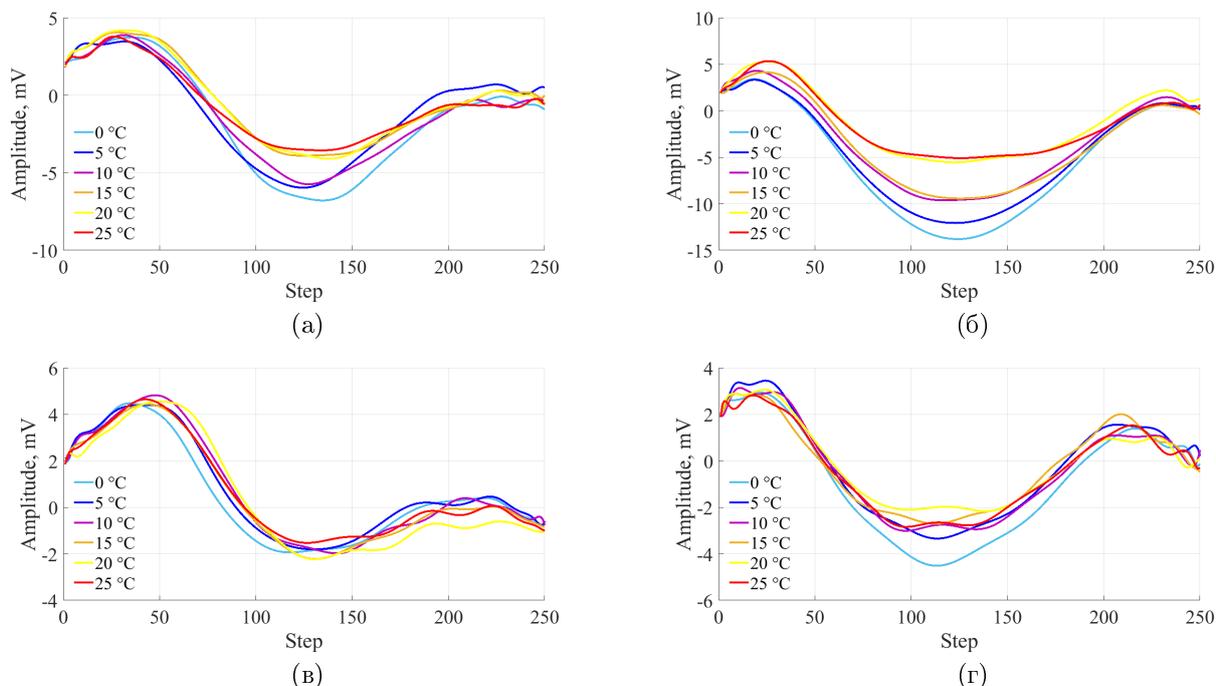


Рис. 12. Температурные изменения ТП для жидкости “Разжигатель”: а) пластиковая тара, ГП принимаемого сигнала; б) пластиковая тара, ВП принимаемого сигнала; в) тара из стекла зеленого цвета, ГП принимаемого сигнала; г) тара из стекла зеленого цвета, ВП принимаемого сигнала.

относительной амплитуды сигнала от температуры также похож на участок в диапазоне температур  $+ (3 \dots 11)^\circ\text{C}$  для дистиллированной воды. Как следует из графиков рис. 11 кривые зависимостей относительных амплитуд для левого и правого максимумов практически одинаковые по амплитуде, но мало информативные.

На рис. 12 приведены ТП для жидкости “Разжигатель” (жидкость для разжигания костров — продукт переработки нефти), представляющая собой смесь бензина и этилового спирта.

На рис. 13 представлен график изменения амплитуд принимаемых сигналов в диапазоне температур для левого и правого максимумов и минимума для жидкости “Разжигатель” в пластиковой таре при ВП принятого сигнала. Так же, как и для этилового спирта концентрацией 96 % наиболее информативной является область изменения минимума относительных амплитуд принимаемых сигналов в температурном диапазоне, эти кривые качественно одинаковые.

