

УДК 621.376.6

## АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ НАД ЗАЛЕЖЬЮ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИГНАЛОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ СМЕШАННОГО ТИПА

С.В. КАЛИНЦЕВ, канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, В.Б. ТАЛДЫКИН  
(Полоцкий государственный университет)

*Исследуется процесс воздействия электромагнитных волн на анизотропную среду на основе существующей теории взаимодействия электрических сигналов и анизотропных сред. Результаты, полученные в ходе исследований, позволяют осуществить качественную оценку использования модулированных сигналов для оптимизации методов электромагнитного поиска и оконтуривания углеводородных залежей.*

**Ключевые слова:** анизотропная среда, залежь углеводородов, квазигидродинамическое приближение, модулированный сигнал, оконтуривание залежей углеводородов, фазовая характеристика, частота столкновений.

**Введение.** Представив среду над углеводородной залежью (УВЗ) в виде среды, которая имеет анизотропные свойства, можно провести исследование взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с углеводородной залежью. При этом для рассматриваемой электрофизической обстановки в окрестности УВЗ можно использовать квазигидродинамическое приближение с применением многочастичных электронно-ионных токов и заданных частот столкновений ввиду того, что нет необходимости учитывать пространственно-временное перемещение частиц.

Наряду с исследованиями реальной УВЗ, очень широко применяется электрофизическое моделирование, связанное с использованием электродинамического подхода, который основан на использовании взаимосвязи характеристик рассматриваемого объекта с рядом параметров применяемых электромагнитных сигналов.

Представляя среду над УВЗ в виде среды, имеющей анизотропные свойства, при изучении взаимодействия ЭМВ с УВЗ можно использовать существующие решения для изучения анизотропных сред (АС).

Наиболее приемлемым методом при изучении процесса взаимодействия ЭМВ со средой над УВЗ при анализе основных параметров подобных образований является метод кинетического уравнения [1], использующий функцию пространственно-временного распределения частиц.

Для очень разреженного газа взаимодействие между его частицами крайне мало, при этом компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды могут быть определены гидродинамическим приближением.

Вместе с тем для рассматриваемой электрофизической обстановки в окрестности УВЗ необходимо использовать квазигидродинамическое приближение с применением многочастичных электронно-ионных токов и заданных частот столкновений ввиду того, что нет необходимости учитывать пространственно-временное перемещение частиц [2].

С учетом данного приближения уравнение движения электрона примет вид

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

где  $m$ ,  $q$ ,  $\dot{\mathfrak{G}}$  – масса, заряд и скорость движения частиц соответственно;

$v$  – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\dot{E}$  – напряженность электрического поля ЭМВ.

Решение вопроса о воздействии гармонической ЭМВ на среду над УВЗ с использованием (1) приведено в [3].

Изучение процесса воздействия многочастотных ЭМВ на АС представляет теоретический и практический интерес в связи с возможностью усовершенствования существующих методов поиска и обнаружения УВЗ.

**Основная часть.** Компоненты тензора диэлектрической проницаемости, определяющие взаимодействие ЭМВ со средой над УВЗ, зависят от электродинамических параметров потока частиц, дисперсии параметров магнитодиэлектрического наполнителя и поля подмагничивания Земли:

$$\dot{\varepsilon}_{\zeta} = \varepsilon_{\zeta}(f, N_e, k_u, v_u, v_e, \varepsilon_r[f], \sigma[f], \mu_r, H_0[\theta, \alpha]) \quad (2)$$

Такая многопараметричность определяет множественность решений при определении резонансного характера взаимодействия ЭМВ с АС. В этом случае представляет интерес выявление факторов, влияющих на процесс взаимодействия, для оптимизации выбора параметров воздействующих ЭМВ. Численные исследования компонентов тензора диэлектрической проницаемости выбранной модели позволяют провести оценки основных закономерностей при вариации одного или нескольких параметров. Аттестация компонентов или комбинаций компонентов тензора диэлектрической проницаемости может быть проведена по двум вариантам.

1. Одномерный:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_\xi &= \varepsilon_\xi (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n), \\ \varphi_m &= \text{var}, \text{ из } \varphi_1 \dots \varphi_n = \text{const}, \\ m &= 1 \dots n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\xi$  – номер компонента или комбинации компонентов тензора,  
 $\varphi_m$  – аттестационный параметр.

