

УДК 550.837.75:553.98

**ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ  
В РЕЖИМЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, А.А. ЗДАНОВИЧ,  
Д.О. ШОСТАК, Ю.А. ЩАДЕНКОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлен теоретический анализ взаимодействия электромагнитных волн в режиме гармонического сигнала с подстилающей поверхностью, расположенной над углеводородной залежью. Приведены результаты расчетов электродинамических параметров среды над залежами нефти и газа в зависимости от вариации характеристик исследуемой поверхности. Показано влияние физических свойств пород-коллекторов на тензор диэлектрической проницаемости. Представлены результаты расчетов частотных зависимостей тензора диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности. Проведенный теоретический анализ электродинамических параметров среды над углеводородами позволяет оптимизировать параметры сигналов и используемых радиотехнических систем для поиска и оконтуривания границ залежей. Даны рекомендации по оптимизации характеристик электромагнитных волн. Результаты исследований могут быть использованы в области геофизики, радиолокации.*

**Введение.** Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в повышении точности определения границ и уровня идентификации залежей углеводородов, залегающих на значительных глубинах от земной поверхности. При анализе существующих теоретических исследований обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) следует обратить внимание на улучшение методов оптимизации структуры электромагнитных волн (ЭМВ) для решения задач поиска и идентификации УВЗ [1].

Эти задачи жестко связаны с моделированием специфической среды, возникающей над залежами, в результате которого оптимизируются частотные, поляризационные, амплитудные, модуляционные и другие параметры сигналов. Немаловажным при этом являются вопросы, касающиеся оптимизации условий распространения ЭМВ относительно исследуемой поверхности, а также определение числа используемых контролируемых источников излучения в условиях действия помех и сформированных электромагнитных излучений [2].

При разработке новых методов электроразведки приходится считаться со всё усложняющимися задачами, связанными с электроразведочными работами на истощающихся месторождениях, глубоко залегающими и многослойными (с малой мощностью) залежами, выделением границ скоплений и проявлений углеводородов, находящихся под мощными непроницаемыми покрывками [3].

**Теоретический анализ.** В данной работе проведена систематизация результатов анализа распространения радиоволн в средах над УВЗ в режиме гармонического сигнала в зависимости от характеристик подстилающих поверхностей.

Как известно, тензор диэлектрической проницаемости среды над УВЗ имеет вид [1]:

$$\begin{cases} \hat{\epsilon}_1 = \epsilon_r - j \cdot \frac{\sigma_r}{\omega \cdot \epsilon_0} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{pi}^2 \cdot \frac{\omega_{ri}^2 - \omega^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot v_i^2} \cdot \left[ 1 - j \frac{\omega_{ri}^2 + \omega^2 + v_i^2}{\omega_{ri}^2 - v_i^2 - \omega^2} \cdot \frac{v_i}{\omega} \right] \right\}; \\ \hat{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 + \omega^2)^2 + 4 \cdot \omega^2 \cdot v_i^2} \cdot \frac{\omega_{ri}}{\omega} \cdot \left[ \omega^2 - v_i^2 - \omega_{ri}^2 - j \cdot 2 \cdot \omega \cdot v_i \right] \right\}; \\ \hat{\epsilon}_3 = \epsilon_r - j \cdot \frac{\sigma_r}{\omega \cdot \epsilon_0} \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{ri}}{v_i^2 + \omega^2} \cdot \left[ 1 + j \cdot \frac{v_i}{\omega} \right] \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\epsilon_r$ ,  $\sigma_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость и удельная электрическая проводимость среды над УВЗ;  $\omega$  – круговая частота ЭМВ ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ );  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\omega_{pi}$ ,  $\omega_{ri}$  – плазменная и гиротропная частоты;  $v_i$  – частота столкновений частиц.

Представим реальную залежь углеводородов (рис. 1) в виде среды 4, погруженной в среду с порями (среда 2), имеющую границу раздела  $OX$  с воздушным пространством (среда 1). Залежь находится на границе  $\Delta Z$  от границы раздела сред 1 – 2 и имеет мощность  $Z_1$  и протяженность  $X_1$ .