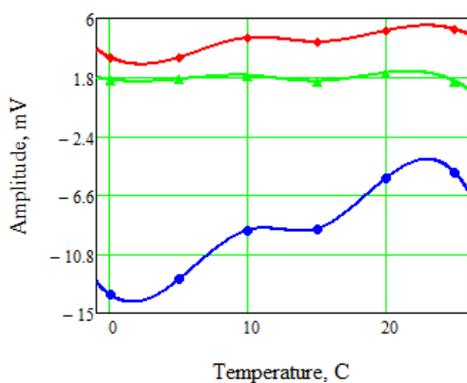


Рис. 13. Температурные изменения амплитуды сигналов для жидкости “Разжигатель” в пластиковой таре при ВП принимаемого сигнала: красная кривая — изменения амплитуды левого максимума; синяя кривая — изменения амплитуды минимума кривой и зеленая кривая — изменение амплитуды правого максимума.

## Выводы

Согласно данным авторов, микроволновое линейное поляризационное радиометрическое сканирование позволяет в диапазоне температур дистанционно получать статические ТП для различных жидкостей с различными физико-химическими свойствами, по которым возможно проводить идентификацию этих жидкостей. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование радиометрических принципов позволило получать дистанционные поляризационные ТП исследуемых жидкостей в закрытой диэлектрической таре на расстоянии от нескольких

сантиметров до нескольких метров. Различия в физико-химических свойствах жидкостей приводят к различиям в их ТП, что проявляется в количестве минимумов и максимумов и различными значениями крутизны отдельных участков на графиках. Изменения зависимостей относительных амплитуд сигналов связаны с изменением температуры объекта исследования, позволяют по характерным особенностям максимумов и минимумов температурных зависимостей делать заключения о свойствах жидкости (теплоемкости), находящейся в различных типах диэлектрической тары. Не зависимо от типа диэлектрической тары в температурном диапазоне проявляются свойства жидкостей различных групп — различия в их теплоемкости. Используемая широкополосная шумовая ЭМВ является переносчиком аутентичной информации о жидкости и таре.

2. Зависимости минимальных значений относительных амплитуд сигналов, регистрируемых радиометрическим приемником от диэлектрической тары с исследуемой жидкостью в температурной области, т.е. отсутствия льда внутри тары, носят качественно одинаковый характер — увеличение амплитуды принятых сигналов связано с увеличением температуры. Для каждой группы жидкостей проявляются характерные особенности, связанные с термодинамикой передачи тепла: для ДТ наблюдаются линейные участки зависимости изменений амплитуды сигналов от температуры со значительным различием углов наклона; для бензина и воды — линейные участки с малыми различиями угла наклона; для растворов, содержащих этиловый спирт отмечается плавное увеличение уровня сигнала с увеличением температуры.

3. Различия в типах тары, являющиеся наружным слоем двухслойной диэлектрической линзы, влияют на ее квазиоптические свойства и, следовательно, на формируемый ТП жидкостей. При проведении исследований с охлажденными жидкостями при естественном их нагревании на поверхности тары образуется тонкий слой инея или росы, который следует рассматривать как дополнительный слой для диэлектрической линзы, приводящий к незначительным потерям ЭМВ и снижению амплитуды принимаемого сигнала, однако не наблюдаются качественные изменения ТП различных жидкостей.

4. Полученные статические ТП показывают, что основные различия для жидкостей проявляются на участках минимальных значений зависимостей относительных амплитуд принятых сигналов, регистрируемых приемником, которые проявляются в температурной области и связаны с фазовыми переходами жидкостей (наличием льда) внутри тары. Экспериментально, на примере воды показано, что на зависимости изменений амплитуды сигналов от температуры наблюдаемый наклон кривой

отрицательный (уменьшается с увеличением температуры).

5. Предложенный радиометрический метод дистанционной идентификации жидкостей в закрытой диэлектрической таре является безопасным и экологически чистым, т.к. необходимый уровень ИПП не превышает величину  $20\text{дБ}/kT_0$ . Чувствительность использованного радиометрического приемника 8-ми мм диапазона длин волн позволяет дистанционно, не зависимо от параметров среды распространения ЭМВ, жидкости и диэлектрической тары, измерять температуру с точностью не хуже  $0,1^\circ\text{C}$ .

