

УДК 550.837.75:553.98

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА
С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДОЙ НАД АНИЗОТРОПНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ**

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты теоретического анализа взаимодействия амплитудно-модулированного сигнала с анизотропной средой. Исследованы электродинамические параметры поверхностей над залежами углеводородов. Для расчетов используются экспериментально полученные данные характеристик среды реальных месторождений. Проанализировано поведение тензора диэлектрической проницаемости в зависимости от вариации свойств подстилающих поверхностей. Исследования выполнены на основе квазигидродинамического метода исследования параметров сред. 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 анализе влияния характеристик поверхностей на электродинамические параметры среды над углеводородными залежами (УВЗ) в режиме амплитудно-модулированных (АМ) сигналов. Электромагнитные методы (ЭММ) разведки залежей нефти и газа (углеводородов) основаны на дифференциации земной поверхности по электромагнитным свойствам [1]. Характеристики электромагнитных волн (ЭМВ) определяются геоэлектрическим строением изучаемого профиля местности. Выделение искомого объекта осуществляется по выявленным электромагнитным аномалиям на данной местности. Анализ существующих методов показывает, что при представлении среды над УВЗ в виде анизотропной неоднородности (АН) плазмopodobного типа использование для поиска и выделения месторождений нефти и газа АМ-сигналов ведет к повышению точности и достоверности георазведки углеводородов [2; 3].

Теоретический анализ. В данной работе проведен анализ влияния подстилающих поверхностей на электродинамические характеристики сред над УВЗ в режиме АМ-сигналов вида:

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t, \tag{1}$$

где E – амплитуда несущего колебания частоты $\omega = 2\pi f$; k_m – коэффициент амплитудной модуляции; $\Omega = 2\pi F$ – частота модуляции.

Тензор диэлектрической проницаемости может быть представлен следующим образом [1]:

$$\hat{\epsilon} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости АН для такого режима имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \omega_{pi}^2 \frac{\omega_{Gi}^2 - \omega^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2) + 4\omega^2 \nu_i^2} + j \left[\frac{\epsilon_r \cdot k_m \cdot \Omega \cdot \sin \Omega t}{\omega + (1 + k_m \cdot \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{pi}^2 \nu_i}{\omega} \cdot \frac{\omega^2 + \nu_i^2 + \omega_{Gi}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2) + 4\omega^2 \nu_i^2} \right], \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi} \omega_{Gi}}{\omega} \cdot \frac{\omega_{Gi}^2 - \omega^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} - \frac{2j \nu_i \omega_{pi} \omega_{Gi}}{(\nu_i^2 + \omega_{Gi}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \omega_{pi}^2 \cdot \frac{1}{\nu_i^2 + \omega^2} + j \left[\frac{\epsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \epsilon_0} - \frac{\omega_{pi}^2 \nu_i^2}{\omega} \cdot \frac{1}{\nu_i^2 + \omega^2} \right] \right\}, \end{aligned} \tag{3}$$

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды над УВЗ; ω_{pi}, ω_{Gi} – плазменная и гиротропная частоты; ν_i – частота столкновений электрона с тяжелыми частицами; σ_r – удельная электрическая проводимость. При разработке новых ЭММ георазведки большое внимание уделяется определению глубины залегания УВЗ, поэтому анализ составляющей тензора $\dot{\epsilon}_3$ для геологических объектов, отличающихся по диэлектрической, магнитной проницаемости, по электропроводности, весьма актуален.

Результаты и их обсуждение. График частотной зависимости вещественной части диэлектрической проницаемости приведен на рисунке 1.

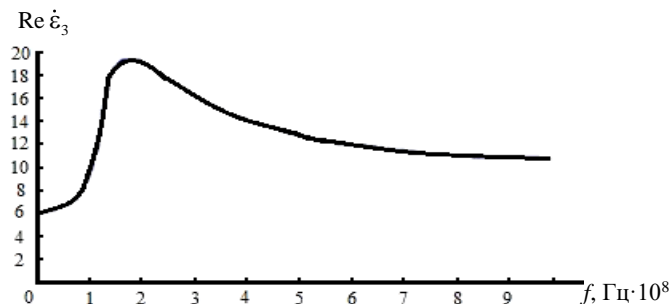


Рис. 1. Частотная зависимость $\text{Re } \dot{\epsilon}_3$

Практически все вещества, кроме чистых металлов, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим применяют понятие комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon = \dot{\epsilon} - j\dot{\epsilon}', \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ — действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля; $\dot{\epsilon}'$ — мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика, $\text{Ом} \cdot \text{м}^{-1}$.