2. Двухмерный:

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \text{var}, \varphi_h = \text{var} \text{ из } \varphi_1 \dots \varphi_n = \text{const}, \\ m &= 1 \dots n, h \neq m \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varphi_m &= \text{var}, \varphi_h = \text{var}, \varphi_\tau = \text{var} \text{ из } \varphi_1 \dots \varphi_n = \text{const}, \\ m &= 1 \dots n, h \neq m, \tau \neq m, h \neq \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом алгоритмы оценок, направленные на определение закономерностей резонансного поведения ЭМВ, зависят от исследуемых параметров выбранной электродинамической модели.

При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал имеет вид

$$e(t) = E_\omega (1 + k_m \cos \Omega t) \cos [\omega t + \beta \cdot \cos \Omega t], \quad (5)$$

где  $E_\omega$  – амплитуда сигнала несущей частоты  $\omega$ ;  
 $k_m$  – коэффициент амплитудной модуляции;  
 $\beta$  – индекс частотной модуляции.

При воздействии сигнала со смешанной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) составляющие скорости частиц будут определяться

$$\begin{cases} \vartheta_x = \frac{e}{m} E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) \frac{j\tilde{\omega}_4 + \nu}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} - \frac{e}{m} \omega_r E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) \frac{1}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}, \\ \vartheta_y = \omega_r \frac{e}{m} \frac{E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} + \frac{e}{m} \frac{E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}, \\ \vartheta_z = \frac{e}{m} \frac{E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\tilde{\omega}_4 = \omega [1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]. \quad (7)$

Плотности токов определяются выражениями

$$\begin{cases} \delta_x = \varepsilon_0 \omega_n^2 E_x \frac{(1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} - \frac{\varepsilon_0 \omega_n^2 \omega_r E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}, \\ \delta_y = \frac{\varepsilon_0 \omega_n^2 \omega_r E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} + \frac{\omega_n^2 \varepsilon_0 E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}, \\ \delta_z = \frac{\varepsilon_0 \omega_n^2 E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}, \end{cases} \quad (8)$$

а компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды для двух частичного потока

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} + j \left[ \frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega} \frac{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{(\omega_{\Gamma i} - v_i)^2 - \tilde{\omega}_4^2}{((v_i + \omega_{\Gamma i})^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} + \right. \\ &\quad \left. - j \left[ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega} \frac{(\tilde{\omega}_4 + v_i)^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{((v_i + \omega_{\Gamma i})^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_4 v_i \omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega [(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2]} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega} \frac{(\tilde{\omega}_4 + v_i)^2 + v_i^2}{((v_i + \omega_{\Gamma i})^2 - \tilde{\omega}_4^2)^2 + 4\tilde{\omega}_4^2 v_i^2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 - k_m^2 \sin \Omega \cdot t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_4}{\omega} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_4^2} + \right. \\ &\quad \left. + j \left[ \frac{\epsilon_r \beta \cdot k_m \sin \Omega \cdot t}{1 + \beta \cdot \cos \Omega \cdot t} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega} \frac{1}{\tilde{\omega}_4^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из (9) видно, что компоненты тензора включают в себя параметры смешанного модулированного сигнала ( $K_m$ ,  $\beta$ ,  $\Omega$ ,  $K_\omega$ ) и имеют более сложную зависимость по сравнению с АМ- и ЧМ-сигналами.

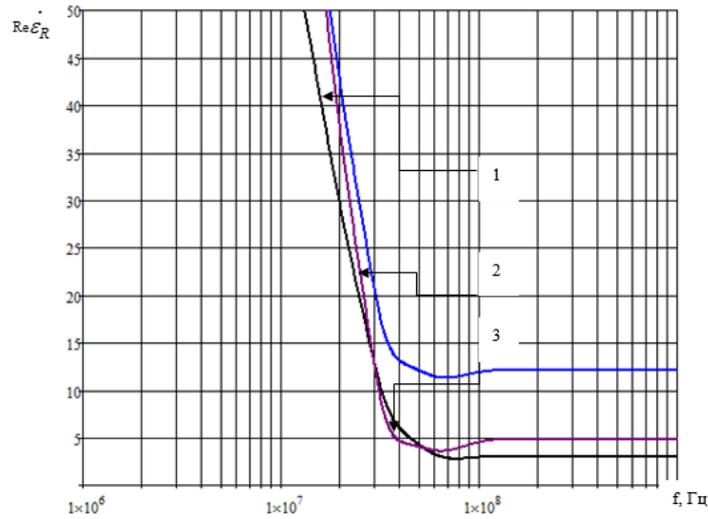
Тензор диэлектрической проницаемости имеет вид (9). Компоненты  $\tilde{\epsilon}$  были проанализированы для тех же значений  $\epsilon_r$ ,  $\sigma_r$ ,  $v_{эффе}$  и  $N_e$ , что и в предыдущих случаях.

