

УДК 550.837.75:553.98

**АНАЛИЗ ДВУХЧАСТОТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДОЙ
В РЕЖИМЕ МОЩНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА**

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

Представлены результаты теоретического анализа двухчастотного взаимодействия с анизотропной средой в режиме мощного низкочастотного сигнала. Приведены результаты расчетов электродинамических параметров подстилающих поверхностей. Проанализировано влияние вариаций характеристик зондирующего сигнала на тензор диэлектрической проницаемости среды над углеводородными залежами. Представлены результаты тензора от характеристик исследуемой поверхности. Показаны расчеты частотных зависимостей диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности. Даны рекомендации по оптимизации характеристик электромагнитных волн для повышения точности и достоверности оконтуривания залежей нефти и газа. Результаты исследований могут быть использованы для разработки новых методов поиска и идентификации углеводородов.

Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в расширении возможностей поиска новых методов электроразведки углеводородных залежей (УВЗ), связанных с усложнением методик и технологий, преследующих сокращение времени аттестации контролируемой поверхности и улучшение качественных показателей эффективности. Анализ существующих методов показывает, что при представлении среды над УВЗ в виде анизотропной неоднородности (АН) плазмоподобного типа использование для поиска и выделения двухчастотных сигналов ведет к повышению точности и достоверности георазведки углеводородов [1]. При разработке новых методов электроразведки большое внимание уделяется не только решению задач поиска и оконтуривания залежей нефти и газа (углеводородов), но и определению глубины залегания УВЗ [2]. Способы применения двухчастотных электромагнитных волн (ЭМВ) для георазведки углеводородов связаны с улучшением качественных показателей эффективности электроразведочных работ [3].

Теоретически анализ. В данной работе проведен анализ распределения радиоволн в средах над УВЗ для двухчастотного воздействия в режиме мощного низкочастотного (НЧ) сигнала в зависимости от характеристик АН.

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме бигармонического сигнала вида:

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cdot \cos \omega_1 t + E_2 \cdot \cos \omega_2 t, \tag{1}$$

где $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$ – соответственно амплитуды и частоты двух ЭМВ.

Введем коэффициенты отношения амплитуд двух волн и их частот:

$$\begin{cases} k_E = \frac{E_2}{E_1}; \\ k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \end{cases} \tag{2}$$

Тензор среды над углеводородами

$$\tilde{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{vmatrix} \tag{3}$$

для мощного НЧ сигнала с коэффициентами

$$\begin{cases} k_E \ll 1, \\ k_\omega \ll 1 \end{cases} \tag{4}$$

имеет вид [4]:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \cdot \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{pi}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ &\quad \left. - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 \cdot v_i}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{pi}^2 + \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \cdot \omega_{ri}}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - 2j \cdot \frac{\tilde{\omega}_1 \cdot v_i \cdot \omega_{pi}^2 \cdot \omega_{ri}}{[(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \cdot \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \cdot \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j \cdot \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 \cdot v_i}{\omega_2} \cdot \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где ϵ_r, σ_r – диэлектрическая проницаемость и удельная электрическая проводимость среды над УВЗ;

$$\tilde{\omega}_1 = \omega_2 [k_\omega + k_E^2 + k_E (1 - k_\omega) \cos \alpha t]; \quad (6)$$

$\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2 (1 - k_\omega)$ – разность частот двух ЭМВ; ω_{pi} и ω_{ri} – плазменная и гиротропная частоты; v_i – частота столкновения частиц; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для определения глубины залегания УВЗ представляет интерес компонента $\dot{\epsilon}_3$ тензора (5).

Отличие геологических объектов по электропроводности, по магнитной и диэлектрической проницаемости приводит к существенному разбросу свойств физических пород-коллекторов, в которых находятся УВЗ. Поэтому был проведен анализ составляющей тензора $\dot{\epsilon}_3$ от характеристик двухчастотной ЭМВ, от $\epsilon_r, \sigma_r, v_i$ и от концентрации электронов и ионов $N_e = N_i$.

Результаты и их обсуждение. Графики частотных зависимостей компоненты тензора $|\dot{\epsilon}_3|$ приведены на рисунке 1.

