

УДК 621.396.33+528.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ МИКРОВОЛН ОТ ПОВЕРХНОСТИ АКВАТОРИЙ С РАЗЛИВОМ ОБВОДНЁННОЙ НЕФТИ

*В. Д. Кротилов, С. А. Пелюшенко, И. В. Ракуть *, В. Ю. Савельев*

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Для двухслойной модели разлива нефти на поверхности акватории рассмотрены особенности отражения от неё микроволн, обусловленные обводнённой плёнкой нефтепродукта. Диэлектрические свойства воды в модели разлива учитывались по теории Дебая, а диэлектрические свойства обводнённой нефти — по теории, развитой для бинарных систем. Получены данные об изменениях коэффициентов отражения в зависимости от частоты, угла визирования, толщины нефтяной плёнки и содержания влаги в ней. Для частоты излучения 12,4 ГГц проведены лабораторные измерения отражательных свойств поверхности воды с плёнкой водонефтяной эмульсии. Получены зависимости коэффициентов отражения от толщины плёнки для различного объёмного содержания водной фракции в нефти. Определены комплексные диэлектрические проницаемости водонефтяных эмульсий с заданным объёмным влагосодержанием. Чтобы описать полученные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости эмульсии от объёмного влагосодержания, необходимо применять несимметричные формулы для смеси полярной и неполярной жидкостей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как пассивные, так и активные радиометрические и радиолокационные системы миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн широко используются при исследованиях физических параметров подстилающих покровов. Актуальными задачами экологического мониторинга поверхности акваторий этими методами являются обнаружение разливов нефти, определение толщины нефтяной плёнки и объёма разлитой нефти. Для решения этих задач многими авторами [1–25] проводились эксперименты в лабораториях и естественных условиях с земли, вышек, судов и летающих платформ, разрабатывалась и создавалась измерительная аппаратура, совершенствовались теоретические модели, методы, алгоритмы и программы для управления сбором и обработкой получаемых данных.

Общий подход к задаче определения толщины нефтяной плёнки основан на сопоставлении измеряемых характеристик (антенная температура, поток отражённого излучения) с аналогичными характеристиками, рассчитываемыми на основе заданных параметров аппаратуры, условий эксперимента и принятых модельных представлений о пространственной структуре и диэлектрических свойствах воды и нефти, разлитой на её поверхности. При интерпретации результатов дистанционного зондирования диэлектрические свойства нефтепродукта обычно считаются независимыми от частоты и задаются по опубликованным данным для «сухой» нефти [6–9]. Для воды эти свойства принято рассчитывать по формулам Дебая [3].

При взаимодействии с водой в естественных условиях нефтяная плёнка может обводняться и образовывать водонефтяную эмульсию. Этот процесс должен приводить к росту действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости поверхностного слоя и возникновению их частотной зависимости по отношению к соответствующим характеристикам «сухой» нефти. На необходимость учёта этих факторов в модели нефтяного разлива было обращено внимание в основополагающей работе [8]. В последующих публикациях [11, 14–16, 19, 23, 24] обсуждалось

* igor@nirfi.sci-nnov.ru

влияние обводнения на диэлектрические характеристики нефтяных плёнок при разливе нефти. Для расчёта диэлектрической проницаемости эмульсии — смеси полярной и неполярной жидкостей — в работах [8, 11, 14, 15, 19] было использовано соотношение Клаузиуса—Мосотти [11, 15, 26].

Следует отметить, что использование этого соотношения для расчёта диэлектрической проницаемости смеси неполярных жидкостей, образующих раствор, допустимо, а к смеси неполярной и полярной жидкостей, образующих эмульсию применять его неправомерно [27–29]. Для расчёта диэлектрической проницаемости эмульсий применимы только несимметричные соотношения [27], например выбранное нами соотношение Максвелла—Гарнета [26].

В данной работе представлены результаты численного моделирования отражательных свойств слоя обводнённого нефтепродукта на водной поверхности. Получены данные об изменении коэффициента отражения в зависимости от частоты, угла визирования, толщины и объёмного влагосодержания в нефтяной плёнке. Для частоты излучения 12,4 ГГц проведены измерения отражательных свойств лабораторных разливов обводнённой нефти для различной толщины и водности нефтяной плёнки. На основе этих измерений определены диэлектрические проницаемости эмульсий и проведено их сравнение с результатами соответствующих расчётов для двухкомпонентных смесей по формулам Максвелла—Гарнета, Клаузиуса—Мосотти и Лихтенеккера.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ РАЗЛИВА ОБВОДНЁННОЙ НЕФТИ

Численное моделирование планируемого эксперимента по дистанционной диагностике нефтяных разливов в акваториях предполагает учёт ряда факторов. К ним относятся конструктивные особенности аппаратуры, условия проведения эксперимента и распространения радиоволн на трассе визирования и физические свойства нефтяного разлива — его пространственная структура, состояние границ раздела и диэлектрические характеристики воды и нефти, определяющие выбор электродинамической модели разлива [4].