Численные исследования показали, что  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R \approx \text{Re } \dot{\epsilon}_L$  и  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R \approx \text{arg } \dot{\epsilon}_L$ . Как видно из рисунка 1, комбинационный элемент (КЭ)  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R$  при частоте несущего колебания  $f = 10^5 \dots 10^6$  Гц не изменяется и примерно равен нулю, причем влияние частоты амплитудной модуляции на диэлектрическую проницаемость на этом отрезке частот практически отсутствует. В диапазоне частот  $f = 10^6 \dots 10^9$  Гц изменение коэффициента  $k_m$  и частоты модуляции  $F$  приводит к существенному изменению величины  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R$ . Увеличение частоты модуляции и коэффициента амплитудной модуляции (АМ) приводит к уменьшению  $|\text{Re } \dot{\epsilon}_R|$  и изменению частот  $f_{2\Omega}$  и  $f_{2\Omega}$ . Так, при  $F = 1$  МГц,  $k_m = 0,5$  происходит уменьшение  $f_{2\Omega}$  и увеличение  $f_{2\Omega}$ , а для  $F = 10$  МГц,  $k_m = 1$  – увеличение и  $f_{2\Omega}$ , и  $f_{2\Omega}$  по сравнению со значениями частот для  $F = 100$  кГц и  $k_m = 0,1$ . Индекс частотной модуляции (ЧМ)  $\beta$  не влияет на комбинационные элементы  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R$  и  $\text{Re } \dot{\epsilon}_L$  [6–8].

Как видно из рисунка 2, значение  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R$  изменяется от  $10^\circ$  до  $180^\circ$  на отрезке частот  $10^5 \dots 5 \cdot 10^7$  Гц, а дальше происходит резкое уменьшение фазы до  $-180^\circ$  (при  $f \approx 5 \cdot 10^7$  Гц) и до  $-60^\circ$  (при  $f \approx 10^8$  Гц) при  $F = 10$  МГц,  $\beta = 10$  и  $k_m = 1$ . При дальнейшем увеличении частоты несущего колебания фаза остается неизменной. Для  $F = 10$  МГц,  $\beta = 10$  и  $k_m = 1$  характер изменения  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R$  остается прежним, за исключением численных значений. Дальнейшее увеличение частоты практически не оказывает влияния на величину  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R$ . При  $\beta = 100$  и частоте модуляции  $F = 100$  кГц...1 МГц  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R \approx -180^\circ$  во всем диапазоне частот.

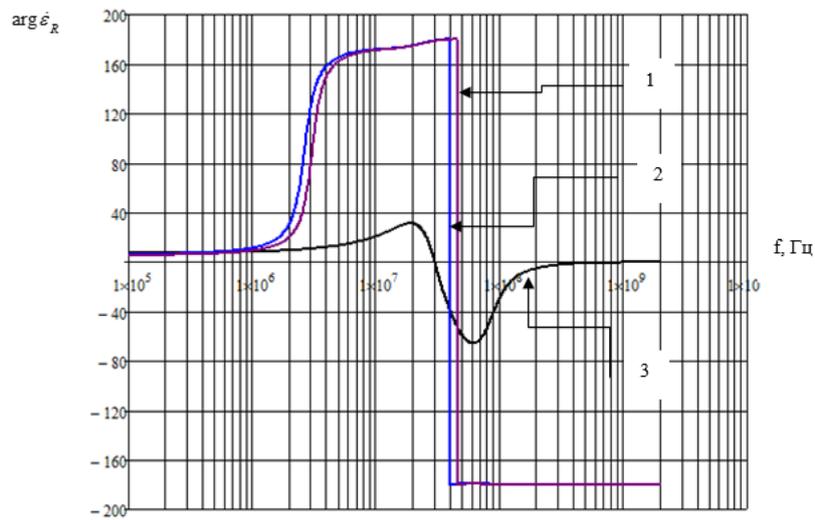
Анализ зависимостей  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R = \varphi(k_m)$  показывает, что при  $k_m = 0 \dots 0,9$  (рисунок 3) величина  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R$  остается постоянной. Дальнейшее увеличение  $k_m$  приводит к росту КЭ тензора диэлектрической проницаемости. Особенно заметное влияние этого коэффициента наблюдается при значениях  $k_m = 0,9 \dots 1,0$ . На фазу КЭ (рисунок 4) оказывают влияние очень маленькие значения коэффициента АМ ( $k_m \approx 0 \dots 0,1$ ) [9].

