

Д. Л. Василенко, С. В. Калинин, В. Ф. Янушкевич

**Моделирование взаимодействия
электромагнитных волн
с анизотропной средой**

Исследуется процесс взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с электродинамической моделью среды над углеводородной залежью (УВЗ) на основе существующей теории взаимодействия ЭМВ и плазмоподобных сред. Приводится анализ частотных зависимостей контраста коэффициентов отражения между анизотропной неоднородностью и однородной подстилающей поверхностью в режиме мощного низкочастотного сигнала. Исследуются компоненты матрицы поверхностного импеданса анизотропной среды. Полученные результаты позволяют осуществить качественную оценку использования двухчастотных и модулированных ЭМВ при оптимизации методов электромагнитного поиска и оконтуривания УВЗ.

Наряду с натурными исследованиями углеводородной залежи (УВЗ) широко применяется физическое моделирование с электродинамическим подходом, основанным на использовании связи характеристик исследуемого объекта с параметрами воздействующих сигналов.

Аналогия исследуемой среды над залежью углеводородов с плазмоподобным образованием, имеющим анизотропные свойства, позволяет использовать для изучения взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ:

- кинетический подход и его приближенное решение в области низких частот [5];
- гидродинамическое рассмотрение процессов взаимодействия в сильных магнитных полях, в том числе с учетом столкновений, в нелинейных режимах при исследовании устойчивости решений [9];
- кинематический и гидродинамический подходы в частных случаях взаимодействия слабых и сильных электромагнитных полей [6];
- моделирование одножидкостной плазмы в различных энергетических состояниях [3] и ограничение условий существования анизотропии магнитоактивной плазмы на высоких частотах.

Предметом анализа плазмоподобных сред служат применяемые для создания радиомаскировки и радиоукрытий различные аэрозоли, факелы горючих смесей и плазменные источники, создающие облака ионизированного газа, а также плазменные разряды (газовые, молнии), твердотельная электроионодырочная плазма полупроводников и т. д.

Анализ основных направлений исследования параметров плазмоподобных образований с помощью электромагнитных методов (ЭММ) показывает, что наиболее общим для изучения процесса взаимодействия ЭМВ с анизотропной средой (АС) является метод кинетического уравнения, использующий функцию пространственно-временного распределения частиц. Для сильно разреженного газа, когда взаимодействие между частицами мало (в пределе бесстолкновительный режим), компоненты тензора диэлектрической проницаемости однозначно определяются гидродинамическим приближением.

Для рассмотренной электрохимической обстановки в окрестности залегающих углеводородов следует отдать предпочтение квазигидродинамическому приближению с использованием многочастичных электронно-ионных токов и феноменологически заданных частот столкновений, ввиду отсутствия необходимости учета точных пространственно-временных перемещений частиц.

В рамках такого приближения уравнение движения электрона имеет вид

$$m \frac{d\dot{\vec{q}}}{dt} + v m \dot{\vec{q}} = q \vec{E} + q \mu_0 \left[\dot{\vec{q}}, \dot{H}_0 \right], \quad (1)$$

где m , q , $\dot{\vec{q}}$ — масса, заряд и скорость движения частиц, v — частота столкновений электрона с тяжелыми частицами; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; \vec{E} — напряженность электрического поля ЭМВ.

Решение вопроса о воздействии гармонической ЭМВ на АС с использованием (1) приведено в [4].

Исследование процесса взаимодействия двухчастотной ЭМВ на АС представляет теоретический и практический интерес, связанный с поиском новых решений при реализации новых и модернизации действующих ЭММ. Появление кроссполяризационной компоненты в структуре поля отраженной от анизотропной неоднородности плоской волны с заданной линейной поляризацией приводит к необходимости исследования пары коэффициентов Френеля $R_{\text{ВВ}}$, $R_{\text{ВГ}}$ для вертикальной и $R_{\text{ГГ}}$, $R_{\text{ГВ}}$ для горизонтальной поляризации падающей волны. В случае вертикальной поляризации ЭМВ для выбранной системы координат справедливы соотношения [2]