1.1 Модель разлива, коэффициент отражения

Пользуясь классификацией электродинамических моделей естественных земных покровов, приведённой в [4], мы рассматриваем разлив обводнённой нефти на поверхности воды как слоистую структуру с ровными границами, на которых скачкообразно изменяются диэлектрические свойства. Для такой структуры предполагается, что плоская электромагнитная волна падает из верхнего полупространства (среда 1) на слой нефти (среда 2), разлитой на поверхности воды (среда 3). На границах 1–2 и 2–3 соответствующих сред происходит её многократное отражение и преломление. Комплексные диэлектрические проницаемости этих сред ($\varepsilon_N^* = \varepsilon_{N1} + j\varepsilon_{N2}$, где N — номер среды, ε_{N1} — действительная и ε_{N2} — мнимая компоненты) определяют комплексный коэффициент передачи в слое нефти с толщиной d , который задаёт потери в нём и условия интерференции в среде 1 первой отражённой от границы 1–2 и вышедших из слоя 2 после соответствующего числа отражений на границах 1–2 и 2–3 волн [30].

Для электромагнитной волны, падающей из среды 1 под углом θ_0 (относительно нормали) на ровную двухслойную среду — слой нефти на воде, можно определить комплексный коэффициент R_{123}^* её зеркального отражения в среду 1 в рамках рассматриваемой модели [4] на основе известного соотношения [30]:

$$R_{123}^* = \frac{R_{12}^* + R_{23}^* \exp(j\alpha^* 2d)}{1 + R_{12}^* R_{23}^* \exp(j\alpha^* 2d)}, \quad (1)$$

где d — толщина нефтяного разлива, $R_{12}^* = |R_{12}| \exp(j\varphi_1)$ и $R_{23}^* = |R_{23}| \exp(j\varphi_2)$ — комплексные коэффициенты отражения от верхней, 1–2, и нижней, 2–3, границ слоя, модули $|R_{12}^*|$, $|R_{23}^*|$ и фазы φ_1 , φ_2 которых определяются соотношениями Френеля, $\alpha^* = K_0(n_2 + jk_2)$ — комплексное волновое число для электромагнитной волны, распространяющейся в слое нефти под углом преломления θ_1 , $K_0 = 2\pi/\lambda_0$ — волновое число для электромагнитной волны, распространяющейся в свободном пространстве, n_2 и k_2 — действительная и мнимая части комплексного показателя преломления слоя 2, которые определяются его диэлектрическими характеристиками ε_{21} , ε_{22} и углом визирования θ_0 с помощью соотношений

$$n_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{(\varepsilon_{21} - \sin^2 \theta_0)^2 + \varepsilon_{22}^2} + (\varepsilon_{21} - \sin^2 \theta_0) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{(\varepsilon_{21} - \sin^2 \theta_0)^2 + \varepsilon_{22}^2} - (\varepsilon_{21} - \sin^2 \theta_0) \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Коэффициент отражения $|R_{123}|^2$ по мощности в соответствии с формулой (1) примет вид

$$|R_{123}|^2 = \frac{|R_{12}|^2 + |R_{23}|^2 \exp(-4K_0 k_2 d) + 2|R_{12}||R_{23}| \exp(-2K_0 k_2 d) \cos(\varphi_2 - \varphi_1 + 2K_0 n_2 d)}{1 + |R_{12}|^2 |R_{23}|^2 \exp(-4K_0 k_2 d) + 2|R_{12}||R_{23}| \exp(-2K_0 k_2 d) \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + 2K_0 n_2 d)}. \quad (4)$$

Для конкретизации параметров в этом соотношении ниже, на основе подходов [3, 27], рассматриваются диэлектрические характеристики воды и обводнённой нефти, образующей на водной поверхности слой водонефтяной эмульсии.

1.2. Комплексная диэлектрическая проницаемость воды

Комплексная диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon_3^* = \varepsilon_{31} + j\varepsilon_{32}$ определяет условия отражения и преломления радиоволн на нижней границе разлива. Она также задаёт диэлектрическую проницаемость дискретной фазы водонефтяной эмульсии (среда 2), образующей плёнку на поверхности воды. Численные значения ε_{31} и ε_{32} рассчитываются по формулам Дебая и регрессионным соотношениям для пресной воды [3]:

$$\varepsilon_{31} = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/[1 + (\lambda_r/\lambda_0)^2], \quad (5)$$

$$\varepsilon_{32} = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/(\lambda_0/\lambda_r + \lambda_r/\lambda_0), \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = 88,045 - 0,4147T_0 + 6,295 \cdot 10^{-4}T_0^2 + 1,075 \cdot 10^{-5}T_0^3, \quad (7)$$

$$\tau_r = 1,768 \cdot 10^{-11} - 6,086 \cdot 10^{-13}T_0 + 1,104 \cdot 10^{-14}T_0^2 - 8,111 \cdot 10^{-17}T_0^3, \quad (8)$$

