

УДК 621.371:550.837.6

**ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ
НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ В РЕЖИМЕ РАДИОИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ**

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

Проведен анализ дисперсионных характеристик диэлектрической проницаемости в режиме взаимодействия радиоимпульсных сигналов с анизотропными средами над углеводородными залежами. Используется вертикальная поляризация электромагнитных волн. Рассмотрен широкий диапазон используемых частот. Исследовано влияние диэлектрической проницаемости, концентрации частиц на распространение радиоимпульсных сигналов. Даны рекомендации по использованию оптимальных характеристик зондирующих сигналов. Полученные результаты способствуют определению анизотропных сред по измерению отличий сигналов двухканальной схемы на основе полученных величин отраженных сигналов. Возможность перестройки устройства дополняет функциональные возможности для поиска углеводородных залежей. На основе приведенных исследований могут быть разработаны методы георазведки углеводородов.

Ключевые слова: электромагнитная волна, анизотропная среда, углеводородные залежи.

Введение. Усовершенствование существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработка новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов) представляют актуальную задачу в настоящее время. Постановка задач поиска и идентификации углеводородных залежей (УВЗ) требует решения вопросов аналитического описания параметров среды над углеводородами. Это предполагает исследование дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ, решение задач взаимодействия электромагнитных волн ЭМВ и УВЗ, находящейся на фоне гетерогенной и полифазной среды, разработку и экспериментальное исследование ЭММ и устройств для повышения уровня достоверности разведки, поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа [1–3].

Результаты анализа взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования представлены во многих работах. В работе [4] были предложены и апробированы в эксперименте методы томографии и голографии (определения формы) подповерхностных диэлектрических объектов, основанные на двумерном сканировании вдоль поверхности среды приемно-передающей системой, представляющей собой жестко связанные передатчик и приемник.

В работе [5] показано, что система уравнений классической электродинамики при анализе распространения плоской гармонической электромагнитной волны в устройствах радиоэлектроники с однородной анизотропной проводящей рабочей средой должна быть «полной», возможность исключения из рассмотрения дивергентных уравнений является частным случаем и в каждой конкретной ситуации должна быть обоснована. Особенности расчета элементов тензора для частного случая – использования силицена – показывают, что для каждого конкретного применения вида анизотропной среды возможны свои оригинальные решения [6].

Способ поиска УВЗ [7] позволяет обнаруживать месторождения нефти и газа по измерениям величины напряженности электрического поля отраженных радиоимпульсных сигналов на глубинах до 200 м. Учет помеховой обстановки позволит повысить достоверность методов поиска [8]. Исследование процессов распространения ЭМВ, связанных с различными резонансными эффектами, может быть применено для поиска и идентификации УВЗ [9].

По мнению авторов статей [10–13], предложенные методы позволяют расширить возможности ЭММ георазведки. После проведенных исследований [14–16] даны рекомендации по применению импульсных методов обнаружения УВЗ.

Целью настоящей работы является исследование дисперсионных характеристик анизотропной среды над углеводородами в режиме радиоимпульсных сигналов.

Диагностика анизотропной среды над УВЗ по воздействию зондирующего радиоимпульсного сигнала на исследуемый геопрофиль состоит из определения реакции среды над углеводородами на комбинационные составляющие тензора диэлектрической проницаемости для ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями. Интерпретация результатов проводится с помощью средств вычислительной техники, позволяющих пересчитывать характеристики отраженных сигналов в значения диэлектрической проницаемости среды.

Объекты и методы исследования. Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме импульсного сигнала вида

$$U(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}, \quad (1)$$

где $\frac{U \cdot \tau_u}{2} = 1$ – амплитуда радиоимпульса;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота радиоимпульса;

ω_0 – несущая частота радиоимпульса;

τ_u – длительность радиоимпульса.