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x_{\text{ин}}} + E_{x_{\text{от}}} = E_0 (1 - R_{\text{ВВ}}) \cos \Theta, \\ E_y &= -E_0 R_{\text{ВГ}}, \\ H_x &= \frac{E_0}{Z_0} R_{\text{ВГ}} \cos \Theta, \\ H_y &= \frac{E_0}{Z_0} (1 + R_{\text{ВВ}}) \end{aligned} \quad (2)$$

и импедансные граничные условия [7]

$$\begin{aligned}
 E_x &= -Z_0 (\dot{Z}_{11} H_x - \dot{Z}_{12} H_y), \\
 E_y &= -Z_0 (\dot{Z}_{21} H_x - \dot{Z}_{22} H_y), \\
 \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{j2\sqrt{\epsilon_R \epsilon_L}} (\sqrt{\epsilon_R} - \sqrt{\epsilon_L}), \\
 \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_R \epsilon_L}} (\sqrt{\epsilon_R} + \sqrt{\epsilon_L}),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где E_0 , Θ — амплитуда падающей волны и угол падения ЭМВ относительно внешней нормали \vec{n} ; $E_{x,y}$, $H_{x,y}$ — проекции падающей и отраженной волны на соответствующие координатные оси; Z_0 — характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность.

Исследование отражательных характеристик АС

Отражательную способность среды над залежью углеводородов при воздействии ЭМВ с линейной поляризацией в режиме двухчастотного взаимодействия можно оценить по контрасту коэффициентов отражения между АС и подстилающей поверхностью по формуле [1]:

$$\Delta R = 20 \lg |R_p - R_{pp}| \tag{4}$$

Значение коэффициента отражения подстилающей среды R_p с конечной диэлектрической проницаемостью ϵ_p и проводимостью s_p для ЭМВ с вертикальной поляризацией определяется по формуле [8]

$$\dot{R}_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}} = R_p \exp j\varphi_p, \tag{5}$$

где $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности.

Исследование частотных зависимостей модулей и фаз коэффициентов Френеля проведено в широком диапазоне частот для случая падения ЭМВ с вертикальной поляризацией на анизотропную неоднородность при углах падения $q = 0, 15, 30, 45, 60$ и 85° . При этом концентрация частиц, частоты столкновений, диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость диэлектрического наполнителя среды выбирались такими же, как и для исследований компонентов тензора среды над УВЗ.

Отражательные характеристики при двухчастотном взаимодействии с АС в режиме мощного низкочастотного сигнала

На рис. 1–4 представлены частотные зависимости модуля $|R_{ВВ}|$ и фазы $j\varphi_{ВВ}$ при $q = 0^\circ$ для различных соотношений частот и амплитуд двух воздействующих сигналов, рассчитанных по формулам (3).

В исследуемом диапазоне частот наблюдается неравномерный характер изменения $|R_{ВВ}|$. Модуль коэффициента отражения имеет максимальное значение, равное 1,0 в диапазоне частот от 100 кГц до 200 МГц. На частотах в диапазоне от 100 кГц до 100 МГц наблюдается рост этого коэффициента от 0,8 до 1,0, а на частотах выше 200 МГц — плавное уменьшение от 1,0 до 0,3–0,4 на частоте $f_2 = 1$ ГГц. Величина $|R_{ВВ}|$ зависит от соотношения амплитуд и частот взаимодействующих сигналов со средой над залежью, т. е. от параметров k_W , k_E . Влияние коэффициента k_W сказывается незначительно, наибольшие отличия величин $|R_{ВВ}|$ получаются при небольших значениях k_W , например 10^{-1} , а при $k_W = 10^{-3}$ и $k_W = 10^{-6}$ отличия характеристик практически несущественны. Влияние амплитуд взаимодействующих волн, т. е. параметра k_E , проявляется более заметно. Например, при $k_W = 10^{-6}$ на частоте $f_2 = 1$ ГГц наблюдается уменьшение $|R_{ВВ}|$ до значения 0,36 при $k_E = 10^{-1}$ и до значения 0,50 при $k_E = 10^{-6}$. В целом характер изменения величины $|R_{ВВ}|$ от частоты f_2 при различных коэффициентах k_E и k_W имеет одинаковый вид.