где $\varepsilon_\infty = 4,9$ — диэлектрическая проницаемость на предельно высоких частотах, ε_s — статическая диэлектрическая проницаемость воды, T_0 — температура воды в градусах Цельсия, λ_0 — длина волны в свободном пространстве, $\lambda_r = 2\pi c\tau_r$ — «длина волны релаксации» молекул воды, τ_r — время релаксации молекул воды, c — скорость света.

Сопоставление теоретических значений комплексной диэлектрической проницаемости воды, полученных на основе соотношений (5)–(8), и результатов измерений для различных частот и температур, приведённых в работе [1], показывает их хорошее соответствие. Это даёт основание использовать развитые в статье [3] подходы при моделировании отражения микроволн от нефтяных разливов на водной поверхности.

Влияние солёности воды на её диэлектрическую проницаемость может быть учтено путём введения ионной электропроводности и использования вместо формул (7) и (8) соответствующих

регрессионных соотношений [3]. Проведённая нами оценка показывает, что максимальное изменение диэлектрической проницаемости воды при увеличении её солёности до 30 промилле имеет место в длинноволновой части рассматриваемого нами диапазона волн. При этом действительная часть диэлектрической проницаемости воды меняется на 7%, а мнимая часть — на 12%.

1.3. Комплексная диэлектрическая проницаемость обводнённой нефти

На основе работы [27] принято, что обводнённая нефть представляет собой обратную эмульсию, в которой непрерывной фазой является «сухая» нефть (неполярная жидкость), а дискретная (внутренняя) фаза образована неконтактирующими сферическими каплями воды (полярная жидкость) с размерами от 1 до 50 мкм. Эмульсия является термодинамически неустойчивой системой [24, 27], и при объёмном содержании влаги больше 0,2÷0,25 (в зависимости от сорта нефти) меняется её агрегатное состояние за счёт образования флоккул.

Диэлектрические свойства эмульсии мы выражаем через диэлектрические свойства фаз и влагосодержание в единичном объёме с помощью несимметричной формулы смешивания Максвелла—Гарнета (известной также под именами других авторов):

$$\frac{\varepsilon_m^* - \varepsilon_c^*}{\varepsilon_m^* + 2\varepsilon_c^*} = w \frac{\varepsilon_d^* - \varepsilon_c^*}{\varepsilon_d^* + 2\varepsilon_c^*}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_m^* = \varepsilon_{m1} + j\varepsilon_{m2}$, $\varepsilon_c^* = \varepsilon_{c1} + j\varepsilon_{c2}$, $\varepsilon_d^* = \varepsilon_{d1} + j\varepsilon_{d2}$ — комплексные диэлектрические проницаемости эмульсии, её непрерывной и дискретной фаз, w — объёмное содержание дискретной фазы (воды) внутри непрерывной фазы (нефти).

Следует отметить, что диэлектрическая проницаемость «сухой» нефти ε_c^* в известных нам подходах при моделировании её разливов находится в области значений от $\varepsilon_c^* = 1,7 + j 0,005$ [15] до $\varepsilon_c^* = 2,6 + j 0,05$ [6] и предполагается не зависящей от частоты и температуры.

Нами используется значение $\varepsilon_c^* = 2,085 + j 0,05$, полученное из результатов лабораторного измерения коэффициента отражения, приведённых в разделе 2. Диэлектрические проницаемости дискретной фазы эмульсии и свободной воды рассчитываются с помощью формул Дебая (5) и (6). По этим значениям соотношение (9) позволяет определить диэлектрические проницаемости эмульсий для различного содержания воды.

На рис. 1 представлены частотные зависимости действительной, ε_{m1} (панель *a*), и мнимой, ε_{m2} (панель *б*), составляющих диэлектрической проницаемости водонефтяной эмульсии при температуре 20 °С, рассчитанные для различного объёмного содержания влаги w (0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20) в нефти по несимметричному соотношению (9). Полученные графики наглядно демонстрируют влияние объёмного влагосодержания эмульсии на частотные зависимости ε_{m1} и ε_{m2} .