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами $\epsilon_0, \mu_0, \delta_0$ на безграничную поверхность с анизотропным импедансом. Данная ЭМВ возбуждается с помощью переносного передатчика, перемещаемого вдоль исследуемого профиля.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости для такого режима взаимодействия имеют следующий вид [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \cdot F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{F \cdot w_{ni}^2 \cdot (w + n\Omega_1) \cdot [w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2 - v_i^2]}{w \cdot [v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - jF \left[\frac{w_{ni}^2 \cdot v_i \cdot (w + n\Omega_1)^2 + v_i^2 + w_{\Gamma i}^2}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} + \frac{\delta_r F}{w\epsilon_0} \right] \end{array} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{array}{l} \frac{w_{ni}^2 \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2}{w \cdot [v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} - \\ - 2j \frac{w_{ni}^2 \cdot F \cdot w_{\Gamma i} \cdot v_i \cdot (w + n\Omega_1)}{[v_i^2 + w_{\Gamma i}^2 - (w + n\Omega_1)^2]^2 + 4(w + n\Omega_1)^2 \cdot v_i^2} \end{array} \right\}, \\ \dot{\epsilon}_3 = \sum_{i=1}^2 \left\{ F \left(1 + \frac{n\Omega_1}{w}\right) \cdot \left[\epsilon_r - \frac{w_{ni}^2}{w} \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} \right] - j \left[\frac{w_{ni}^2}{w} \cdot F \cdot v_i \cdot \frac{1}{(w + n\Omega_1)^2 + v_i^2} + \frac{\delta_2 F}{w\epsilon_0} \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\text{Здесь } F = \frac{\tau}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau)}{\pi \cdot n \cdot F_1 \cdot \tau},$$

T, F_1 – период, частота импульса;

n – номер гармоники;

Ω_1 – круговая частота импульса, $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot F_1$;

ϵ_r, δ_r – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

w_{ni} – плазменная частота;

v_i – частота столкновения частиц;

$\omega_{\Gamma i}$ – гиротропная частота, $\omega_{\Gamma i} = \frac{q_e \mu_0 H_0}{m}$;

q_e, m – заряд электрона, масса электрона;
 H_0 – напряженность магнитного поля Земли,
 μ_0 – магнитная постоянная;
 $i = 1$ для электронов, $i = 2$ для ионов.

Представляет интерес анализ частотных характеристик комбинационных составляющих:

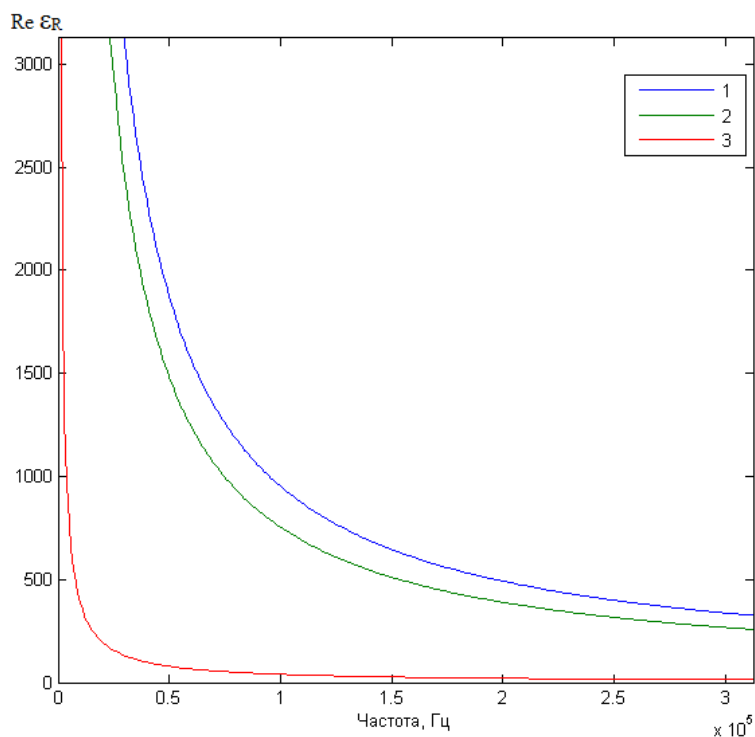
$$\dot{\epsilon}_R(\omega) = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_R + j \text{Im} \epsilon_R \tag{4}$$

$$\dot{\epsilon}_L(\omega) = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re} \epsilon_L + j \text{Im} \epsilon_L$$

