

УДК 621.371: 550.837.6

**АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА АНТЕНН
ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОЧВЕННО-ГРУНТОВОГО СЛОЯ
НАД ЗАЛЕЖАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Е. С. БУРДИК

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

В работе представлен процесс и результаты выбора типа антенны для решения конкретной прикладной задачи, регламентированной техническим заданием. На основе анализа требований технического задания (частотный диапазон, диаграмма направленности, коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны, габариты) определен оптимальный тип антенны. Предлагаемый способ был опробован на Осиповичском подземном хранилище газа Могилевской области. Результаты работы имеют практическую ценность для проектирования антенных систем для выделения почвенно-грунтового слоя над углеводородами.

Актуальность разработки методов и аппаратуры по поиску углеводородных залежей (УВЗ) определяются повышением требований к уровню достоверности и точности их обнаружения [1 – 3]. При этом учитываются проявления физико-химических процессов, приводящих к возникновению свойств анизотропного характера в средах над углеводородами [3]. Применяется широкий спектр интерпретации радиограмм полученных данных для дифференциации среды [1]. Аномалии изменения естественного излучения залежей позволяют выделять нефтяные и газовые месторождения [3]. Методы вызванной поляризации позволяют исследовать вторичные электромагнитные поля и фиксировать уровень поляризации по сравнению с фоновыми значениями [2].

В последнее время широко применяется 3D-инверсия морских данных CSEM с использованием быстрого конечно-разностного кода во временной области и оптимизации на основе приближенного гессиана. Применяются методы CSEM на основе обнаружения контраста сопротивления резистивной пластовой жидкости по отношению к ее проводящей окружающей среде и интеграцией с сейсмическими данными для работ на мелководье. Методы контролируемого источника электромагнитного поля позволяют расширить возможности разведки. Обнаружение углеводородных залежей в естественных условиях залегания методами сопротивлений повышает информативность методов поиска УВЗ. С помощью повышения чувствительности измерений возможно определение геологических образований в структуре Земли, которые, как правило, являются анизотропными почвенно-грунтовыми слоями. Комплексное применение методов разведки дает огромный толчок исследованиям в данном направлении и, естественно, создание высокоеффективных антенн [2, 3] для радиотехнических систем поиска и идентификации УВЗ и способов возбуждения электромагнитных волн играет важную роль в получении высокоеффективных методов поиска и идентификации углеводородов [3].

Цель работы заключается в разработке антенны для поиска и идентификации углеводородов на основе способа измерений импеданса антенн для выделения почвенно-грунтового слоя над углеводородами и оптимизации ее параметров, исходя из следующего технического задания:

- 1) Диапазон рабочих частот 1700-3000 МГц;
- 2) Входной импеданс 50 Ом;
- 3) Коэффициент стоячей волны (КСВ) менее 2;
- 4) Диаграмма направленности по вертикальной плоскости не менее 40°, в горизонтальной – не нормируется;
- 5) Подавление боковых лепестков 30дБ;
- 6) Диэлектрическая проницаемость среды в пределах 2,5-4;

Для выполнения требований технического задания выбрана линейная коническая щелевая антenna. Линейная коническая щелевая антenna входит в группу антенн, называемых концевыми коническими щелевыми антеннами. Концевые конические щелевые антennы включают антennы постоянной ширины, линейно конические и экспоненциально конические, также известные как антennы Вивальди. Характеристики производительности включают: широкую полосу пропускания, средний коэффициент усиления и низкие боковые лепестки.

Проектирование данной антенны предназначено для радиотехнических систем поиска и идентификации УВЗ. Методика исследований заключается в определении компонент поверхностного импеданса почвенно-грунтового слоя над УВЗ по формулам (1) и (2):

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \left(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right), \quad (1)$$