Для сравнения с выражением (9) приведём симметричную формулу Клаузиуса—Мосотти, по которой в работах [8, 11, 14, 15, 19] определяется комплексная диэлектрическая проницаемость эмульсии — смеси неполярной и полярной жидкостей:

$$\frac{\varepsilon_m^* - 1}{\varepsilon_m^* + 2} = w \frac{\varepsilon_d^* - 1}{\varepsilon_d^* + 2} + (1 - w) \frac{\varepsilon_c^* - 1}{\varepsilon_c^* + 2}. \quad (10)$$

Следует отметить, что каждое слагаемое в правой части формулы (10) определяет связь диэлектрических проницаемостей компонент смеси с объёмными содержаниями их молекул и их поляризуемостями и задаётся обычным соотношением Клаузиуса—Мосотти [28] (или Лоренц—Лорентца [29]). Известно также, что это соотношение применимо только для неполярных жидкостей и не применимо для полярных. Именно поэтому использование соотношения Клаузиуса—Мосотти (10) для расчёта диэлектрической проницаемости эмульсии — смеси неполярной и полярной жидкостей, допускаемое в отмеченных выше работах, является неправомерным.

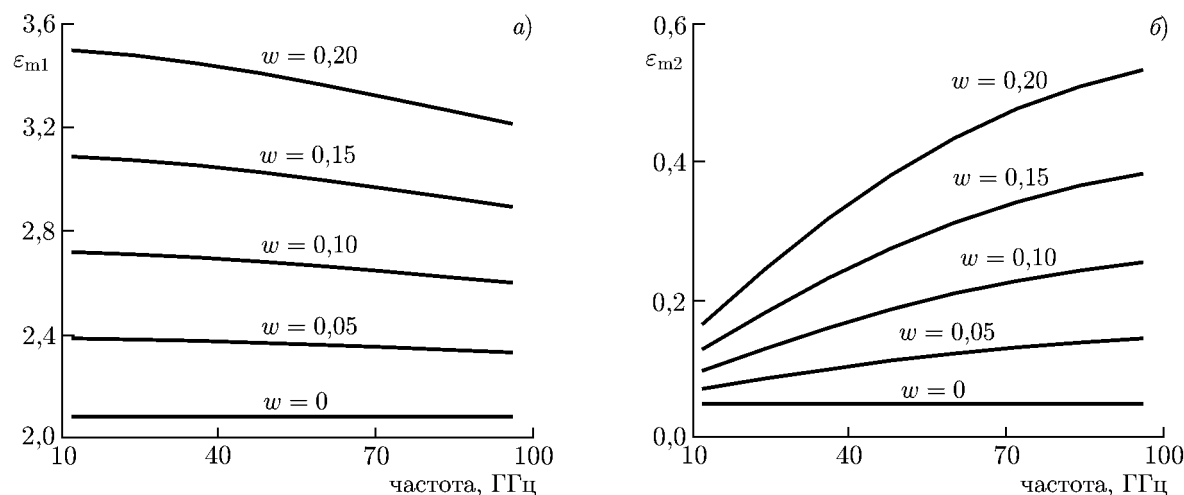


Рис. 1. Действительная ε_{m1} (а) и мнимая ε_{m2} (б) части диэлектрической проницаемости эмульсии, рассчитанные по формуле Максвелла–Гарнета (9) для температуры 20 °С и водностей $w = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,2$

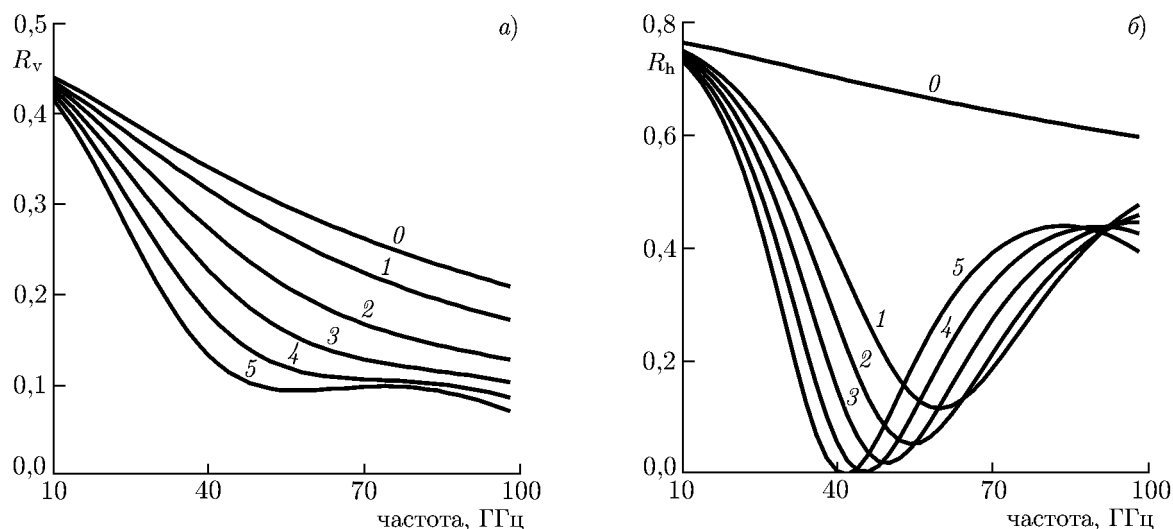


Рис. 2. Коэффициенты отражения излучения с вертикальной R_v (а) и горизонтальной R_h (б) поляризациями от разлива эмульсии с толщиной $d = 1$ мм и с водностями $w = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$, которым соответствуют кривые 1–5, для угла визирования 55° и температуры 20 °С. Кривые 0 отвечают чистой воде