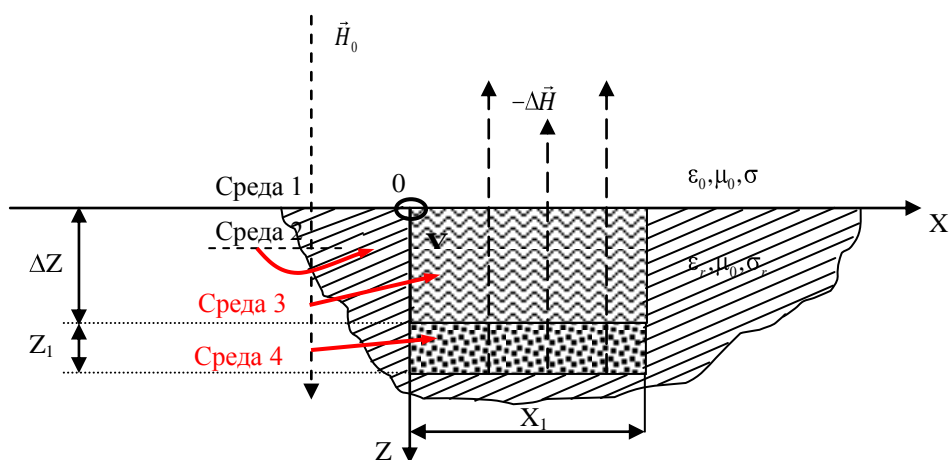


Рис. 1. Модель разреза геологического профиля над УВЗ

Для определения глубины залегания УВЗ представляет интерес компонента  $\dot{\epsilon}_3$  тензора (1). Поскольку геологические объекты отличаются по электропроводности, по магнитной и диэлектрической проницаемости, следовательно, отличие физических пород-коллекторов, в которых находятся УВЗ, для различных месторождений будет иметь существенный разброс. Поэтому был проведен анализ составляющей тензора  $\dot{\epsilon}_3$  в зависимости от  $\epsilon_r$ ,  $\sigma_r$ ,  $\nu_e$ , от концентрации электронов и ионов  $N_e = N_u$  и от частоты зондирующего сигнала  $\omega$ .

**Результаты и их обсуждение.** Графики частотных зависимостей компоненты тензора  $|\dot{\epsilon}_3|$  приведены на рисунках 2, 3.

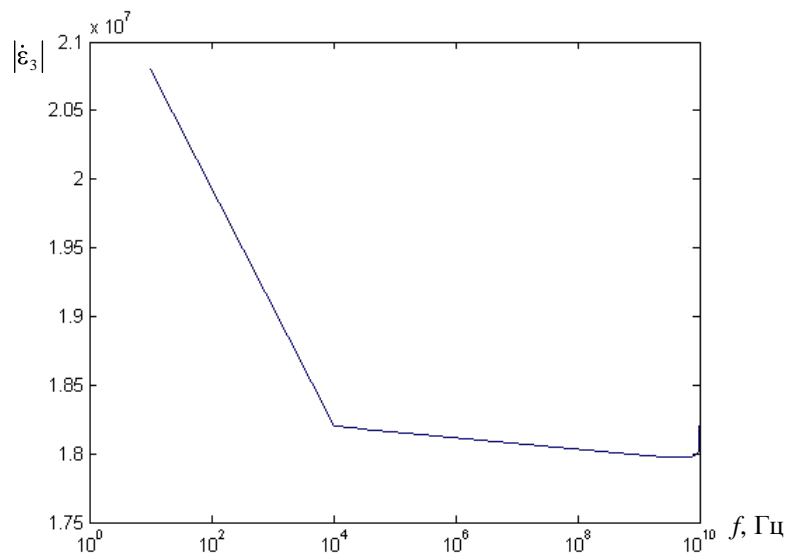


Рис. 2. Частотная зависимость модуля тензора диэлектрической проницаемости  $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(f)$