Результаты и их обсуждение. Был проведен анализ дисперсионных характеристик по формуле (4) для импульсного взаимодействия ЭМВ со средой над УВЗ. На рисунке 1 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости наполнителя и частоты сигнала для вещественной составляющей ЭМВ с правой поляризацией. Расчет компонентов тензоров диэлектрической проницаемости осуществлен на основании экспериментально полученных параметров среды над залежами углеводородов [2]:

- удельной электрической проводимости $\delta_r = 10^{-5}$ См/м;
- концентрации частиц $N_e = N_n = (10^{15} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$;
- частоты столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$ рад / с.

Значение n выбрано равным 5. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 30. Установлено, что с ростом частоты суммарная компонента уменьшается. Как видно из приведенного графика, при изменении диэлектрической проницаемости среды над УВЗ происходит существенное изменение комбинационной компоненты тензора диэлектрической проницаемости, что может быть использовано для определения характеристик сред над УВЗ.



**Рисунок 1. – Зависимости $\text{Re} \epsilon_R = \Psi(f)$:
 1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$**

На рисунке 2 представлены зависимости вещественной части диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для электромагнитных волн с левой поляризацией. Установлено, что с ростом частоты разностная компонента уменьшается. Из приведенного графика, при изменении диэлектрической проницаемости среды на УВЗ происходит не такое существенное изменение комбинационной компоненты тензора диэлектрической проницаемости, как для предыдущего случая (см. рис. 1).

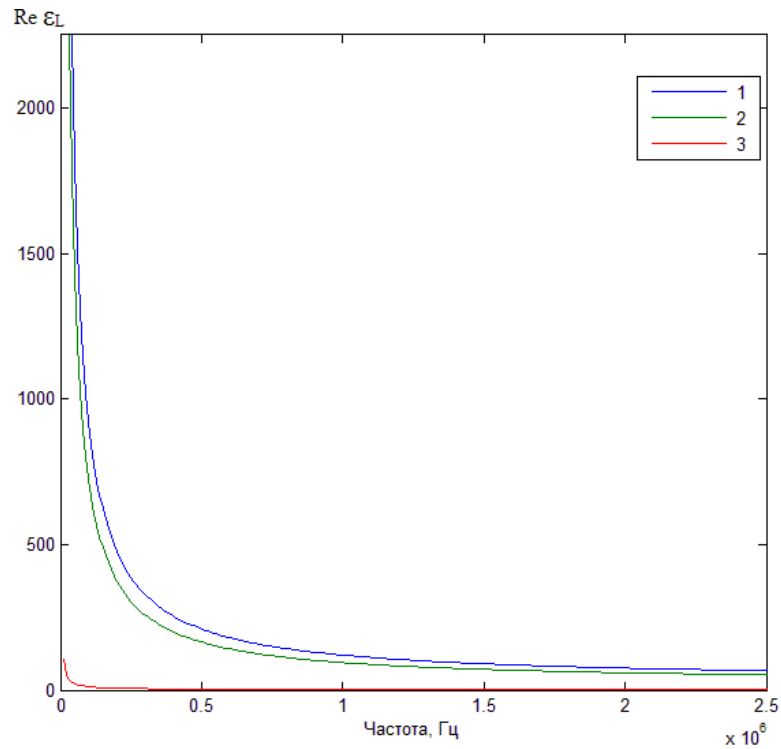


Рисунок 2. – Зависимости $\text{Re } \epsilon_L = \Psi(f)$:
1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$

На рисунках 3, 4 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости наполнителя и частоты сигнала для вещественной составляющей ЭМВ с правой и левой поляризациями при понижении концентрации частиц до минимальной из указанного выше интервала значений.