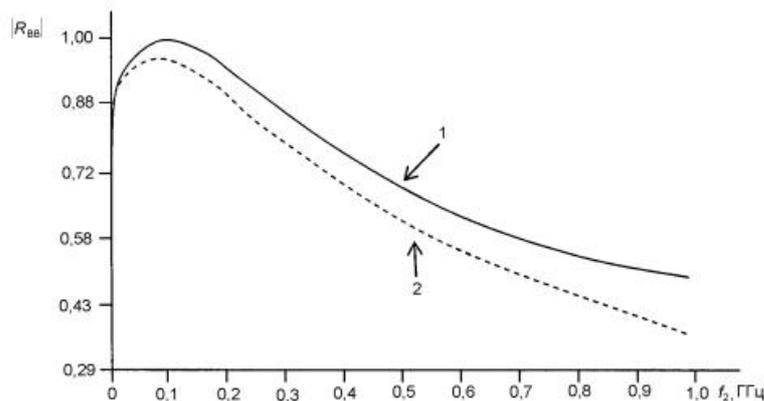


Рис. 1. Зависимости $|R_{ВВ}| = j(f_2)$ при нормальном падении:
1 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

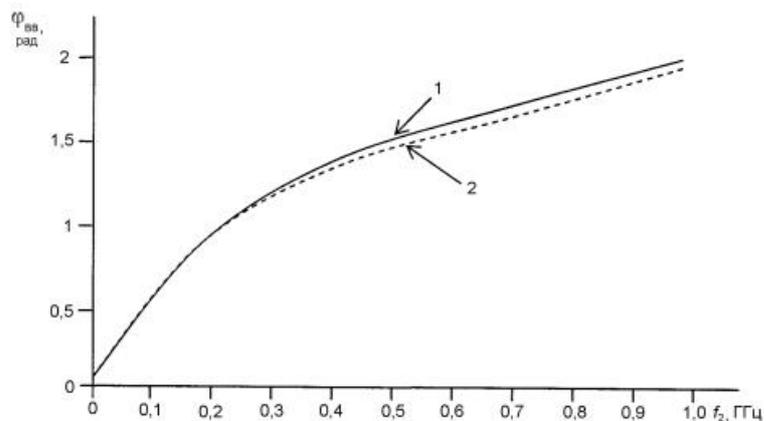


Рис. 2. Зависимости $j_{ВВ} = j(f_2)$ при $q = 0^\circ$:
1 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

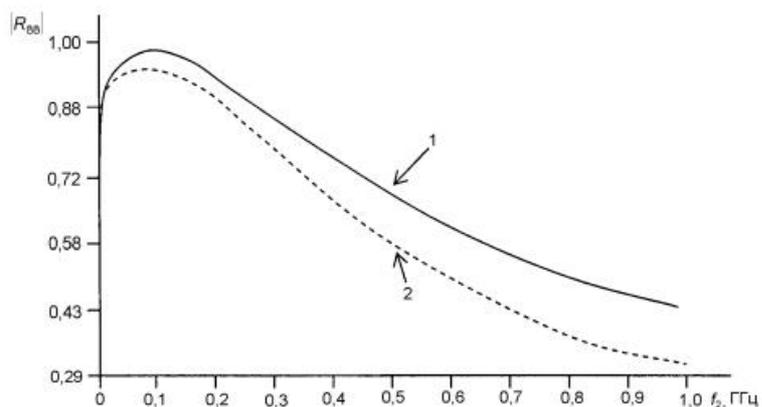


Рис. 3. Зависимости $|R_{ВВ}| = j(f_2)$ при нормальном падении:
1 — для $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — для $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$