6. Различия зависимостей относительных амплитуд сигналов обусловлены образованием дополнительного слоя из капель воды на поверхности тары, который меняет свойства тары как многослойной цилиндрической линзы. Наличие и размеры слоя капель зависят от теплоемкости жидкости и ее температуры плавления. Теплопроводность и коэффициент излучения (степень черноты) слабо влияют на величины амплитуд принимаемого сигнала в связи с тем, что в процессе теплообмена жидкостей при комнатных температурах основную роль играет конвекция, а излучение и передача тепла путем теплопроводности играет незначительную роль. Коэффициенты излучения исследуемых объектов без учета временного фактора не значительно отличаются друг от друга.

7. Графоаналитическая обработка экспериментальных данных — ТП в диапазоне температур для различных концентраций этанола в воде, позволяет получать информацию о водородных связях и структурах растворов, которая соответствует данным, полученных более сложными методами.

8. В работе используются статические зависимости относительных амплитуд принимаемых сигналов от температуры поверхности диэлектрической тары и не учитываются временные факторы. Использование зависимостей динамических ТП от значений температур позволит расширить возможности метода и дистанционно определять теплоемкость жидкостей различных групп.

## References

- [1] Salmon N.A. (2018) Outdoor Passive Millimeter-Wave Imaging: Phenomenology and Scene Simulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 66, Iss. 2, pp. 897-908. DOI: 10.1109/tap.2017.2781742
- [2] Lee J.S. and Cleaver G.B. (2017) The cosmic microwave background radiation power spectrum as a random bit generator for symmetric- and asymmetric-key cryptography. *Heliyon*, Vol. 3, Iss. 10, pp. e00422. DOI: 10.1016/j.heliyon.2017.e00422
- [3] Owda A.Y., Salmon N. and Rezgui N.D. (2018) Electromagnetic signatures of human skin in the millimeter wave band 80-100 GHz. *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 80, pp. 79-99. DOI: 10.2528/PIERB17120403
- [4] Samavi S., Shirani S. and Karimi N. (2006) Real-time processing and compression of DNA microarray images. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 15, Iss. 3, pp. 754-766. DOI: 10.1109/tip.2005.860618
- [5] Alimenti F., Roselli L. and Bonafoni S. (2016) Microwave Radiometers for Fire Detection in Trains: Theory and Feasibility Study. *Sensors*, Vol. 16, Iss. 6, pp. 906. DOI: 10.3390/s16060906
- [6] Divin Y., Lyatti M., Poppe U. and Urban K. (2012) Identification of Liquids by High-Tc Josephson THz Detectors. *Physics Procedia*, Vol. 36, , pp. 29-34. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.125
- [7] Gzyl H. (1988) Noise-induced transitions: Theory and applications in physics, chemistry and biology. *Acta Applicandae Mathematicae*, Vol. 11, Iss. 1, pp. 97-98. DOI: 10.1007/bf00047115
- [8] Pavlyuchenko A.V., Loshitskiy P.P., Shelengovskiy A.I. and Babenko V.V. (2017) Remote identification of liquids in a dielectric container using millimeter waves. 1. Principal possibility. *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 60, Iss. 10, pp. 423-430. DOI: 10.3103/s0735272717100016
- [9] Pavlyuchenko A.V., Loshitskiy P.P., Shelengovskiy A.I. and Babenko V.V. (2018) Remote Identification of Liquids in a Dielectric Container Using Millimeter Waves. 2. Linear Scanning. *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, Iss. 4, pp. 157-167. DOI: 10.3103/s0735272718040039
- [10] Harvey A. F. (1963) *Microwave Engineering*, Academic Press, London and N. Y.
- [11] Pavlyuchenko A. V., Loshitskiy P. P., Shelengivskiy A. I. and Babenko V. V. (2016) Radiometric illumination for short-range radar. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, Iss. 67, pp. 43-49. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.43-49.
- [12] Moskaleva V. A. ed., Nagibina I. M., Polushkina N. A., Rudin V. L. (1995) *Prikladnaya fizicheskaya optika* [Applied of physical optics], Polytechnic, S.P., 528 p.
- [13] Zelkin E. G. and Petrova R. A. (1974) *Linzovye anteny* [Lens antennas], Moscow, Sov. Radio, 280 p.
- [14] Strutt J. W. and Rayleigh B. (1878) *The theory of sound*, Vol. 2, London, MacMillan and Co., 530 p.
- [15] Patsaeva S. V. (2010) Podlinnaya zhizn' vodno-spirovoykh rastvorov [Authentic life of the aqueous-alcoholic solution], *Khimiya i zhizn'*, No. 5, pp. 41-43.
- [16] Leffler L. W. (1985) *Petroleum Refining for the Nontechnical Person*, Penn Well Books, Penn Well Publishing Company, 230 p.