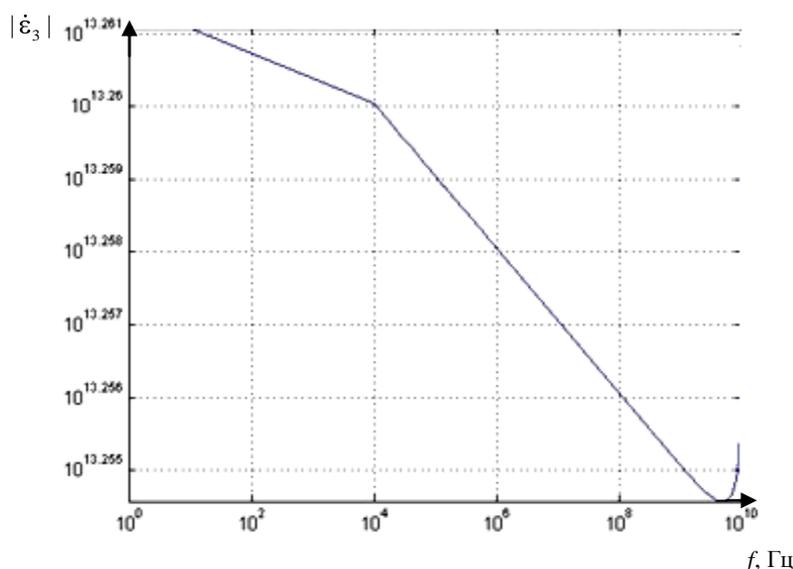


Рис. 1. Зависимость $|\dot{\epsilon}_3|$ при $k_\omega = 10^{-6}$ и $k_E = 10^{-6}$

На характеристике можно видеть три участка. На первом отрезке, в диапазоне частот от 1 Гц до 10^4 Гц, модуль диэлектрической проницаемости практически постоянен, незначительно уменьшаясь по линейному закону с ростом частоты. В диапазоне частот ($10^4 \dots 6 \cdot 10^9$) Гц величина $|\dot{\epsilon}_3|$ уменьшается ли-

нейно от значения $10^{13,26}$ до $10^{13,25}$ в граничных точках. На третьем отрезке, т.е. для $f = 6 \cdot 10^9 \dots 1 \cdot 10^{10}$ Гц, наблюдается незначительное увеличение модуля диэлектрической проницаемости при наличии несущественной нелинейности характеристики. Аналогичные зависимости наблюдаются при увеличении коэффициентов k_o и k_E до значения 10^{-1} , за исключением численных значений $|\dot{\epsilon}_3|$. Так, для $k_o = 10^{-1}$ при $f = 1 \cdot 10^4$ Гц $|\dot{\epsilon}_3| = 10^{8,2185}$. На рисунке 2 представлены зависимости $\arg(\dot{\epsilon}_3)$ от частоты.

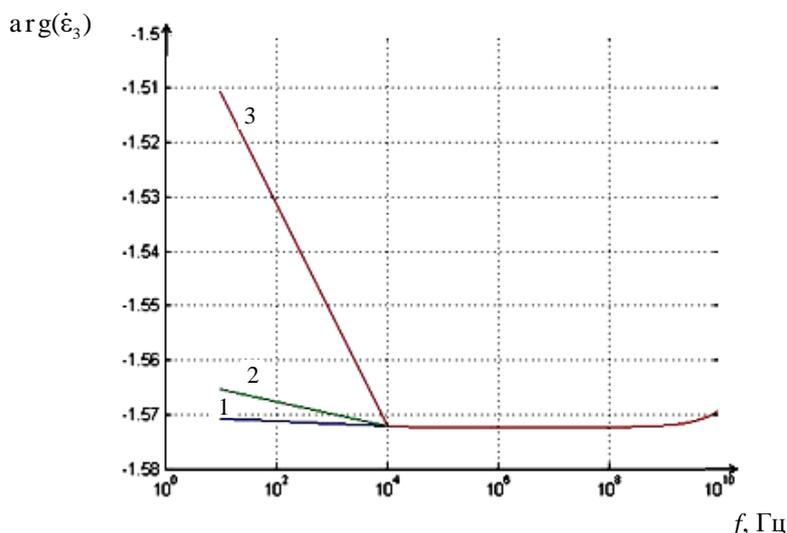


Рис. 2. Зависимости $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(f)$:

$$1 - k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-6}; 2 - k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}; 3 - k_o = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

Для данных характеристик следует выделить два участка. На первом при $f = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^{10}$ Гц фаза практически постоянна, причем она не зависит от вариации коэффициентов k_o и k_E . На втором участке наблюдается линейное уменьшение фазовой составляющей диэлектрической проницаемости с ростом частоты. При низких значениях k_o и k_E $\arg(\dot{\epsilon}_3)$ изменяется на большую величину (например, для $k_o = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$ фаза уменьшается от $-1,51$ рад на частоте 10 Гц до $-1,57$ рад на частоте $1 \cdot 10^4$ Гц.

Был проведен анализ компоненты тензора диэлектрической проницаемости от удельной проводимости среды над УВЗ (рис. 3).