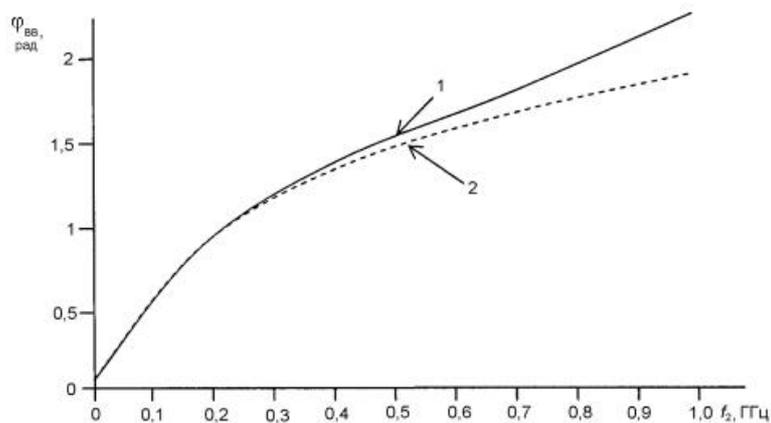


Рис. 4. Зависимости $j_{ВВ} = j(f_2)$ при нормальном падении:
1 — для $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — для $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$

Фазочастотные характеристики $j\mathbb{B}\mathbb{B} = j(f_2)$ нелинейно изменяются от значений 0,05 рад на частоте $f_2 = 10^6$ Гц до 1,8–1,9 рад на частоте $f_2 = 1$ ГГц. Влияние параметров k_W и k_E несущественно сказывается на изменении фазы. При $k_W = 10^{-3}$ все характеристики практически сливаются в одну линию. Наиболее заметно отличие характеристик при $k_W = 10^{-1}$, т. е. при незначительном разное частот f_1 и f_2 .

Влияние угла падения q практически незаметно при $q = 15^\circ; 30^\circ$. При дальнейшем увеличении q происходит некоторое изменение характеристик, а при $q = 85^\circ$ $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}| = 1$ для всех значений частот f_2 , а аргумент этой величины $j\mathbb{B}\mathbb{B} = -\rho$ при всех значениях частоты f_2 .

На рис. 5 представлены частотные зависимости $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}|$ от частоты f_2 . При ее изменении от 1 до 200 МГц наблюдается рост величины $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}|$ до значения 1,0 и затем постепенное уменьшение. Так, на частоте $f_2 = 1$ ГГц при $q = 0^\circ$, $k_W = 10^{-6}$ и $k_E = 10^{-6}$ $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}| = 0,56$, а при $k_W = 10^{-6}$ и $k_E = 10^{-1}$ $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}| = 0,39$. Фаза этого коэффициента возрастает от 0 рад на частоте $f_2 = 1$ МГц до 2–2,2 рад на частоте $f_2 = 1$ ГГц. Вариация k_E не сказывается на изменении фазы коэффициента отражения $\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}$, но существенна для его модуля. При уменьшении k_E , т. е. использовании маломощного высокочастотного сигнала, наблюдается уменьшение коэффициента отражения. При уменьшении параметра k_W общий вид характеристик сохраняется, за исключением численных значений параметров $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}|$ и $j\mathbb{G}\mathbb{G}$. На фазовых характеристиках большая контрастность проявляется при $k_W = 10^{-1}$. Величина $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}|$ при одновременном уменьшении k_W и k_E частично может уменьшаться, например при $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$ $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}| = 0,39$ на частоте $f_2 = 800$ МГц.

Отличие значения $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}|$ при $k_W = 10^{-6}$ и $k_E = 10^{-1}$ составляет величину $\Delta\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma} = 0,03$ на частоте $f_2 = 100$ МГц, $\Delta\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma} = 0,09$ на частоте $f_2 = 500$ МГц, $\Delta\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma} = 0,13$ на частоте $f_2 = 1$ ГГц, т. е. наблюдается линейный характер зависимости $\Delta\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma} = y(f_2)$.

Величина $j\mathbb{G}\mathbb{G} = 2,5$ рад при $k_W = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$ на частоте $f_2 = 1$ ГГц.