1.4. Результаты расчёта коэффициента отражения

Соотношение (4) с учётом выражений (5), (6) и (9) даёт возможность расчёта частотных зависимостей коэффициентов отражения микроволн R_v и R_h с ортогональными поляризациями для модели разлива обводнённой нефти в зависимости от толщины плёнки и её водности w . При этом должны быть заданы: поляризация электромагнитной волны, угол визирования, температура среды, диэлектрические проницаемости воды и «сухой» нефти.

На рис. 2 приведён пример моделирования частотной зависимости коэффициентов отражения R_v и R_h в диапазоне частот 10÷100 ГГц разлива эмульсии с различными водностями при её

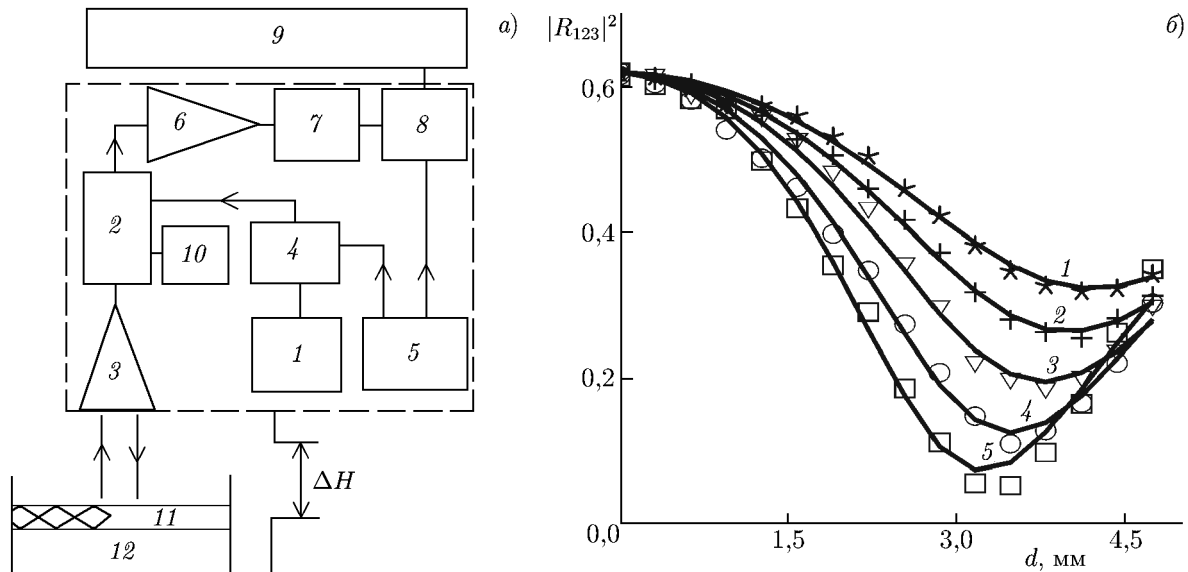


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки: обозначения 1–8 расшифрованы в тексте, 9 – регистратор, 10 – согласованная нагрузка, 11 – нефть, 12 – вода (а). Экспериментальные зависимости коэффициента отражения от слоя эмульсии с толщиной d и с водноостями $w = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$, которым соответствуют аппроксимирующие кривые 1–5 (б). Доверительный интервал измеренных значений не превышает 0,016

толщине 1 мм. Диэлектрические свойства воды и эмульсий рассчитывались, соответственно, по формулам Дебая (5) и (6) и Максвелла–Гарнета (9) для температуры 20 °С.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ РАЗЛИВА ОБВОНЁННОЙ НЕФТИ НА ЧАСТОТЕ 12,4 ГГц

Для проведения измерений коэффициента отражения слоя эмульсии на поверхности воды при наблюдении в надир был разработан радиометрический измерительный стенд (рис. 3а) с подсветкой исследуемой среды широкополосным шумовым сигналом с центральной частотой 12,4 ГГц и полосой частот 1 ГГц. Выбранная частота стенда соответствует одной из частот прибора «ПРИНТ-3» [31], являющегося сертифицированным средством дистанционного измерения толщины слоя нефти на водной поверхности.