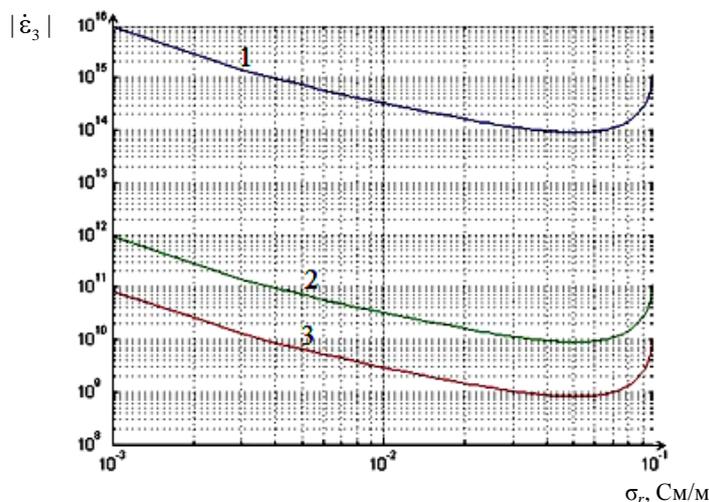


Рис. 3. Зависимости $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(\sigma_r)$:

$$1 - k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-6}; 2 - k_o = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}; 3 - k_o = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

С увеличением проводимости среды $|\dot{\epsilon}_3|$ уменьшается, за исключением небольшого участка в районе $\sigma_r \approx (0,8...1) \cdot 10^{-1}$ См/м, когда наблюдается некоторое увеличение модуля диэлектрической проницаемости. Вариация коэффициентов k_0 и k_E существенно влияет на модуляцию диэлектрического заполнения. Для $k_0 = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$ $|\dot{\epsilon}_3| = 10^{16}$ при $\sigma_r = 10^{-3}$ См/м. Установка значений $k_0 = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$ соответствует $|\dot{\epsilon}_3| = 10^{11}$.

Фазовая компонента не подвержена влиянию коэффициентов k_0 и k_E (рис. 4).

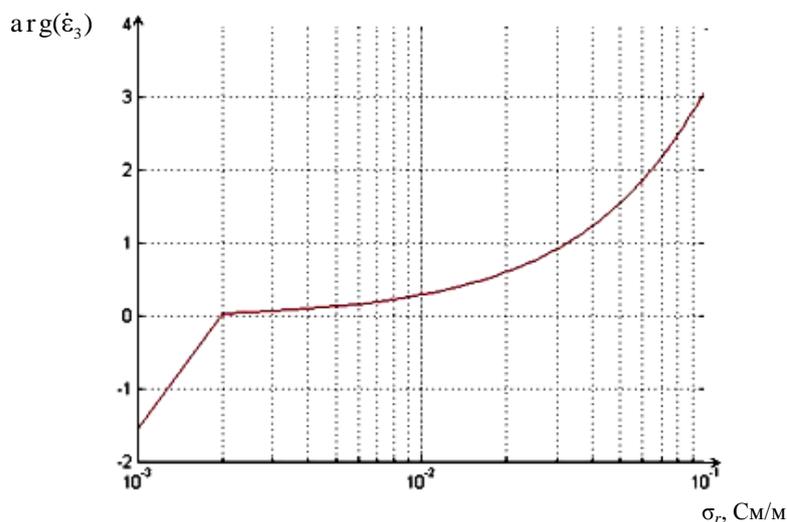


Рис. 4. Зависимость $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(\sigma_r)$

На графике (рис. 4) можно отметить два участка. На первом из них наблюдается линейный рост фазы от $-1,5$ рад (10^{-3} См/м) до 0 рад ($0,2 \cdot 10^{-2}$ См/м). При изменении удельной проводимости от $0,2 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ См/м происходит нелинейное увеличение $\arg(\dot{\epsilon}_3)$ от 0 рад до 3 рад.

Влияние концентрации частиц отражено на рисунке 5.

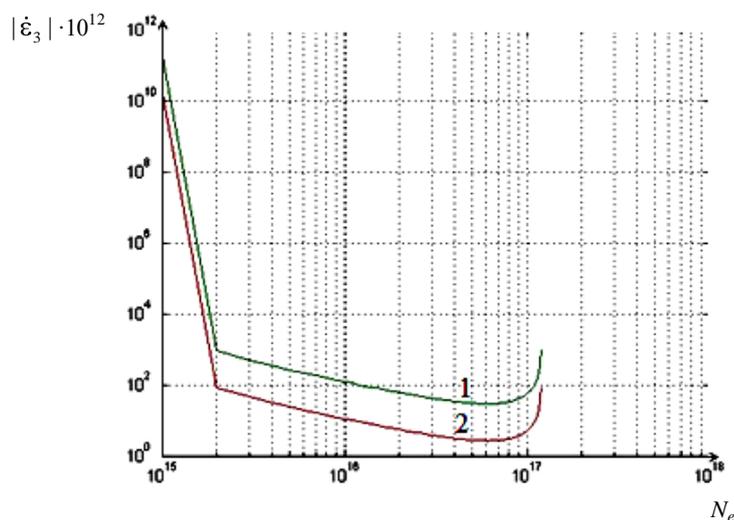


Рис. 5. Зависимости $\arg(\dot{\epsilon}_3) = \psi(N_e)$.