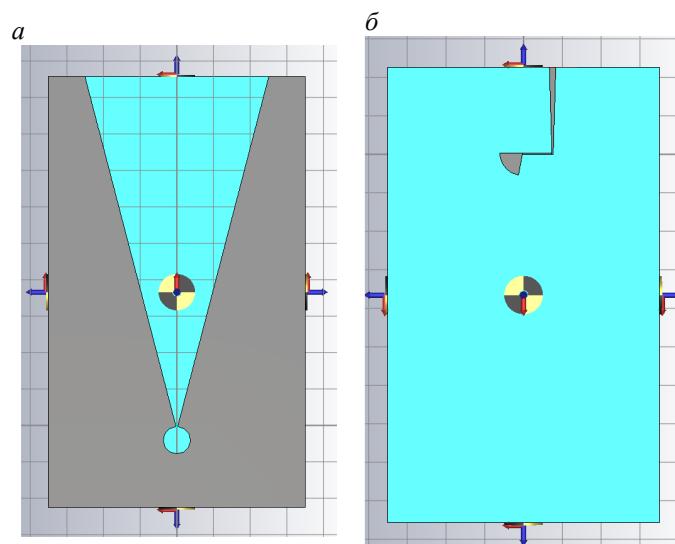
$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \left(\sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right),$$

где

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_R &= \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_1 + \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_2 = \operatorname{Re} \mathbf{\mathcal{E}}_R + j \operatorname{Im} \mathbf{\mathcal{E}}_R \\ \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_L &= \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_1 - \dot{\mathbf{\mathcal{E}}}_2 = \operatorname{Re} \mathbf{\mathcal{E}}_L + j \operatorname{Im} \mathbf{\mathcal{E}}_L. \end{aligned} \quad (2)$$

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

Микрополосковая питаемая линейная коническая щелевая антенна изготавливается из металлизированной диэлектрической подложки с линейно конической щелью, вытравленной в металлизации. Круглая щелевая полость соединена с узким концом конической щелевой линии (раствором) с короткой длиной щелевой линии. На обратной стороне подложки находится микрополосковая линия, заканчивающаяся широкополосным радиальным четвертьволновым шлейфом. Основание шлейфа перекрывает щелевую линию близко к круглой полости (Рисунок 1).



a – вид спереди; б – вид сзади

Рисунок 1. – Внешний вид антенны

На основе проведенного моделирования для режима гармонического колебания было установлено, что на отрезке 1,7...3,0 ГГц происходит изменение составляющих поверхностного импеданса почвенно-грунтового слоя над углеводородами \dot{Z}_{11} и \dot{Z}_{21} . Это приводит к изменению отражательных характеристик среды над углеводородами, что в свою очередь отражается на изменении КСВ антенны. Проводились экспериментальные исследования микрополосковой антенны в диапазоне частот 1,7...3,0 ГГц с характеристикой КСВ, показанной на рисунке 2.

Антенна изготовлена на диэлектрической подложке. Переход микрополосковой линии в щелевую линию реализуется путем травления щелевой линии на одной стороне подложки, которая пересекается под прямым углом микрополосковой линией на противоположной стороне подложки. Микрополосковая линия расширяется, образуя радиальный шлейф, который действует как широкополосное виртуальное короткое замыкание на пересечении микрополосковой линии и щелевой линии. Щелевая линия расширя-

ется в круглую полость, чтобы действовать как широкополосная виртуальная открытая цепь. Преимущество этого метода питания заключается в том, что и антenna, и ее питание (которое также может включать секцию согласования импеданса) могут быть проправлены на одной подложке.

Использование измерений импеданса антенн для выделения анизотропных неоднородностей находит применение на практике [2]. Отличие отражательных характеристик почвенно-грунтового слоя над углеводородами может быть применено для идентификации свойств подстилающей поверхности на основании изменения коэффициента стоячей волны антенн (КСВ) [3].

Антenna соответствует заданному диапазону 1700-3000 МГц. Рассчитана на импеданс 50 Ом. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВ) на частоте 1700 МГц равен примерно 1,3. На частоте 3000 МГц составляет также 1,3. Данная характеристика полностью соответствует требованиям технического задания.