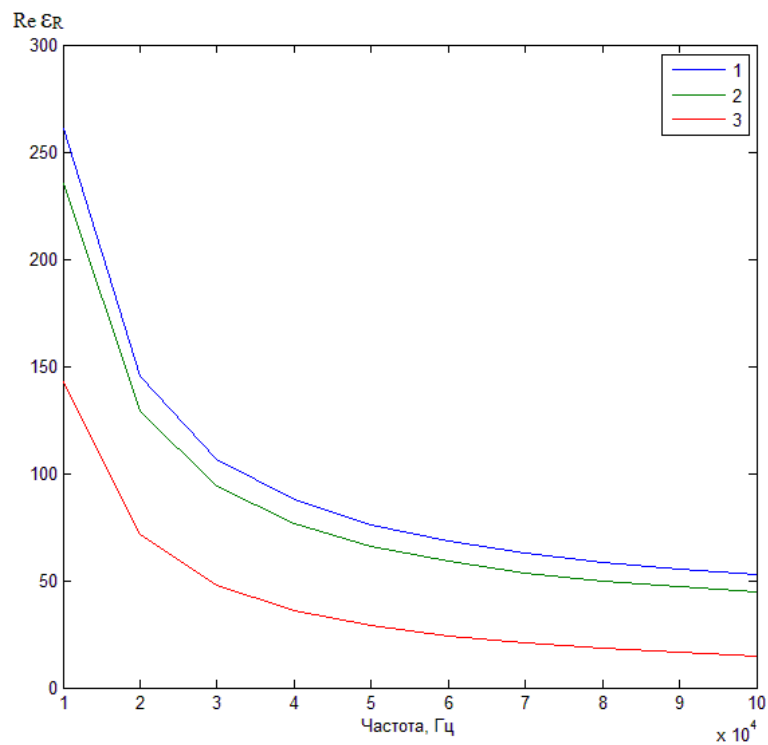
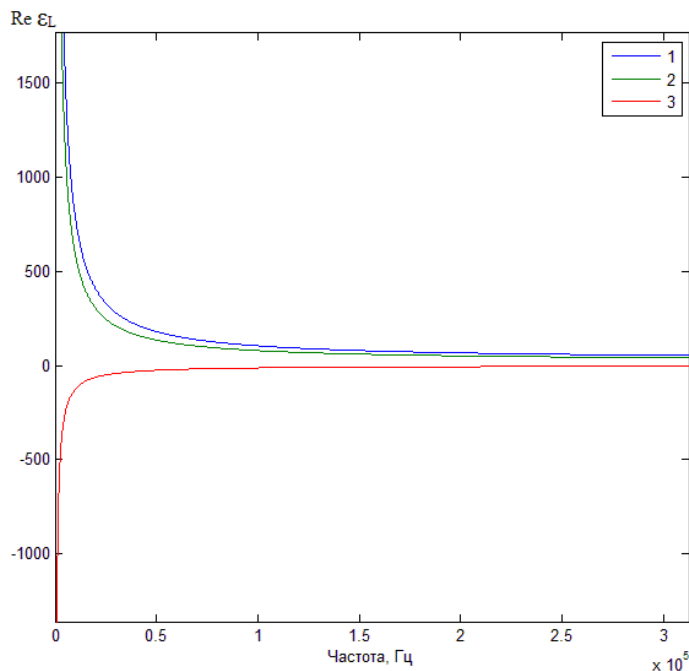


Рисунок 3. – Зависимости $\text{Re } \epsilon_R = \Psi(f)$:
1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$