Анализ фазовых зависимостей показывает, что резкий фазовый сдвиг происходит при изменении частоты в пределах  $50 \dots 60$  МГц. Данный фактор может быть использован для создания метода поиска и оконтуривания залежей углеводородов при помощи АЧМ-сигнала.



1 – для  $F = 100$  кГц,  $k_m = 0,1$ ; 2 – для  $F = 1$  МГц,  $k_m = 0,5$ ; 3 – для  $F = 10$  МГц,  $k_m = 1$

Рисунок 1. – Зависимости  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R$



1 – для  $F = 100$  кГц,  $\beta = 10$ ,  $k_m = 0,1$ ; 2 – для  $F = 10$  МГц,  $\beta = 10$ ,  $k_m = 1$ ;  
3 – для  $F = 10$  МГц,  $\beta = 10$ ,  $k_m = 10$

Рисунок 2. – Зависимости  $\text{arg } \dot{\epsilon}_R$

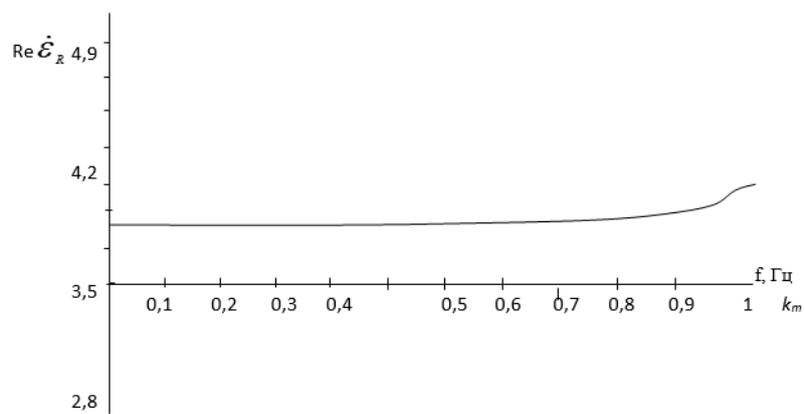
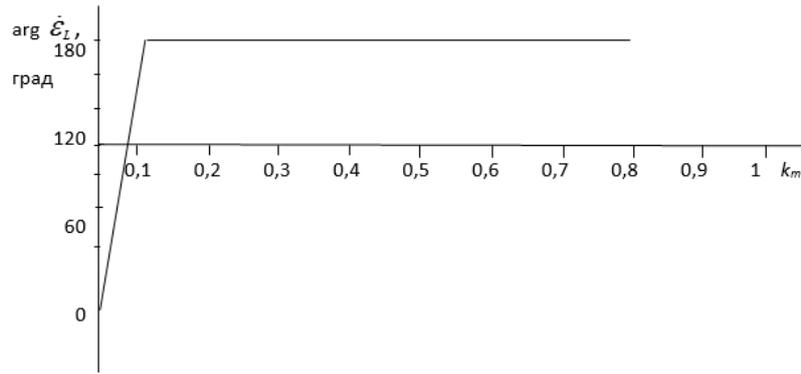
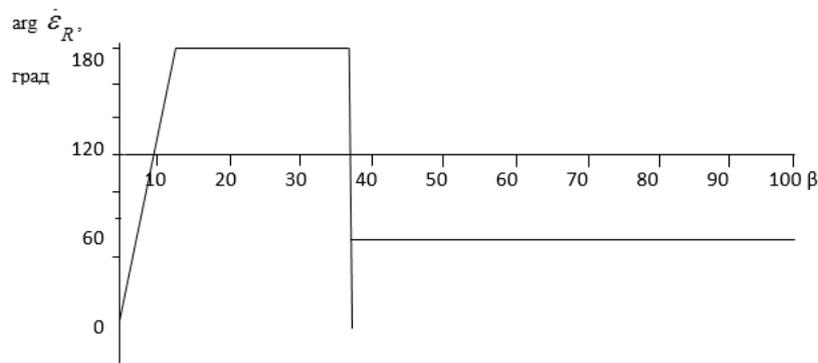


