

УДК 621.371: 550.837.6

## РАЗРАБОТКА АНТЕНН ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО КОНТРАСТУ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е. С. БУРДИК

(Представлено: С. П. АЛИЕВА, канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ)

*Во введении указан объект исследования – антенны для систем поиска углеводородов на основе определения контраста отражательных характеристик, проведен анализ существующих методов электроразведки и технологий для повышения уровня точности и достоверности выделения углеводородов. Целью исследования является разработка антенны для систем поиска углеводородов на основе определения контраста отражательных характеристик и оптимизация ее параметров.*

В настоящее время актуальность разработки высокоеффективных методов поиска углеводородов возрастает в связи с необходимостью повышения уровня точности и достоверности проводимых геологоразведочных работ [1 – 3]. Проводятся различные виды геоэлектрических съемок с визуализацией аномалий в разности электрических потенциалов, измеренной между приемными электродами используемой установки на основе дифференциально нормализованного метода (DNME) и улучшения диагностики сред, дающие лучшее представление о распределении поляризуемости и сопротивления. Разработка электромагнитных методов поиска и оконтуривания углеводородных залежей на основе двухчастотных, модулированных и импульсных сигналов представлена в работе. Исследовано поведение действительной компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами и осуществлен выбор характеристик сигнала на использовании различных источников излучения электромагнитных волн с амплитудно-частотными коэффициентами отношения в режимах мощных низкочастотных и высокочастотных сигналов. Широко используются методы CSEM для картирования мелководной части морского дна от береговой линии до краев континентального склона. Важная роль уделяется не только проведению электромагнитных измерений, но и интерпретации полученных данных.

Проведен анализ взаимодействия гармонической электромагнитной волны (ЭМВ) с анизотропной средой над УВЗ и учтено влияние ионизации частиц на характеристики сигналов. Сейсмические методы обеспечивают получение изображений геологических структур с высоким разрешением, содержащих месторождения полезных ископаемых, и в некоторых случаях могут использоваться для прямого обнаружения месторождений полезных ископаемых. Проведена оценка информативности результатов поиска углеводородов в Азербайджане [2]. Недавно разработанные в Китае методы CSEM, а именно широкочастотный электромагнитный метод (WFEM), частотно-временной электромагнитный метод (TFEM), метод переходного электромагнитного метода с большим смещением (LOTEM) и беспроводной электромагнитный метод (WEM), используют мощные псевдослучайные двоичные последовательности (PRBS) волновых форм, технологию эталонного наблюдения и обработки, гибридную инверсию и повышают эксплуатационную эффективность и адаптивность, несмотря на острую необходимость в многофункциональном программном обеспечении для сбора данных. Разработаны методики, позволяющие экономически эффективно выполнять съемку мелководных акваторий с изрезанной береговой линией в условиях высокого уровня шумов и строить модели электропроводности разреза. Имеется большой проведения морских методов CSEM для разведки углеводородов. Различные методы, методики и технологии проведения поисковых работ рассмотрены в работе.

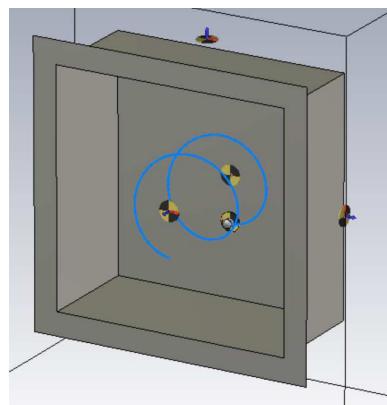
Получена аппроксимация решения и установление связи между наличием залежи и исходными геолого-геофизическими параметрами, которые могут использоваться экспертами для прогноза месторождений и построения карт прогноза газовых и нефтяных месторождений. Разломы универсальны в нефтяных резервуарах и некоторые из них являются полупроницаемыми фильтрационными барьерами, рассматриваются их ранние обнаружения и характеристики. Методы исследования поверхностного импеданса анизотропных сред над углеводородами обладают высокой информативностью и высоким уровнем достоверности обнаружения. Радиокомплексирование методов электроразведки придает значительный толчок исследованиям в данной области и, естественно, разработка высокоеффективных антенн [1, 2] для радиотехнических систем поиска и выделения УВЗ играет существенную роль в получении высокоеффективных методов поиска и оконтуривания углеводородов.