Измерения проводились по однопозиционной схеме [32, 33] с подачей сигнала подсветки от генератора шума 1 через направленный ответвитель 2 на пирамидальную антенну 3 с апертурой 80×80 мм. Сигнал подсветки модулировался PIN-аттенюатором 4 с частотой $F_{\text{мод}}$ сигнала задающего генератора опорных напряжений 5. В первый полупериод сигнала модуляции PIN-аттенюатор открыт и излучение генератора шума высвечивается антенной на исследуемую двухслойную среду (или эталон), отражается от неё и поступает через ту же антенну и направленный ответвитель на вход малошумящего усилителя 6 приёмника с чувствительностью 0,3 К при постоянной времени 1 с. После преобразования сигнала в промежуточную полосу частот и квадратичного детектирования 7 на выходе синхронного детектора 8, управляемого сигналом модуляции синхронно с генератором шума, регистрируется уровень сигнала, пропорциональный сумме мощности отражённого сигнала генератора шума подсветки и мощности собственного излучения образца. Во второй полупериод сигнала модуляции PIN-аттенюатор закрыт и радиометр принимает только собственное излучение образца. Разность сигналов на выходе синхронного де-

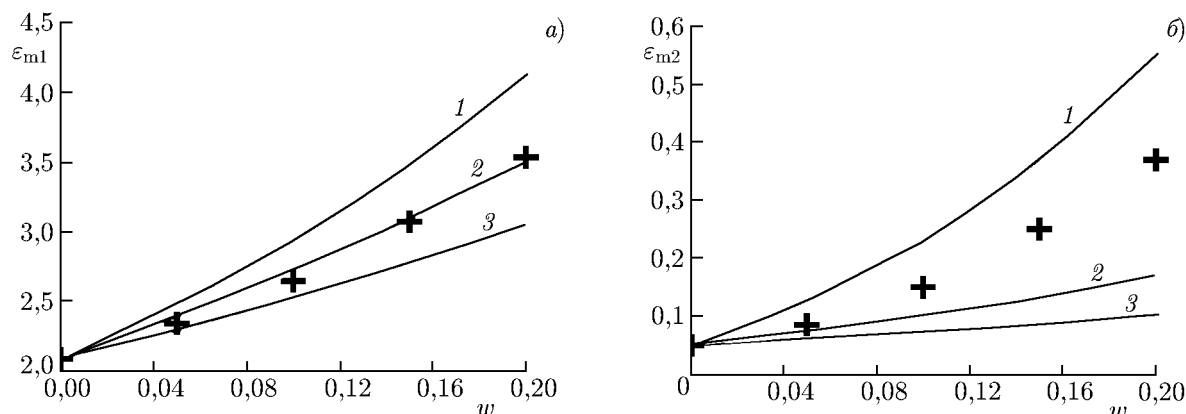


Рис. 4. Действительная ϵ_{m1} (а) и мнимая ϵ_{m2} (б) части диэлектрической проницаемости эмульсии, определённые из экспериментальных данных (символы +) и расчётами по формулам Лихтенеккера — сплошные линии 1, Максвелла—Гарнета — 2 и Клаузиуса—Моссотти — 3

тектора в двух полупериодах сигнала модуляции даёт поток излучения подсветки, отражённого от исследуемого образца, т. е. его коэффициент отражения.

Геометрические размеры калибровочных эталонов коэффициента отражения (металлический лист и поглощающий материал — «чёрное тело») соответствовали размерам тестовой кюветы 269×295 мм, в которой размещался исследуемый образец — слой воды с толщиной 50 мм с плёнкой «сухой» нефти или водонефтяной эмульсии с различным объёмным содержанием влаги. Исследуемый образец (или эталон) размещался в дальней зоне антенны. Освещаемая главным лепестком антенны площадь поверхности образца была меньше геометрических размеров кюветы. Механизм перемещения кюветы 9 с образцом (или эталоном) по высоте ΔH позволял определять амплитуду интерференционной составляющей сигнала и его средний уровень по отношению к уровню сигнала от эталона. Время накопления сигналов составляло порядка 10 с.

Нефтяная эмульсия с заданным объёмным влагосодержанием готовилась с помощью механического перемешивания. Режим эмульгирования обеспечивал получение дискретной фазы с диаметром капелек меньше 50 мкм. Приготовленная эмульсия добавлялась в кювету с водой порциями по $25 \pm 0,06$ мл. При этом расчётное приращение толщины слоя d составляло $0,316 \pm 0,002$ мм.

После каждого изменения толщины слоя эмульсии сравнивались мощности принимаемых сигналов от образца и от металлической пластины (эталона) [32]. По их отношению определялся коэффициент отражения для каждого из 15 последовательных изменений толщины слоя эмульсии при соответствующем объёмном влагосодержании w . Время единичного измерения составляло около 2,5 мин. Проведённая проверка показала, что за время серии измерений объёмное влагосодержание эмульсий оставалось неизменным.