Рисунок 3. – Зависимость  $\text{Re } \dot{\epsilon}_R = f(k_m)$

Рисунок 4. – Зависимость  $\arg \dot{\varepsilon}_L = f(k_m)$ 

Как видно из рисунка 5, влияние индекса ЧМ на фазу КЭ наиболее существенно при  $\beta = 0 \dots 12$ , когда фаза  $\arg \dot{\varepsilon}_R$  резко изменяется от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , и при  $\beta \approx 25 \dots 28$ , когда фаза изменяется от  $180^\circ$  до  $-180^\circ$ . При  $\beta = 12 \dots 37$  значение  $\arg \dot{\varepsilon}_R \approx 180^\circ$ , а при  $\beta = 37 \dots 100$   $\arg \dot{\varepsilon}_R \approx -180^\circ$ .

Рисунок 5. – Зависимость  $\arg \dot{\varepsilon}_R = \varphi(k_m)$ 

Таким образом, оптимальный режим поиска и оконтуривания залежей углеводородов достигается при значении  $\beta = 37$  и  $\beta = 0 \dots 12$ .

Для получения отражательных характеристик исследуемая среда над УВЗ представляется в виде анизотропной неоднородности. В общем случае пространственная ориентация внешней нормали к границе раздела сред и волнового вектора  $\vec{k}$  является произвольной, и процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн (РРВ) можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией на безграничную поверхность с анизотропным импедансом (в приближении больших характерных размеров неоднородности по сравнению с длиной волны зондирующего сигнала). 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 следующие соотношения [3]

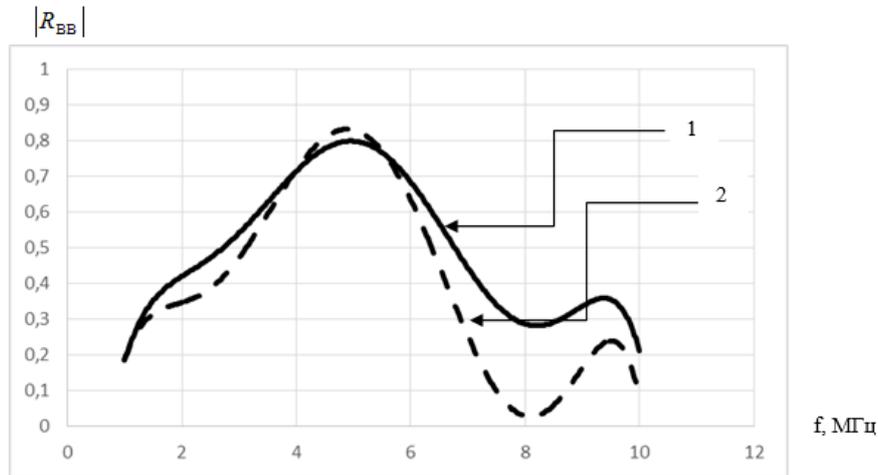
$$\begin{aligned} E_x &= E_{\text{зад}} + E_{\text{хотр}} = E_0(1 - R_{\text{ВВ}}) \cos \Theta \\ E_y &= -E_0 R_{\text{ВГ}} \\ H_x &= \frac{E_0}{Z_0} R_{\text{ВГ}} \cos \Theta \\ H_y &= \frac{E_0}{Z_0} (1 + R_{\text{ВВ}}) \end{aligned} \quad (10)$$

и импедансные граничные условия [4]

$$\begin{aligned}
 E_x &= -Z_0(\dot{Z}_{11}H_x - \dot{Z}_{12}H_y), \\
 E_y &= -Z_0(\dot{Z}_{21}H_x - \dot{Z}_{22}H_y), \\
 Z_{11} = Z_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L}), \\
 Z_{12} = Z_{21} &= -\frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}}(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}),
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