Модуль диэлектрической проницаемости плавно уменьшается от величины  $2,08 \cdot 10^7$  на частоте 10 Гц до значения  $1,82 \cdot 10^7$  при  $f = 10^4$  Гц. При дальнейшем увеличении частоты зондирующего сигнала  $|\dot{\epsilon}_3|$  практически постоянен, принимая величину  $1,82 \cdot 10^7$  на частоте  $10^{10}$  Гц. С одной стороны, наблюдается более равномерный характер частотной зависимости модуля компоненты тензора диэлектрической про-

ницаемости на отрезке частот ( $10^4 \dots 10^{10}$ ) Гц, но с другой – ЭМВ данного диапазона сильно затухают в поверхности земли и для определения глубины залегания УВЗ практически непригодны, за исключением начального участка этого диапазона, соответствующего примерно ( $10^1 \dots 10^4$ ) Гц. Фаза составляющей тензора уменьшается от  $-1,08$  рад на частоте  $1 \cdot 10^1$  Гц до  $-1,58$  рад при  $f = 10^4$  Гц и с дальнейшим ростом частоты остается такой же по величине. Таким образом, следует выделить значение частоты  $f = 10^4$  Гц, на которой происходит стабилизация фазы. Данное обстоятельство может быть использовано в новых методах электроразведки. Таким образом, отрезок частот ( $10^1 \dots 10^4$ ) Гц можно рекомендовать для разработки методов определения глубины нахождения месторождений нефти и газа, однако на данном участке следует учитывать частотную неравномерность модуля тензора диэлектрической проницаемости.

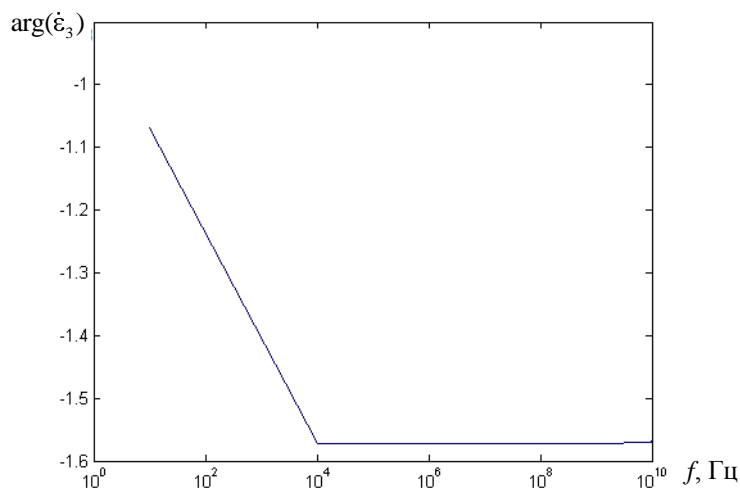


Рис. 3. Частотная зависимость фазовой составляющей тензора диэлектрической проницаемости  $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(f)$

На рисунках 4, 5 представлены зависимости модуля и фазы компоненты тензора  $\dot{\epsilon}_3$  от удельной проводимости среды над УВЗ  $\sigma_r$ .

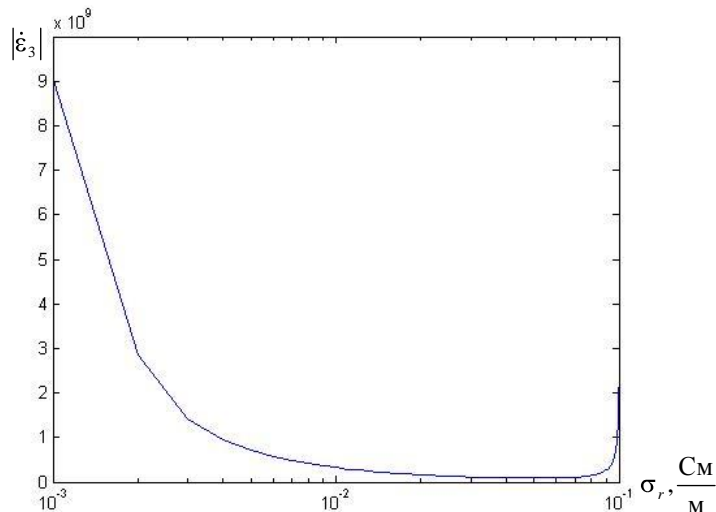


Рис. 4. Влияние проводимости среды на модуль тензора диэлектрической проницаемости  $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(\sigma_r)$