Цель работы заключается в разработке антенны для разработки антенн для систем поиска углеводородов на основе определения контраста отражательных характеристик и оптимизации ее параметров, исходя из следующего технического задания:

- 1) Диапазон рабочих частот 700–1000 МГц;
- 2) Коэффициент стоячей волны (КСВ) менее 1,5;
- 3) Диаграмма направленности по вертикальной плоскости не менее 40°, в горизонтальной – не нормируется;
- 4) Подавление боковых лепестков 30дБ;

В качестве основного подхода к численному электродинамическому анализу конструкции спиральной антенны осевого режима, размещенной в металлической резонаторной полости, выбран метод конечных разностей во временной области (FDTD, Finite-Difference Time-Domain). Данный метод был реализован с использованием промышленного программного пакета CST Microwave Studio, обладающего высокой степенью точности и возможностями трехмерного моделирования сложных геометрий в широком диапазоне частот.

Рассматриваемая антenna представляет собой осесимметричную, обрезанную по длине спираль, размещенную внутри открытой металлической резонаторной камеры прямоугольного поперечного сечения. Геометрическая высота полости идентична длине спирального проводника, размещенного над идеально проводящей заземляющей плоскостью, что обеспечивает полное экранирование и минимизацию внешних диэлектрических влияний. Ширина полости выбрана равной приблизительно 0,6 длины волны на нижней границе рабочего диапазона частот, обеспечивая поддержание моды с конечным излучением. Спираль реализована с числом витков, равным двум (Рисунок 1).



**Рисунок 1. – Внешний вид антенны**

Подвод питания реализован через коаксиальный разъем, установленный со стороны основания полости, где центральный штифт непосредственно соединяется с началом спирального проводника.

Разработка данной антенны предназначена для радиотехнических систем поиска и оконтуривания УВЗ. Методика исследований заключается в определении отражательной способности слоя над залежью углеводородов при воздействии на него ЭМВ с линейной вертикальной поляризацией по контрасту коэффициента отражения между точками измерения слоя над залежью углеводородов и контрольной точкой измерения, расположенной вне зоны залежи нефти и газа по формуле [1]:

$$\Delta R = 20 \lg |\dot{R}_p - \dot{R}_{BB}|, \quad (1)$$

где  $\dot{R}_p$  – коэффициент отражения ЭМВ в расположенной вне зоны залежи нефти и газа контрольной точке измерений;

$\dot{R}_{BB}$  – коэффициент отражения ЭМВ в точках измерения анизотропного слоя над залежью углеводородов.

Значение коэффициента отражения в расположенной вне зоны залежи нефти и газа контрольной точке измерений для ЭМВ с вертикальной поляризацией определяется по формуле:

$$\dot{R}_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}} = |\dot{R}_p| \exp(j\phi_p), \quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость анизотропного слоя;

$\epsilon_p$  – диэлектрическая проницаемость однородного слоя;

$\sigma_p$  – проводимость однородного слоя;

$\omega$  – круговая частота ЭМВ;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$\theta$  – угол падения излучаемой ЭМВ;

$\varphi_p$  – фаза коэффициента отражения от однородного слоя;

$|\dot{R}_p|$  – модуль коэффициента отражения от однородного слоя.

Коэффициент отражения в точках измерения анизотропного слоя над залежью углеводородов

$$\dot{R}_{BB} = \frac{\dot{a}_1 \cos \theta + \dot{a}_3 (\cos^2 \theta - 1)}{\dot{a}_2 \cos \theta + \dot{a}_4 (\cos^2 \theta + 1)} = |\dot{R}_{BB}| \exp(j\Phi_{BB}), \quad (3)$$

где  $\dot{a}_{1,2} = \sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L} \mp 1$ ,

$\dot{a}_3 = \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}$ ,

$\dot{a}_4 = \dot{\epsilon}_R + 2\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L + \dot{\epsilon}_L$ ,

$\dot{\epsilon}_R$  и  $\dot{\epsilon}_L$  – комбинационные составляющие тензора диэлектрической проницаемости анизотропного слоя над залежью углеводородов для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями соответственно;

$|\dot{R}_{BB}|$  – модуль коэффициента отражения от анизотропного слоя над залежью углеводородов;

$\Phi_{BB}$  – фаза коэффициента отражения от анизотропного слоя над залежью углеводородов.

В качестве источника излучения ЭМВ для исследования свойств анизотропного слоя над УВЗ применим двухчастотную волну:

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t, \quad (4)$$

где  $A_1, A_2, \omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2$  – соответственно амплитуды и частоты применяемых источников ЭМВ. Режимы измерений задаются коэффициентами соотношения значений амплитуд двух ЭМВ и их частот

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (5)$$

Режим воздействия мощного низкочастотного сигнала определяется коэффициентами отношения амплитуд и частот:  $k_E \ll 1, k_\omega \ll 1$ , режим воздействия мощного высокочастотного сигнала –  $k_E \gg 1, k_\omega \ll 1$ .