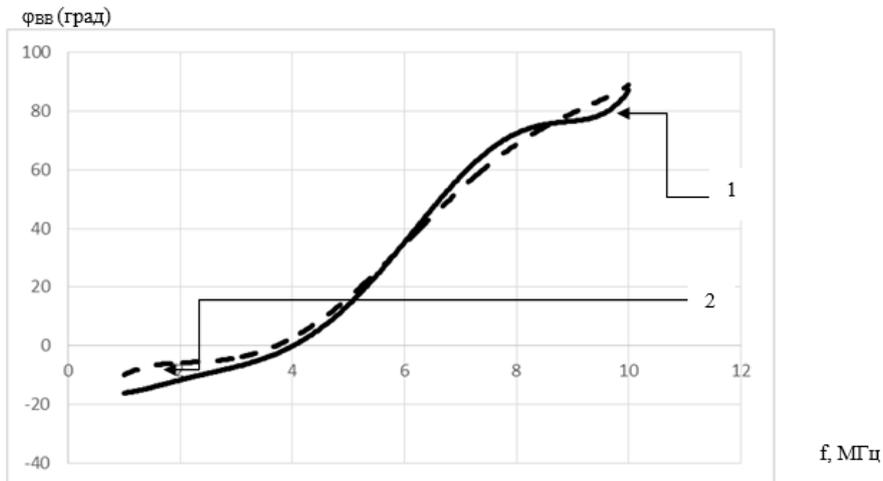
где  $E_0, \Theta$  – амплитуда падающей волны и угол падения ЭМВ относительно внешней нормали  $\vec{n}$ ,  
 $E_{x,y}, H_{x,y}$  – проекции падающей и отраженной волны на координатные оси,  
 $Z_0$  – характеристическое сопротивление среды над УВЗ.

На рисунках 6, 7 представлены частотные зависимости модуля  $|R_{\text{ВВ}}|$  и фазы  $\varphi_{\text{ВВ}}$  при  $\theta = 0^\circ$  для различных соотношений частот и амплитуд двух воздействующих сигналов, рассчитанных по формулам (11).



1 – для  $k_m = 0,5$ ; 2 – для  $k_m = 1$

Рисунок 6. – Зависимости  $|R_{\text{ВВ}}| = f(f)$  при нормальном падении



1 – для  $k_m = 0,5$ ; 2 – для  $k_m = 1$

Рисунок 7. – Зависимости  $|\varphi_{\text{ВВ}}| = f(f)$  при нормальном падении

Выражения (10) учитывают возникающие в структуре отраженной волны кроссполяризационные искажения, что приводит к смещению траектории луча относительно направления распространения падающей волны. В случае использования круговой поляризации принимаемая ЭМВ будет иметь эллиптическую в общем случае поляризацию, а возникающие при этом поляризационные искажения за счет влияния анизотропной неоднородности могут быть оценены коэффициентом эллиптичности [10; 11].

В исследуемом диапазоне частот наблюдается неравномерный характер изменения  $|R_{\text{ВВ}}|$ . Модуль коэффициента отражения имеет максимальное значение, равное 0,85, в диапазоне частот от 4 до 6 МГц. На частотах в диапазоне от 100 кГц до 5 МГц наблюдается рост этого коэффициента от 0,2 до 0,85, а на частотах выше 5 МГц – плавное уменьшение от 0,85 до 0,1 на частоте  $f_2 = 10$  МГц. Величина  $|R_{\text{ВВ}}|$  зависит от коэффициента модуляции  $k_m$ . Влияние коэффициента  $k_m$  сказывается незначительно, отличия характеристик практически несущественны. В целом характер изменения величины  $|R_{\text{ВВ}}|$  от частоты  $f$  при различных коэффициентах  $\beta$  имеет одинаковый вид.

Таким образом, при анализе отражательных характеристик максимум коэффициента отражения  $|R_{\text{ВВ}}| = 0,85$  наблюдается на частоте  $f = 5$  МГц для значения коэффициента модуляции  $k_m = 0,5$ , что может быть использовано для дальнейшего создания методов поиска и идентификации залежей углеводородов в режиме АЧМ-сигнала.