## Дистанційна температурна радіометрична ідентифікація рідин

Павлюченко А. В., Лошицький П. П.

**Вступ.** Більшість відомих методів не можливо використовувати для дистанційного аналізу рідин, через неможливість реалізувати безпосередню взаємодію вимірююмого розчину з вимірювальною апаратурою. За температури, що є вищою абсолютного нуля, атоми або молекули будь-якого фізичного об'єкта здійснюють власні спонтанні коливання, які трансформуються в електромагнітні коливання теплового випромінювання. Такі випромінювання залежать не тільки від абсолютної

температури тіла, але і від властивостей самого тіла і його взаємодії, у тому числі і теплової, з зовнішнім середовищем.

**Теоретичні результати.** Аналіз діелектричних ємностей циліндричної форми, всередині яких знаходиться рідина, що досліджується, виконується на основі квазіоптичних властивостей багатопарових діелектричних циліндричних лінз. Властивості таких лінз пов'язані з параметрами рідин та тари, таким чином з'являється можливість розрізняти параметри рідин по зміні параметрів ЕМХ, що пройшла.

**Експериментальні результати.** Використані радіометричні вимірювання в 8-ми міліметровому діапазоні довжин хвиль для дистанційної ідентифікації рідин, що знаходяться в герметично закритій діелектричній тарі. Наведені поляризаційні статичні теплові портрети для рідин в діапазоні температур від 0°C до 25 °C. Різниця в фізико-хімічних властивостях рідин приводять до різниці в їх теплових портретах, які проявляються у кількості мінімумів та максимумів та різним значенням крутості деяких ділянок на графіках, які чітко фіксуються. При температурних вимірюваннях радіометричними методами рідин можливо визначати області фазових переходів "тверда речовина-рідина", які характеризуються наявністю від'ємного нахилу залежності прийнятого сигналу – температура на ділянці між двома максимумами теплового портрета (теплоємності). Для кожної з груп рідин (водно-спиртові розчини, продукти нафтопереробки) виявляються особливості пов'язані з термодинамікою передачі тепла. Під час природнього нагрівання охолоджених рідин на поверхні тари утворюється тонкий шар інею або роси, який є додатковим шаром для діелектричної багатопарової лінзи, цей шар знижує амплітуду сигналу, що приймається, але не спричиняє якісних змін теплових портретів різних рідин.

**Висновки.** Експериментально показана принципова можливість дистанційно розрізняти рідини близькі за своїм складом – водні розчини етилового спирту різних концентрацій та продукти нафтопереробки. Різні типи тари, що є зовнішнім шаром двохпарової діелектричної лінзи впливають на її властивості, тобто на формуємий тепловий портрет рідин. Статичні теплові портрети показують, що основні відмінності для рідин проявляються на ділянках мінімальних значень залежностей амплітуд сигналів, що приймаються, які виявляються в температурній області та пов'язані з фазовими переходами рідин (наявність льоду) всередині тари. Наявність та розміри краплин залежать від теплоємності рідини та температури її плавлення. Графоаналітична обробка експериментальних даних – теплових портретів у температурному діапазоні для різних концентрацій етанолу у воді, дозволяє отримувати інформацію про водневі зв'язки та структуру розчинів, яка відповідає даним, які отримані більш складними методами. Запропонований метод дистанційної ідентифікації рідин в закритій діелектричній тарі є безпечним та екологічно чистим, необхідний рівень підсвічуючого випромінювання не перевищує рівень 20дБ/кТ<sub>0</sub>. Чутливість використаного радіометричного приймача дозволяє дистанційно, не залежно від параметрів середовища розповсюдження ЕМХ, вимірювати температуру рідини в діелектричній тарі з точністю не гірше ніж 0,1°C. Експериментально показана доцільність використання поляризаційних

вимірювань для дистанційної відмінності рідин, у тому числі і вогнебезпечних, по зміні їх теплових портретів, які отримані радіометричними методами в 8-ми мм діапазоні довжин хвиль. Використана широкосмугова шумова ЕМХ є переносник інформації про рідину та тару.