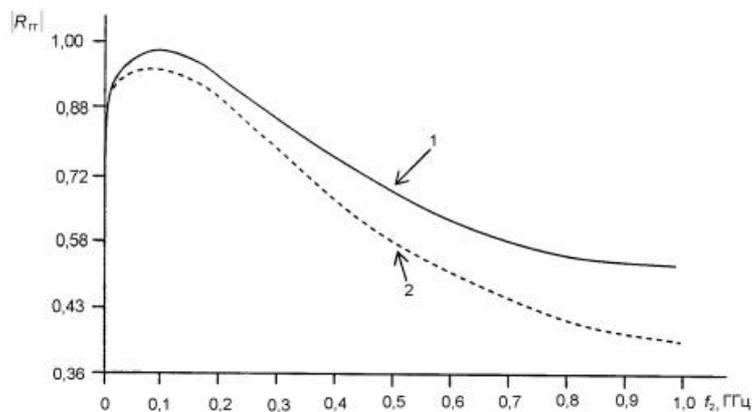


Рис. 5. Зависимости $|\mathbb{R}_{\Gamma\Gamma}| = j(f_2)$ при $q = 0^\circ$:
1 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — для $k_W = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$

Заключение

1. При нормальном и скользющем падении двухчастотной ЭМВ наибольший контраст на границе контура АС проявляется в низкочастотной части исследуемого диапазона частот (100–200 МГц). Зондирование на более высоких частотах оказывается эффективным для этих целей при наклонном падении ЭМВ.
2. Установлена частотнозависимая закономерность поведения ЭМП на границе вмещающих пород и среды над УВЗ. Использование двух альтернативных частот, имеющих импедансное различие, позволяет улучшить идентификацию УВЗ.
3. Анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ свидетельствует о необходимости фазовых измерений характеристик отраженных сигналов на двух или нескольких частотах, способствующих повышению уровня достоверности и точности выделения АС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов Д. В., Москвичев В. Н., Турук Г. П., Янушкевич В. Ф. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны // Тез. докл. 35-й Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. Владивосток, 1992. Т. 1, ч. 1. С. 59–62.
2. Источники и приемники СВЧ-колебаний — первичное и вторичное излучение радиоволн: Отчет о НИР / Минск. радиотехн. ин-т; Рук. темы В. Я. Аверьянов. № ГР 0186008079. Минск, 1990. 201 с.
3. Кондратенко А. Н. Плазменные волноводы. М.: Атомиздат, 1976. 220 с.
4. Москвичев В. Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью // Радиотехника и электроника. Минск: Высш. шк., 1989. Вып. 18. С. 91–96.
5. Новиков В. В. О кинетическом подходе к описанию электрических свойств нижней ионосферы в диапазоне СДВ // Проблемы дифракции и распространения радиоволн. Л., 1981. Вып. 18. С. 29–43.
6. Платман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействие в плазме твердого тела. М.: Мир, 1975. 438 с.
7. Хаскинд М. Д. Распространение электромагнитных волн над гиротропной средой // Радиотехника и электроника. М.: Наука, 1961. Т. 6, № 6. С. 886–894.
8. Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
9. Yu M. Y., Shukla P. K., El-Nadi A. Linear and nonlinear instabilities of the electron convection mode // Phys. Rev. A: I. Phys., 1985. Vol. 32, № 1. P. 613–616.

D. L. Vasilenko, S. V. Kalintsev, V. F. Yanushkevich

SIMULATION OF INTERACTION BETWEEN ELECTROMAGNETIC WAVES AND ANISOTROPIC MEDIUM

The given article investigates interaction between electromagnetic waves (EMW) and an electrodynamic model of the medium over HCP basing on the existing theory of interaction between EMW and plasma-like mediums. Subject to analysis being frequency dependences of reflection factors' contrast between anisotropic inhomogeneity and uniformity of underlying surface under a powerful low-frequency signal. The authors investigate matrix components regarding surface impedance of anisotropic medium. The obtained results allow to make a qualitative evaluation of double-frequency EMW and modulated EMW under optimizing me-thods of electromagnetic search and delineation of HCP.