Для сред с низкой проводимостью величина  $|\dot{\epsilon}_3|$  уменьшается от значения  $9 \cdot 10^9$  при  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-3}$  См/м до  $1 \cdot 10^9$  для  $\sigma_r = 0,6 \cdot 10^{-2}$  См/м. Практически равномерный характер  $|\dot{\epsilon}_3|$  наблюдается на отрезке  $\sigma_r = (1 \cdot 10^{-2} \dots 0,8 \cdot 10^{-1})$  См/м. При увеличении проводимости среды до значения  $1 \cdot 10^{-1}$  См/м происходит резкое увеличение модуля тензора диэлектрической проницаемости до  $2 \cdot 10^9$ . Фазовая компонента

увеличивается от  $-1,5$  рад при  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-3}$  См/м до  $3$  рад для  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-1}$  См/м. При этом следует выделить три характерных участка. Практически линейный рост  $\arg \dot{\epsilon}_3$  до  $0$  рад происходит на отрезке  $\sigma_r = (1 \cdot 10^{-3} \dots 9 \cdot 10^{-2})$  См/м. Фаза имеет более равномерный характер при увеличении проводимости до  $1 \cdot 10^{-2}$  См/м. При дальнейшем увеличении проводимости фазовая компонента нелинейно возрастает.

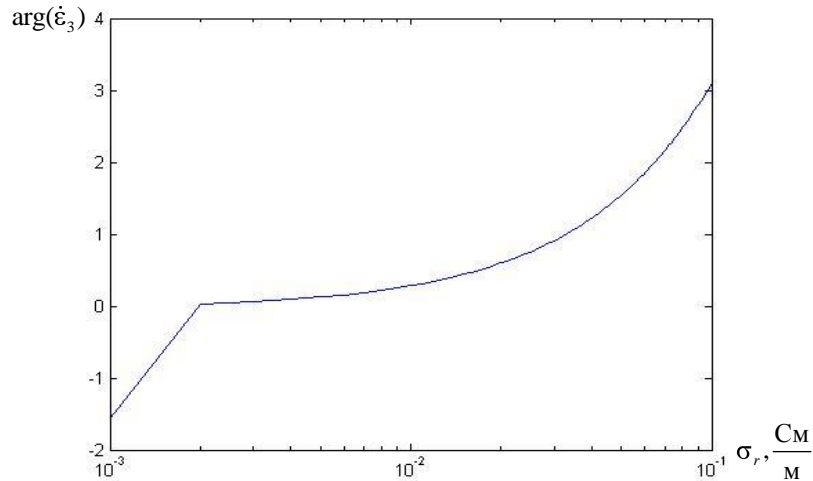


Рис. 5. Влияние проводимости среды на фазовую составляющую тензора диэлектрической проницаемости  $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(\sigma_r)$

На рисунке 6 представлена зависимость фазы компоненты тензора  $|\dot{\epsilon}_3|$  от концентрации частиц. Установлено, что на модуль величина  $N_e$  не влияет, при этом фаза увеличивается практически линейно с ростом концентрации частиц. При низких значениях  $N_e$  наблюдается скачкообразное изменение  $\arg \dot{\epsilon}_3$  от  $-1,5$  рад до  $0,3$  рад.