Антenna соответствует заданному диапазону 700–1000 МГц. Рассчитана на импеданс 50 Ом. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВ) на частоте 700 МГц равен примерно 1,75 (Рисунок 2). На частоте 1000 МГц составляет 1,55. Данная характеристика полностью соответствует требованиям технического задания.

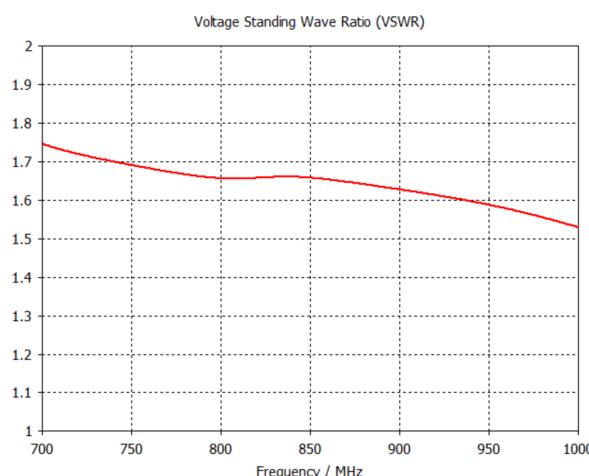


Рисунок 2. – КСВ антены

Для моделирования применены характеристики экспериментальных данных для реальных месторождений углеводородов [1]: диэлектрическая проницаемость слоя над скоплениями УВЗ  $\epsilon_r = 1 - 30$ , диапазон проводимостей слоя над углеводородами  $\sigma_r = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \text{ См} / \text{м}$ ; концентрации электронов и ионов  $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$ , частота столкновений взаимодействующих в данной среде электронов и ионов  $v = 2 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ рад} / \text{с}$ .

Диаграмма направленности (ДН) дипольной эллиптической антенны на частоте 700 МГц имеет усиление 7,68 дБи, а на частоте 1000 МГц – 10,8 дБи. Диаграмма направленности соответствует требованиям. Эффективность антенны полностью соответствует ожиданиям. Средняя эффективность составляет примерно 0,915.

В результате проведенного теоретического анализа установлено, что при выборе значения частот в диапазоне  $f_2 = (700 - 1000)$  МГц и  $f_1 = (1 - 10)$  МГц наблюдается максимальное проявление аномального изменения величины контраста коэффициентов отражения между точками измерения исследуемой залежи УВЗ и контрольной точкой измерения, расположенной вне зоны углеводородов при вариации параметров диэлектрического наполнителя среды. Граница залежи определяется по аномальным значениям контраста коэффициентов отражения.

Предлагаемый способ был опробован на Осиповичском подземном хранилище газа.

**Заключение.** Таким образом, разработанная антенна обеспечивает устойчивый осевой режим излучения в широком частотном диапазоне, с хорошо выраженным направленным лепестком вдоль оси спирали.

Метод FDTD, реализованный в CST Microwave Studio, продемонстрировал высокую эффективность в моделировании сложной электродинамической структуры, позволив получить детализированные характеристики поля и параметров антенны.

Входной импеданс антенны близок к 50 Ом на центральной частоте, что обеспечивает хорошее согласование с коаксиальным кабелем без необходимости применения внешних согласующих цепей.

Проведенные исследования показали, что контраст коэффициента отражения между точками измерения слоя над залежью углеводородов и контрольной точкой измерения, расположенной вне зоны залежи нефти и газа при воздействии на него ЭМВ с линейной вертикальной поляризацией максимально проявляется в диапазоне  $f_2 = (700 - 1000)$  МГц и  $f_1 = (1 - 10)$  МГц.

Установлено, что на границе залежи углеводородов происходит увеличение контраста коэффициентов отражения до величин 8,50 дБ, 8,00 дБ (режим мощного низкочастотного сигнала) и 6,00 дБ, 6,50 дБ (режим мощного высокочастотного сигнала) на частотах  $f_2 = 700, 1000$  МГц, что может быть применено для разработки методов поиска и оконтуривания углеводородов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Estimating Informational Content for Hydrocarbons Searching in Azerbaijan A Alizadeh, I Guliyev, P Mamedov, A Elmira, A Feyzullayev, D Huseynov, L Eppelbaum Pliocene Hydro-carbon Sedimentary Series of Azerbaijan. In book: Pliocene Hydrocarbon Sedimentary Series of Azerbaijan (pp.409-420) Edition: 1stChapter: 17 Publisher: Springer, 2024.
3. Moskvichew, V.N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20-22, 1991. – Vol. 1. – P. 240 – 244.