Величина диэлектрической проницаемости нелинейно увеличивается от 6 на частотах $0 \dots 10$ Гц до 19 при $f = 200$ МГц. С дальнейшим увеличением частоты зондирующей ЭМВ значение $\text{Re } \dot{\epsilon}_3$ нелинейно уменьшается до величины 10,5 на частоте $f = 1000$ МГц.

Приведенные расчеты показывают, что наибольшее влияние на модуляцию вещественной части составляющей тензора диэлектрической проницаемости оказывают частоты в диапазоне от 100 до 300 МГц. При этом вариации коэффициента амплитудной модуляции и частоты модуляции не оказывают воздействия на величину $\text{Re } \dot{\epsilon}_3$.

На рисунке 2 представлена зависимость модуля вещественной части диэлектрической проницаемости от удельной проводимости среды над УВЗ.

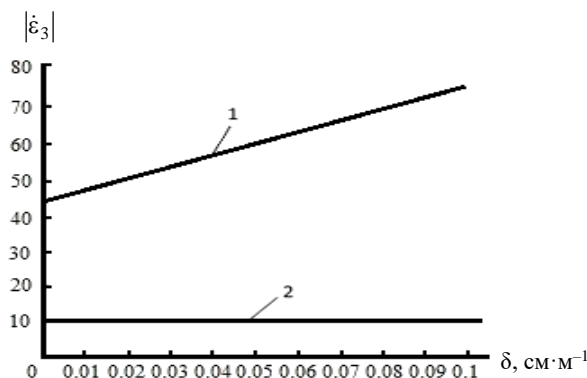


Рис. 2. Влияние удельной проводимости среды δ на модуль тензора диэлектрической проницаемости:
1 — для $f = 100$ МГц; 2 — для $f = 1000$ МГц

Наиболее стабильно величина $|\dot{\epsilon}_3|$ ведет себя для частоты ЭМВ $f = 1000$ МГц, когда при изменении удельной проводимости в пределах от 0 до $0,1 \text{ см} \cdot \text{м}^{-1}$ модуль вещественной части диэлектрической проницаемости лежит в диапазоне $10,78 \dots 10,94$. При уменьшении частоты зондирующего сигнала модуль тензора изменяется по линейному закону, увеличиваясь с ростом δ . Так, для $f = 100$ МГц вариация величины $|\dot{\epsilon}_3|$ лежит в пределах $47 \dots 72$. Для частоты ЭМВ $f = 1$ МГц диапазон изменения модуля $\dot{\epsilon}_3$ составляет $5100 \dots 8600$.

Поведение фазы диэлектрической проницаемости показано на рисунке 3. Фаза составляющей тензора в исследуемом диапазоне частот положительна. Она уменьшается с ростом частоты. Наибольшее влияние на вариацию фазовой компоненты оказывают более низкие частоты несущего колебания. Так,

для частоты $f = 0 \dots 10$) Гц $\arg \dot{\epsilon} \approx 42^\circ$, а на частоте 200 МГц фаза 20° . В более высокочастотном диапазоне наблюдается плавное уменьшение фазовой компоненты. На частоте $f = 600$ МГц величина $\arg \dot{\epsilon} \approx 12^\circ$, а затем она медленно уменьшается до 10 на частоте ЭМВ $f = 1000$ МГц.

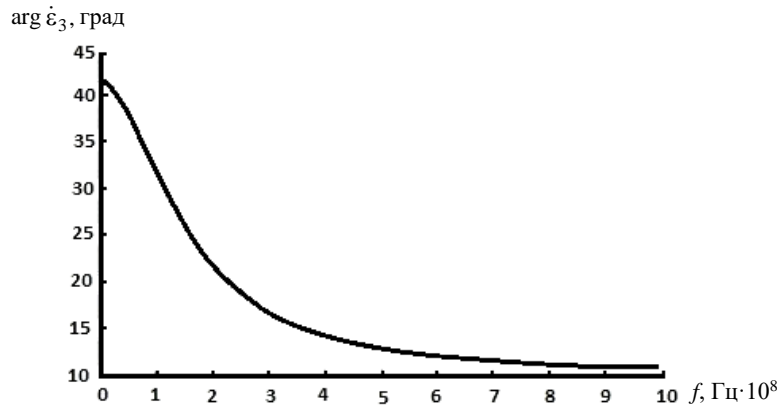


Рис. 3. Частотная зависимость фазовой составляющей тензора диэлектрической проницаемости $\arg \dot{\epsilon}_3$

На рисунке 4 представлен анализ поведения модуля диэлектрической проницаемости в зависимости от величины ϵ_r на частоте $f = 100$ МГц.