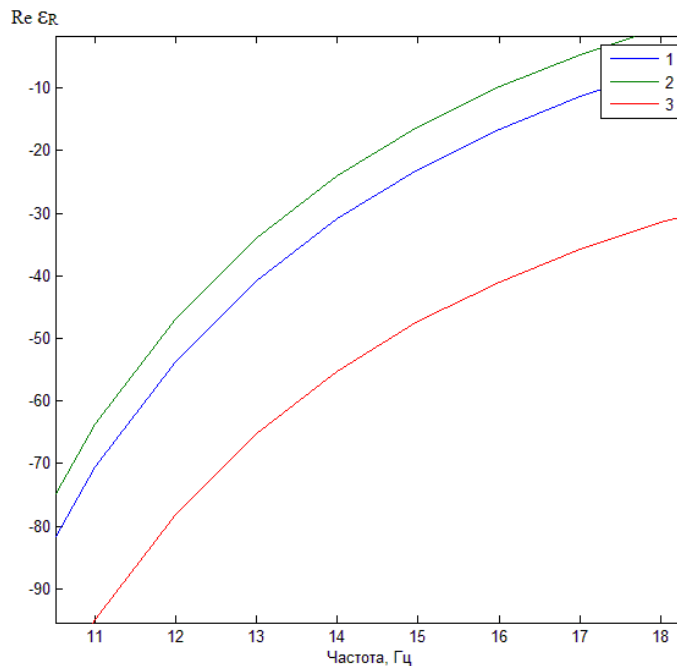
**Рисунок 4. – Зависимости $Re \epsilon_L = \Psi(f)$:
1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$**

Закономерности изменения дисперсионных характеристик сохраняются за исключением численных значений. Характерной особенностью поведения компоненты ЭМВ с левой поляризацией является наличие отрицательного участка при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя среды. Реальные свойства среды над углеводородами сложнее приведенных усредненных значений характеристик анизотропной среды над залежью. Горные породы пронизаны водно-солевыми растворами, которые закрывают углеводороды. Залежь поляризуется за счет высоких температур и пластового давления. Восстановительные процессы в промежуточной области между УВЗ и окружающей средой обусловлены переходом ряда химических элементов в низковалентное состояние и избытком свободных электронов. Тем не менее закономерности, приведенные в статье, могут быть применены на практике с учетом поправочных коэффициентов.

Дисперсионные характеристики показывают поведение диэлектрической проницаемости наполнителя среды над углеводородами в частотной области зондирующих сигналов для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями. Отличие условий распространения этих волн, что особенно проявляется для анизотропных сред, приводит к повышению информативности методов поиска УВЗ. Дифференциация земной поверхности, вызванная наличием дисперсных сред, проявляется в появлении электромагнитной аномалии. Выделение таких эффектов по сравнению с однородными средами может быть использовано для определения границ залежей. Качественные и количественные проявления этих отличий различаются в зависимости от глубины залегания и состава пород над УВЗ. Перестройка системы поиска по частоте может дополнить исследования уточняющими данными, подтверждающими эффективность предлагаемого метода. На основании полученных результатов могут разрабатываться методы радиокомплексирования для поиска УВЗ.

Данные графики могут быть применены на этапе идентификации УВЗ, который включает в себя вывод тензора среды над УВЗ в режиме радиоимпульсных сигналов, анализ комбинационных составляющих компонентов диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, идентификации среды над залежами по характеру и величине суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя. Новизна исследований, приведенных в данной статье, заключается в том, что полученные результаты способствуют определению анизотропных сред по измерению отличий сигналов двухканальной схемы на основе полученных величин отраженных сигналов. Это позволит повысить производительность геологоразведочных работ.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов в зависимости от диэлектрической проницаемости наполнителя и частоты следования импульсов для вещественной составляющей ЭМВ с правой поляризацией.



**Рисунок 5. – Зависимости $\text{Re } \epsilon_R = \Psi(F_i)$:
1 – для $\epsilon_r = 25$; 2 – для $\epsilon_r = 20$; 3 – для $\epsilon_r = 2$**

Результаты расчетов свидетельствуют о сильном влиянии частоты следования импульсов на дисперсионные характеристики среды над УВЗ.

Заключение. Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмopodobного типа с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Результаты исследования могут быть применены в поисковой геофизике. При этом следует отметить:

- дисперсионные характеристики в режиме радиоимпульсных сигналов для среды над залежью определены в широком диапазоне частот зондируемых сигналов, диэлектрических проницаемостей и концентраций сред;

- по сравнению с существующими аналогами данный способ обнаружения УВЗ основывается на определении дисперсионных характеристик диэлектрической проницаемости среды для правой и левой поляризации ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов, построении двухканальной измерительной системы, позволяющей повысить точность определения границ углеводородов;

- при изменении диэлектрической проницаемости среды над УВЗ происходит существенное изменение комбинационной компоненты тензора диэлектрической проницаемости, что может быть использовано для определения характеристик сред над УВЗ.