**Заключение.** Доказано, что применение АЧМ-сигнала приводит к появлению дополнительных функциональных зависимостей компонентов тензора от параметров воздействующего сигнала. Это дает возможность повысить уровень информации о залежи углеводородов. Также в режиме АЧМ-сигналов изменения частоты модуляции и коэффициента АМ вызывают изменение частот электронно-плазменного резонанса. Коэффициент АМ приводит к изменению как комбинированных элементов тензора диэлектрической проницаемости, так и их фаз (только при  $k_m \approx 0 \dots 0,1$ ). Влияние коэффициента частотной модуляции проявляется при его значениях  $\beta < 12$  и  $\beta = 37$ . При указанных значениях наступает электронно-плазменный резонанс.

Учитывая анализ отражательных характеристик АЧМ-сигналов для создания электрофизической установки для поиска и оконтуривания УВЗ на основе регистрации фазовых сдвигов высокочастотных и модулирующих сигналов в режиме амплитудной модуляции с несущей частотой в интервале от 1 до 5 ГГц и модулирующей частотой в интервале от 10 до 100 МГц, которая позволила повысить уровень достоверности идентификации углеводородов до 85–90% и точность определения границ залежи на 10–15%, был использован АЧМ-сигнал, дающий наиболее качественные параметры по коэффициенту отражения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов, С.Б. Высокочастотные электромагнитные методы исследования нефтяных и газовых скважин / С.Б. Денисов. – М. : Недра, 1986. – 142 с.
2. Фролов, А.Д. Поиски нефтегазовых месторождений радиоволновыми методами / А.Д. Фролов, В.Д. Озеров // Региональная, разведочная и промысловая геофизика. – М. : ВИЭМС, 1969. – № 19. – 32 с.
3. Каленов, Е.Н. Эффективность применения электроразведки при поисках нефти и газа / Е.Н. Каленов // Геофизические исследования земной коры. – М. : Недра, 1976. – С. 137–141.
4. Матвеев, Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых / Б.К. Матвеев. – М. : Недра, 1982. – 375 с.
5. Ваньян, Л.Л. Становление электромагнитного поля и его использование для решения задач структурной геологии / Л.Л. Ваньян. – М. : Наука, 1966. – 103 с.
6. Черняк, Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии / Г.Я. Черняк. – М. : Недра, 1987. – 215 с.
7. Гололобов, Д.В. Поиск месторождений углеводородных залежей радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – М. : Научтехмаш, 1999. – № 10. – С. 25–27.
8. Гололобов, Д.В. Фазовые методы идентификации углеводородных залежей / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, А.О. Рак // Инженерный вестник. – 2005. – № 1 (20). – С. 16–18.
9. Способ геоэлектроразведки углеводородных залежей : пат. ВУ 17382 / В.Ф. Янушкевич, Д.В. Гололобов, О.В. Орлова. – Оpubл. 24.04.2013.
10. Способ геоэлектроразведки углеводородных залежей : пат. ВУ 16771 / А.О. Бездель, В.Ф. Янушкевич, Ю.А. Щаденков. – Оpubл. 28.02.2013.

11. Калининцев, С.В. Отражательные характеристики углеводородной залежи при двухчастотном взаимодействии в режиме мощного НЧ-сигнала / С.В. Калининцев, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2004. – № 4. – С. 40–44.
12. Отражательные характеристики среды над УВЗ при двухчастотном взаимодействии / Д.В. Гололобов [и др.] // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : материалы III Международ. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26–28 мая 2004 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2004. – Т. 2. – С. 226–229.

18.03.2020

**THE ANALYSIS OF PHASE CHARACTERISTICS OF THE ENVIRONMENT  
OVER THE HYDROCARBON DEPOSIT AT INFLUENCE OF SIGNALS  
WITH THE MIXED TYPE MODULATION**

**S. KALINTSEV, V. YANUSHKEVICH, V. TALDIKIN**

*The process of the influence of electromagnetic waves on an anisotropic medium is investigated on the basis of the existing theory of the interaction of electrical signals and anisotropic media. The results obtained in the course of research allow us to qualitatively evaluate the use of modulated signals to optimize the methods of electromagnetic search and contouring of hydrocarbon deposits.*

**Keywords:** *anisotropic medium, hydrocarbon deposit, quasi-hydrodynamic approximation, modulated signal, hydrocarbon deposits contouring, phase characteristic, collision frequency.*