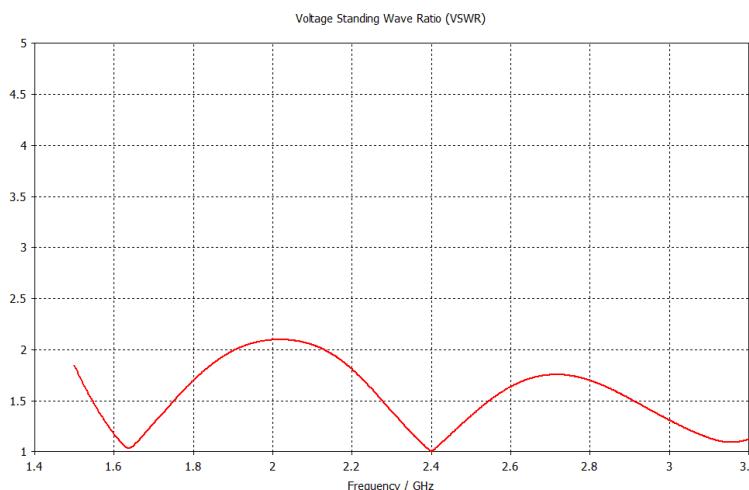


Рисунок 2. – Коэффициент стоячей волны по напряжению

Диаграмма направленности (ДН) микрополосковой питаемой линейной конической щелевой антены на частоте 1700 МГц имеет усиление 4,37 дБи, а на частоте 3000 МГц – 9,72 дБи. Диаграмма направленности соответствует требованиям.

Эффективность микрополосковой питаемой линейной конической щелевой антены полностью соответствует ожиданиям. Средняя эффективность составляет примерно 0,94.

Импеданс антены изменяется в более широких пределах: ± 50 Ом. Микрополосковая питаемая линейная коническая щелевая антenna имеет размеры 236 мм · 140 · 1,16 мм.

Предлагаемый способ был опробован на Осиповичском подземном хранилище газа Могилевской области. При реализации способа использовался измеритель КСВ с данной антенной. Электромагнитный сигнал с выхода измерителя КСВ поступает на исследуемую антенну. Измерения проводились на частотах $f_1 = 1,7$ ГГц, $f_2 = 2,5$ ГГц, $f_3 = 3,0$ ГГц. Высоту подъема антены выбирали из соображений проведения измерений (на расстоянии 1м от поверхности земли). Антenna располагалась таким образом, чтобы излучение направлялось антенной перпендикулярно поверхности земли с целью получения максимального отклика от области предполагаемой залежи. Отраженное излучение принимается антенной, поступает в измеритель КСВ. В точках измерения исследуемого профиля определяли КСВ. Аномальное изменение его величины свидетельствует о наличии УВЗ. Задавалась опорная точка, относительно которой измеряли КСВ вдоль исследуемого профиля. Данные измерений представлены в таблице 1. Изменения значений КСВ указаны в процентах относительно значений в точке 150 м (границе залежи соответствует точка 170 м), которые приняты за основу (уровень 0 %). Знак – указывает на то, что значения КСВ уменьшаются на указанную величину в процентах относительно точки 150 м, которая находится вне залежи.

Таблица. – Экспериментальные значения КСВ антены на территории Осиповичского подземного хранилища газа

R, м	150	160	170	180	190	200	210	220	230	
KСВ, %	f = 1,7 ГГц	0	-5,5	-50	-45	-50	-42	-47	-48	-50
	f = 2,5 ГГц	0	-6,0	-38	-45	-50	-44	-41	-49	-39
	f = 3,0 ГГц	0	-3,0	-45	-50	-50	-43	-41	-50	-42

Таким образом, на границе залежи (точка 170 м) установлено существенное уменьшение КСВ антенны по сравнению с околозалежным пространством (-50 % на частоте $f = 1,7$ ГГц, -38 % на частоте $f = 2,5$ ГГц, -45 % на частоте $f = 3,0$ ГГц). Применяя калибровку антенн на тестовых территориях, данный способ может быть использован для поиска и идентификации углеводородов. Если использовать измерения КСВ двух и более антенн, можно повысить уровень достоверности поиска и идентификации углеводородов за счет высокой разрешающей способности.

Заключение. Преимуществами предлагаемого способа по сравнению с существующими аналогами являются:

- повышение точности определения границ залежи за счет измерения КСВ в широком диапазоне частот;
- повышение разрешающей способности определения местоположения залежей за счет измерения КСВ двух и более антенн;
- лучшие масса-габаритные показатели антенн;
- повышение производительности геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun, Q.; Tan, H.; Wan, W.; Hu, Q. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. *Appl. Sci.* 2024, 14, 1560. <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
2. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
3. Теоретические основы поисков и разведки нефти и газа / Под ред. Э.А.Бакирова и В.Ю.Керимова: Учебник для вузов. В 2-х кн. – 4-е изд. перераб. и доп. – Кн.2: Методика поисков и разведки скоплений нефти и газа. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2012. – 416 с.