Результаты измерений коэффициентов отражения от лабораторных разливов эмульсии в зависимости от толщины плёнки d для различных водностей w представлены на рис. 3б.

Действительные и мнимые части комплексных диэлектрических проницаемостей «сухой» нефти и водонефтяных эмульсий с соответствующей водностью находились сравнением экспериментальных данных с рассчитанными по соотношению (4) аппроксимирующими зависимостями (сплошные кривые 1–5) по методу наименьших квадратов [34]. При этом диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon_3^* = 55,0 + j 35,2$ определялась по формулам (5) и (6) для температуры $T_0 = 20^\circ\text{C}$, соответствующей условиям эксперимента. Проведённые оценки показывают, что доверительный интервал экспериментальных значений коэффициентов отражения не превышает 0,016.

На рис. 4 представлены зависимости от водности действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости эмульсий, полученные по измерениям коэффициентов отражения от модельных разливов и с помощью расчётов по несимметричной и двум симметричным формулам смешивания. Из результатов сравнения следует, что расчёты по формуле Максвелла—Гарнета (9) хорошо соответствуют экспериментальным значениям для действительной части ε_{m1} и несколько расходятся с ними для мнимой части ε_{m2} .

Расчёты по симметричным формулам смешивания Клаузиуса—Моссотти и Лихтенеккера приведены на рис. 4 для сравнения, поскольку они рассматриваются авторами [8, 11, 14, 15, 19, 24] как модель диэлектрической проницаемости эмульсии (смеси неполярной и полярной жидкостей), в то время как эти формулы применимы только для описания диэлектрических свойств смеси неполярных жидкостей [27–29].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами выполнено численное моделирование отражения микроволн от поверхности акватории с разливом обводнённой нефти. При расчётах использовалось модельное представление разлива в виде плоскостной полубесконечной (в направлениях вверх и вниз) среды с резким изменением диэлектрических свойств на границах раздела. Диэлектрические свойства воды рассчитывались по формулам Дебая, а диэлектрические свойства обводнённой нефти — на основе теории, развитой для бинарных систем, т. е. по несимметричной формуле смешивания Максвелла—Гарнета.

Получены данные о зависимостях коэффициента отражения от частоты, угла визирования, толщины разлива, температуры среды и объёмного содержания влаги в нефтепродукте. По результатам численного моделирования спектральных характеристик отражённого сигнала в диапазоне частот $10\div 100$ ГГц и измерений коэффициента отражения на фиксированной частоте 12,4 ГГц показано, что для определения вариаций диэлектрических свойств при обводнении нефтяной плёнки необходимо применять несимметричные формулы смешивания. Использование симметричных соотношений для этих целей является неправомерным, поскольку они могут применяться только для описания диэлектрических свойств смеси неполярных жидкостей.

Сопоставление значений комплексной диэлектрической проницаемости водонефтяной эмульсии, полученных по результатам измерений коэффициента отражения излучения от модельных разливов и рассчитанных по формуле Максвелла—Гарнета, показывает хорошее соответствие для действительной части и наличие некоторого расхождения для мнимой части. Для объяснения этого расхождения можно предположить, что диэлектрические свойства капелек воды, образующих дискретную фазу эмульсии, отличаются от принятых для свободной воды.

Представляется целесообразным моделирование отражения от нефтяного разлива в метеорологических условиях, характерных для высоких широт, и проведение соответствующих измерений в реальных условиях открытых акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Water, a comprehensive treatise. V.1. The physics and physical chemistry of water / Ed. by F. Franks. New York: Plenum Press, 1972.
2. Hollinger J. P., Menellia R. A. // Science. 1973. V. 181, No. 4094. P. 54.
3. Klein L. A., Swift C. T. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1977. V. 25, No. 1. P. 104.
4. Богородский В. В., Козлов А. И., Тучков Л. Т. Радиотепловое излучение земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 224 с.
5. Lääperi A., Nyfors E. // Proc. IGARSS'82, Germany, Munich, June 1–4 1982. V. TP-4. P. 4.1.