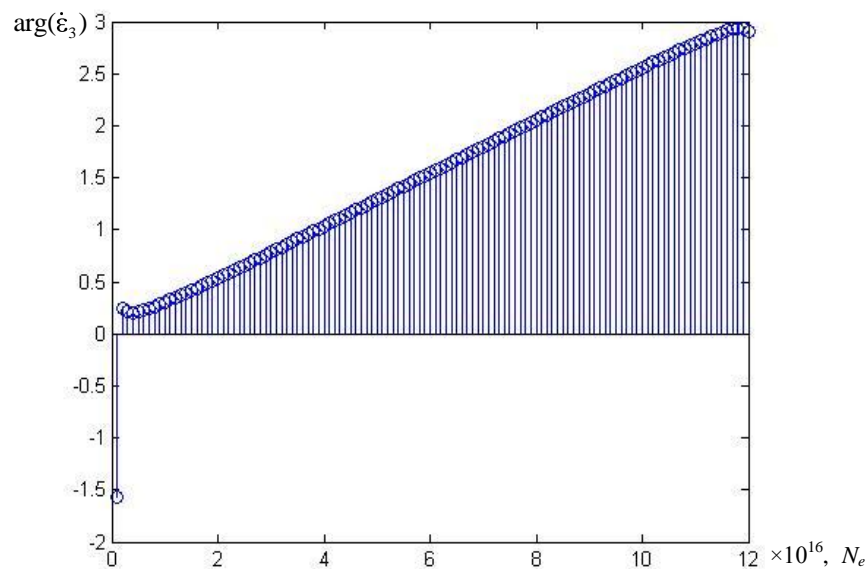


Рис. 6. Влияние концентрации частиц на фазовую составляющую тензора диэлектрической проницаемости  $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(N_e)$

Установлено, что на модуль фазы компоненты тензора  $\dot{\epsilon}_3$  величина  $\nu_e$  не влияет, при этом фаза увеличивается практически линейно от  $-2,8$  до  $-0,4$  рад. Наблюдается уменьшение  $\arg \dot{\epsilon}_3$  от  $-1,5$  до  $-2,8$  рад на отрезке  $\nu_e = (3 \cdot 10^8 \dots 3,5 \cdot 10^8)$  с<sup>-1</sup>.

Были проведены численные исследования компоненты тензора диэлектрической проницаемости от величины  $\epsilon_r$ . Установлено, что для используемых на практике значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r = 5 \dots 10$   $\text{Re } \hat{\epsilon}_3 = \epsilon_r$ , а величина  $|\hat{\epsilon}_3|$  постоянна для всех значений диэлектрической проницаемости и для соответствующей частоты зондирующей ЭМВ может быть определена по графику, изображенному на рисунке 2.

#### **Заключение**

Проведен анализ электродинамических параметров среды над УВЗ в режиме гармонического сигнала в зависимости от характеристик подстилающей поверхности. Показано влияние физических свойств пород-коллекторов, в которых находятся залежи нефти и газа, на тензор диэлектрической проницаемости.

Результаты исследования вариаций электродинамических параметров потока частиц и магнито-диэлектрического наполнителя на процесс взаимодействия анизотропной среды над УВЗ и ЭМВ свидетельствуют о необходимости изменения амплитудно-временных и характеристик воздействующих колебаний для повышения достоверности при решении задач поиска и выделения границ УВЗ.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Москвичев, В.Н. Исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичев // Радиотехника и электроника. – Минск: Выш. шк., 1989. – Вып. 18. – С. 91 – 96.
2. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 186 с.
3. Фролов, А.Д. Поиски нефтегазовых месторождений радиоволновыми методами / А.Д. Фролов, В.Д. Озеров // Региональная разведка и промысловая геофизика. – М.: ВИЭМС, 1969. – № 19. – С. 32.

*Поступила 23.11.11*

#### **EFFECT OF CHARACTERISTICS OF THE UNDERLYING SURFACE ON ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF THE ANISOTROPIC MEDIUM IN THE HARMONIC SIGNAL MODE**

**V. YANUSHKEVICH, A. ZDANOVICH, D. SHOSTAK, Y. SHCHADENKOV**

*The article presents the results of a theoretical analysis of the interaction of electromagnetic waves in the mode of a harmonic signal with the underlying surface below the hydrocarbon deposits. The results of calculations of the electrodynamic parameters of the environment above the oil and gas deposits, depending on the variation characteristics of the surface. Shows the influence of the physical properties of solids the collectors on the permittivity tensor. The results of calculations of the frequency dependence the permittivity tensor of the underlying surface. Theoretical analysis of the electrodynamic parameters of the environment of hydrocarbons contributes to optimizing the parameters of signals and radio systems used to search for and delineation of the boundaries of deposits. Recommendations are given for optimizing the characteristics of electromagnetic waves. The research results can be used in geophysics, radiolocation.*