1 — $k_0 = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-6}$; 2 — $k_0 = 10^{-1}$, $k_E = 10^{-1}$

На характеристике выделяются три участка. Изменение концентрации от $1 \cdot 10^{15}$ до $0,2 \cdot 10^{16}$ приводит к линейному уменьшению модуля диэлектрической проницаемости. На отрезке $N_e = (0,2 \cdot 10^{16} \dots 0,8 \cdot 10^{17})$ наблюдается незначительное нелинейное уменьшение $|\dot{\epsilon}_3|$. На третьем участке характеристики происходит нелинейное увеличение модуля диэлектрической проницаемости. Вариация коэффициентов k_0 и k_E

отражается на изменении $|\dot{\epsilon}_3|$. При увеличении данных коэффициентов происходит уменьшение модуля компоненты тензора.

Было проанализировано влияние частоты столкновений на характеристики диэлектрического накопителя (рис. 6).

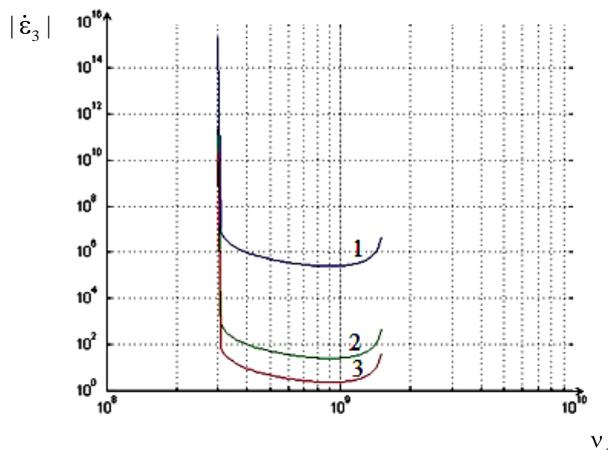


Рис. 6. Зависимости $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(\nu_e)$

$$1 - k_0 = 10^{-6}, k_E = 10^{-6}; 2 - k_0 = 10^{-6}, k_E = 10^{-1}; 3 - k_0 = 10^{-1}, k_E = 10^{-1}$$

Установлено, что на модуль диэлектрической проницаемости существенно влияет частота столкновений частиц $0,3 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$ когда $|\dot{\epsilon}_3|$ резко уменьшается в диапазоне $10^2 \dots 10^{16}$. При $\nu_e = (0,3 \cdot 10^9 \dots 1,5 \cdot 10^9) \text{ c}^{-1}$ происходит незначительное изменение модуля. Вариация коэффициентов k_0 и k_E приводит к изменению $|\dot{\epsilon}_3|$. С ростом k_0 и k_E модуль диэлектрической проницаемости уменьшается.

Заключение. Проведен анализ электродинамических параметров среды над УВЗ в режиме двухчастотного взаимодействия для мощного НЧ сигнала. Установлены закономерности изменения физических свойств подстилающих поверхностей от характеристик зондирующего сигнала. Результаты исследований могут быть использованы для определения глубины залегания УВЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Поиск месторождений углеводородов радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – М.: Научтехмаш, 1999. – № 10. – С. 25 – 27.
2. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 186 с.
3. 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.
4. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці Нац. Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 49 – 54.

Поступила 28.05.2012

ANALYSIS OF TWO-FREQUENCY INTERACTION WITH AN ANISOTROPIC MEDIUM IN THE REGIME OF POWERFUL LOW-FREQUENCY SIGNAL

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

The paper presents results of theoretical analysis of two-frequency interaction with an anisotropic medium in the regime of powerful low-frequency signal. The results of calculations of the electrodynamic parameters of the underlying surfaces are presented. The effect of variations in the characteristics of the probe signal on the dielectric constant of the medium above the hydrocarbon deposits is analyzed. The results of the tensor of the characteristics of the surface under study are presented. Calculations of the frequency dependence of the dielectric constant of the underlying surface are shown. Recommendations for optimizing the characteristics of electromagnetic waves to improve the accuracy and reliability of delineation of oil and gas are given. The results of research can be used to develop new methods of search and identification of hydrocarbons.