*Ключові слова:* радіометрична система; тепловий портрет; поляризація електромагнітної хвилі; діелектрична тара; водяні розчини; продукти нафтопереробки

## Remote temperature radiometric identification of liquids

*Pavlyuchenko A. V., Loshitskyi P. P.*

**Introduction.** Most of the known methods cannot be used to remotely analyze a liquid, as there is no way to make contact between the researched solution and the measuring equipment. Atoms or molecules of any physical object with a temperature higher than absolute zero make spontaneous movements, which are transformed into electromagnetic fluctuations of thermal radiation. This radiation depends not only on the absolute temperature of the object but also on multiple qualities of the object as well as its interaction with the environment, including thermal interactions.

**Theoretical results.** The analysis of dielectric cylindrical packages with researched liquids sealed inside was carried out based on quasi-optical qualities of multi-layer dielectric cylindrical lenses. The qualities of such lenses are related to parameters of both liquid and its package, therefore, it results in a possibility to distinguish liquids' parameters based on changes in penetrating electromagnetic waves' parameters.

**Experimental results.** The radiometric methods of measurements in 8mm wavelength range for remote identification of liquids sealed in dielectric packages. Polarizing static thermal portraits of liquids in the temperature range from 0°C to 25°C were obtained. The differences in physicochemical characteristics of the liquids cause differences in their thermal portraits, which manifest in quantities of minimums and maximums, and different slopes of particular parts of the graphs, and can be recorded distinctly. The areas of phase transitions between solid matter and liquid, which are defined by the existence of negative slope of dependence between the received signal level and the temperature in the area between two maximums of thermal portrait (thermal capacity) can be identified during temperature measurements of liquids by radiometric methods. There are defining characteristics for each of the liquid groups (water-alcohol solutions, refined oil products), which are related to heat transmission thermodynamics. During natural heating of the cool liquids, a thin layer of ice or dew is created on the surface of the package, which is an additional layer for a dielectric lens that decreases the amplitude of the received signal but does not change the quality of different liquid's thermal portraits.

**Conclusions.** The possibility of remote identification of liquids, which are similar in composition, for example, water solutions of ethanol with different concentration and refined oil products, is proved experimentally. Different types of packages that serve as an outer layer of a two-layered dielectric lens affect its quasi-optical properties and

therefore, the thermal portrait, which is being formed. Static thermal portraits show that main differences for liquids are found in the areas of minimal quantities of dependences of receiver signals' relative amplitudes, which occur in the thermal area and are connected to liquids' phase transitions (i.e. the existence of ice) in the package. Existence and size of droplets' layer depend on the specific heat of the liquid and its melting temperature. Graph analyzing of the experimental data (thermal portrait in a range of temperatures for water solutions of ethanol with different concentration) allows obtaining information about hydrogen bonds and solutions' structure, which matches with data obtained by more methods that are complex. The proposed method of remote identification of liquids that are sealed in a dielectric package is safe and environmentally

friendly, as required of illuminating radiation does not exceed  $20\text{dB}/kT_0$ . The sensitivity of the receiver used allows remote measurement of liquids' temperature, while it's sealed in dielectric package, regardless of electromagnetic wave distribution environment, with accuracy not less than  $0,1^\circ\text{C}$ . The feasibility of the usage of polarization changes for remote identification of liquids, including flammable, based on changes in their thermal portrait's temperature, which are received by radiometric methods in 8-mm waveband range is experimentally shown. The broadband noise oscillator, which is being used, carries information about the liquid and the package.

*Key words:* radiometric system; thermal portrait; electromagnetic wave polarization; dielectric package; water solutions; refined oil products