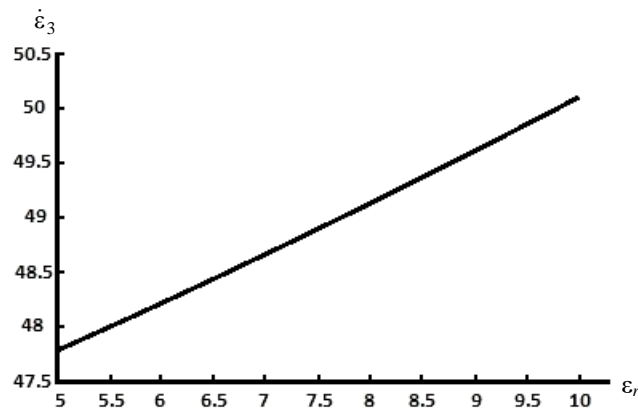


Рис. 4. Зависимость $|\dot{\epsilon}_3 = \psi(\epsilon_r)|$

Расчеты показали, что величина модуля диэлектрической проницаемости линейно возрастает с ростом ϵ_r , увеличиваясь от 47,6 до 50,1. Аналогичный характер прослеживается в диапазоне несущей частоты (100...1000) МГц, за исключением численных значений, которые уменьшаются по сравнению со значениями, представленными на рисунке 4.

На отрезке частот 1...100 МГц величина $|\dot{\epsilon}_3|$ изменяется также по линейному закону, однако уменьшается с ростом ϵ_r .

Концентрация частиц N_i показывает влияние на изменение плазменной частоты:

$$\omega_{pi} = q_i \left(\frac{N_i}{m_i \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{5}$$

где q_i, m_i – заряд и масса частиц, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

При расчетах использовались данные для равновесной концентрации электронов и ионов, т.е. $N_e = N_u$.

Влияние концентрации частиц отражено на рисунке 5.

Расчеты представлены на частоте $f = 1000$ МГц.

Для исследуемого диапазона концентраций частиц вариация модуля составляет примерно октаву, изменяясь от 10,5 до 19,5. Наблюдается линейная зависимость указанной характеристики. Аналогичный характер прослеживается для других несущих частот ЭМВ, за исключением численных значений.

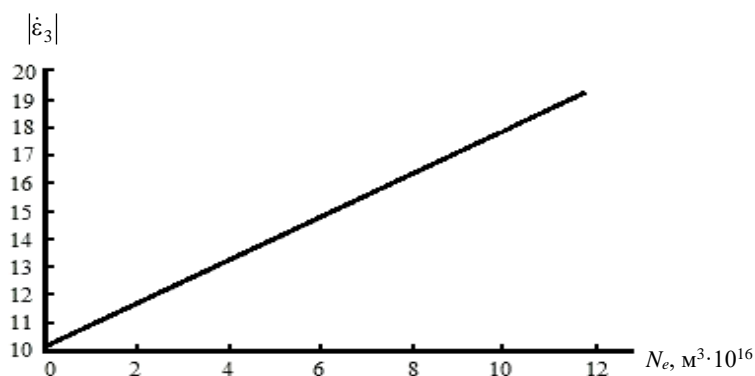


Рис. 5. Зависимость $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(N_e)$

На рисунке 6 представлены зависимости модуля вещественной составляющей от частоты столкновений частиц. Режим исследования выбран следующий: на частоте зондирующей ЭМВ $f = 100$ МГц, коэффициент амплитудной модуляции $K_m = 1$. С ростом частоты модуль линейно уменьшается. При частоте столкновений $\nu = 2 \dots 4 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ величина $|\dot{\epsilon}_3|$ лежит в пределах 85...75. При высоких частотах столкновений наблюдается плавное уменьшение модуля диэлектрической проницаемости. Аналогичный характер зависимостей прослеживается и для других несущих частот зондирующего сигнала, за исключением численных значений. На частотах более 1000 МГц характеристики приобретают вид с выпуклостью вверх.