6. Hollinger J. P., Menellia R. A. // Remote Sensing Control Polut. 1984. P. 267.
7. Сёмин А. Г., Хапин Ю. Б. // Тр. Гос. научно-исслед. центра изучения природных ресурсов. 1986. № 26. С. 151.
8. Skou N. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1986. V. 24, No. 3. P. 360.
9. Hover G. L., Murphy T. J., Brown E. R., et al. Design, construction, test and evaluation of a frequency scanning radiometer for measuring oil slick thicknesses: Report No. CG-D-29-94. US Coast Guard of Research and Development, 1994. P. 142 p.
10. Pelyushenko S. A. // Spill Sci. Technol. Bull. 1995. V. 2, No. 4. P. 249.
11. Гайкович К. П., Снопик Л. М., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38, № 11. С. 1105.
12. Goodman R., Braun H., Bitner J. // Proc. 4th Intern. Conf. Remote Sensing for Coastal Environments, USA, Orlando, March 17–19, 1997. P. 31.
13. Pelyushenko S. A., Racut' I. V. // Proc. 3rd Intern. Airborne Remote Sensing Conf. Exhibition, Denmark, Copenhagen, July 7–10, 1997. P. II-106.
14. Brown E. R., McMahon O. B., Murphy T. J., et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1998. V. 46, No. 12. P. 1989.
15. Gaikovich K. P. // Conf. Proc. 1998 IEEE Intern. Conf. Mathemat. Methods Electromag. Theory MMET'98, Kharkov, Ukraine, June 2–5, 1998. V. 1. P. 874.
16. Гайкович К. П., Ошарин А. Н. // Тез. докл. XIX Всерос. научн. конф. «Распространение радиоволн», Казань, 22–25 июня 1999 г. Казань: Хэтер, 1999. С. 186.
17. Пелюшенко С. А., Ракуть И. В., Мордвинкин И. Н., Пелюшенко А. С. // Тр. 5-й Научн. конф. по радиофизике, посвящённой 100-летию со дня рождения А. А. Андропова, 7 мая 2001 г. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2001. С. 144.
18. Кротиков В. Д., Мордвинкин И. Н., Пелюшенко А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 3. С. 243.
19. Пелюшенко А. С. // Тр. 7-й Научн. конф. по радиофизике, 7 мая 2003 г. Нижний Новгород: ННГУ, 2003. С. 172.
20. Пелюшенко С. А., Ракуть И. В., Мордвинкин И. Н., Ольков Н. Н. // Матер. Междунар. симпоз. «Инженерная экология», 1–2 декабря 2003 г. М.: ИРЭ РАН, 2003. С. 170.
21. Gaikovich K. P. Inverse problems in physical diagnostics. New York: Nova Science Publ., 2004.
22. Пелюшенко С. А., Кисляков А. Г., Ракуть И. В. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Радиофизика. 2005. № 1 (3). С. 26.
23. Фурашов Н. И., Дудин В. Е., Свердлов Б. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 6. С. 489.
24. Шавин П. Б., Бирульчик В. П., Мордвинкин И. Н., Советкин М. Ю. // Тр. 10-й Научн. конф. по радиофизике, посвящённой 90-летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г. С. Горелика, Нижний Новгород, 5 мая 2006 г. С. 11.
25. Ракуть И. В., Кисляков А. Г., Кротиков В. Д. и др. // Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Радиофизика. 2011. № 5 (3). С. 128.
26. Милославский В. К., Маковецкий Е. Д., Агеев Л. А., Белошенко К. С. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107, № 5. С. 854.
27. Теория и практика экспрессного контроля влажности твёрдых и жидких тел / Под ред. Е. С. Кричевского. М.: Энергия, 1980. 240 с.
28. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. Область слабых полей. М., Л.: Гостехтеоретиздат, 1949.
29. Тамм И. Е. Основы электричества. М.: Наука, 1966. 624 с.
30. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
31. Сертификат об утверждении типа средств измерений RU.E.27.011.A № 13919 приборов пор-

- тативных трёхчастотных «ПРИНТ-3» / НИРФИ, г. Нижний Новгород. Регистр. № 24194-02. Госстандарт России, 2003.
32. Пелюшенко С. А., Миллер М. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31, № 4. С. 489.
33. Ракуть И. В., Пелюшенко С. А., Пелюшенко А. С., Железняков Ю. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 890.
34. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1962. 352 с.

Поступила в редакцию 26 апреля 2013 г.; принята в печать 12 февраля 2015 г.

MODELING OF MICROWAVE REFLECTION FROM THE SURFACE OF WATER BASINS WITH SPILLS OF WATER-CUT OIL

V. D. Krotikov, S. A. Pelushenko, I. V. Rakut', and V. Yu. Savelyev

We consider specific features of reflection of microwaves from the surface of a water basin for the two-layer model of oil spills, which are determined by a water-cut-oil film. Within the spill model, the dielectric properties of water were allowed for in accordance with the Debye theory, and the dielectric properties of the water-cut oil, in accordance with the theory developed for binary systems. The data about variations in the values of reflection coefficients depending on the frequency, viewing angle, thickness of the oil film, and moisture contents in the film are obtained. The dependencies of reflection coefficients on the film thickness are determined for various values of volume contents of the water fraction in oil. Complex values of the dielectric permittivity of oil-water emulsions with preset volume moisture contents are found. Describing the obtained dependencies of the complex dielectric permittivity of the emulsion on the volume moisture content requires application of asymmetrical formulas for the mixture of polar and nonpolar fluids.