Применение данного метода поиска позволит повысить производительность геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. – 2002. – № 1. – С. 49–54.
2. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON-91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Rydzyna, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
3. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз. тэхн. – 2010. – № 4. – С.98 – 101.
4. Gaikovich, K.P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich // Inverse Problems. – 2010. – Vol. 26, № 12. – P. 125013.

5. Макаров, А.М. Об особенностях волновых процессов в устройствах радиоэлектроники с анизотропной рабочей средой / А.М. Макаров, Л.А. Лунёва, К.А. Макаров // Наука и образование. – 2016. – № 11. – С. 88–98.
6. Александров, Ю.М. Расчет элементов тензора комплексной диэлектрической проницаемости для анизотропных материалов / Ю.М. Александров, В.В. Яцышен // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 23–27.
7. Иванова, К.И. Способ геоэлектроразведки углеводородной залежи с использованием радиоимпульсных сигналов / К.И. Иванова, В.Ф. Янушкевич // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., СПб., 4 окт. 2016 г. / Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего». – СПб., 2016. – Т. 1. – С. 107–111.
8. Янушкевич, В. Ф. Экранирование радиоэлектронных устройств и систем. Новые принципы проектирования антенн : учеб. пособие для аспирантов / В. Ф. Янушкевич, М. Е. Капралов, К. И. Кременя. – Вильнюс : Циклонас, 2016. – 156 с.
9. Янушкевич, В.Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В.Ф. Янушкевич. – Новополюцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
10. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов [и др.] // 35 Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Владивосток, 1992. – Т. 1, Ч. 1. – С. 59–62.
11. Гололобов, Д.В. Поиск месторождений углеводородов радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – 1999. – № 10. – С. 25–27.
12. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – 1999. – № 10. – С. 27–29.
13. Гололобов, Д.В. Фазовые методы идентификации углеводородных залежей / Д.В. Гололобов, А.О. Рак, В.Ф. Янушкевич // Инженерный вестник. – 2001. – № 1 (20). – С. 16–18.
14. Янушкевич, В.Ф. Приборы для обнаружения углеводородных залежей на основе применения импульсных сигналов / В.Ф. Янушкевич // Приборы. – 2017. – № 8 (206). – С. 12–18.
15. Янушкевич, В.Ф. Поверхностный импеданс анизотропной среды над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов [Электронный ресурс] / В.Ф. Янушкевич // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/2/text.pdf>.
16. Янушкевич, В.Ф. Взаимодействие радиоимпульсных сигналов с анизотропной средой над углеводородными залежами / В.Ф. Янушкевич // Труды МАИ. – 2017. – № 96. – С. 1–16.

Поступила 26.02.2018

DISPERSION CHARACTERISTICS OF ANISOTROPIC ENVIRONMENT OVER HYDROCARBONS IN THE REGIME OF RADIO-PULSE SIGNALS

V. YANUSHKEVICH

The analysis of dispersion characteristics of dielectric permittivity in the interaction mode of radio impulse signals with anisotropic media over hydrocarbon deposits is carried out in the article. Vertical polarization of electromagnetic waves is used. A wide range of frequencies is considered. The effect of the permittivity, the concentration of particles on the propagation of radio impulse signals, has been studied. Recommendations are given on the use of optimal characteristics of probing signals. The obtained results contribute to the determination of anisotropic media by measuring the difference between the signals of a two-channel circuit based on the obtained values of the reflected signals. The application of this search method will improve the productivity of geological exploration. The ability to rebuild the device complements the functionality to search hydrocarbon deposits. Based on the above studies, methods of geological exploration of hydrocarbons can be developed. The results of the research can be used in search geophysics.

Keywords: *electromagnetic wave, anisotropic medium, hydrocarbon deposits.*