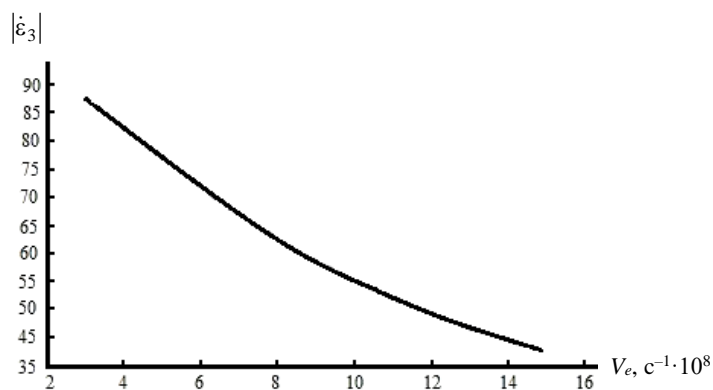


Рис. 6. Зависимость $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(\nu_e)$

Поскольку для исследований применяется АМ-сигнал, поэтому представляет интерес влияние модулирующих факторов на модуль диэлектрической проницаемости (рис. 7).

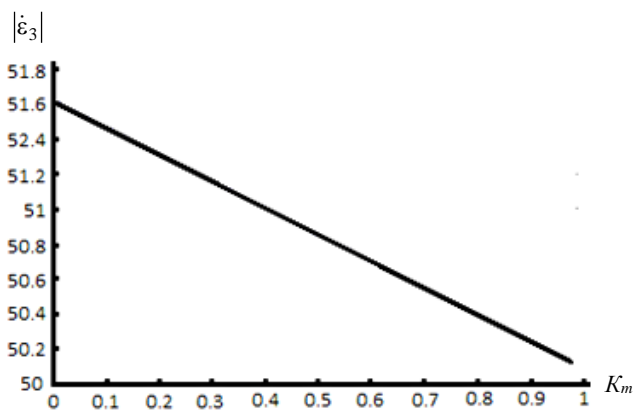


Рис. 7. Зависимость $|\dot{\epsilon}_3| = \psi(K_m)$

Зависимость рассчитана для $f = 100$ МГц. Следует отметить, что вариация характеристики несущественна, что объясняется незначительным вкладом составляющей тензора (3), включающей величину K_m . С ростом коэффициента АМ значение $|\dot{\epsilon}_3|$ уменьшается по линейному закону. В данном случае приращение $\Delta \dot{\epsilon}_3 = 1,5$.

В диапазоне частот, больших 1000 МГц, происходит нелинейное незначительное увеличение $|\dot{\epsilon}_3|$ с ростом величины K_m .

Заключение. Проведенный анализ влияния параметров подстилающей среды и зондирующего сигнала на электродинамические характеристики среды над УВЗ показал, что результаты исследований могут быть использованы для определения глубины залегания углеводородов.

Данные, полученные на основе проведенного исследования, могут быть использованы при построении радиотехнических систем поиска и обнаружения месторождений нефти и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвичев, В.Н. Исследования 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. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 98 – 101.
3. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Докл. БГУИР. – Минск, 2010. – № 6(52). – С. 13 – 17.

Поступила 01.04.2013

INTERACTION OF THE AMPLITUDE-MODULATED SIGNAL WITH THE SPREADING ENVIRONMENT OVER ANISOTROPIC FORMATIONS

V. YANUSHKEVICH

Results of the theoretical analysis of interaction of the amplitude-modulated signal with the anisotropic environment are presented. Electrodynamics parameters of surfaces over deposits of hydrocarbons are investigated. For calculations experimentally obtained data of characteristics of the environment of real fields are used. The behavior of a tensor of dielectric permeability depending on a variation of properties of spreading surfaces is analysed. Researches are executed on the basis of a quasihydrodynamic method of research of parameters of environments. Recommendations about optimization of characteristics of electromagnetic waves for increase of accuracy and reliability of contouring of deposits of oil and gas are made. Results of researches can be used for development of new methods of search and identification of hydrocarbons.