

Моделирование направленных свойств дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта

А. П. Хмелинин^{1}, Е. В. Денисова, А. И. Конурин, Л. В. Шебалкова²*

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: hmelinin@misd.ru

Аннотация. Получены аналитические зависимости коэффициента отражения плоской электромагнитной волны на границе раздела сред: «скважина – около-скважинное пространство». Выполнено численное моделирование диаграмм направленности в масштабе коэффициента усиления дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта. Учитывалось влияние свойств материала, заполняющего скважину на формирование электромагнитного поля антенны в радиочастотном диапазоне.

Ключевые слова: дипольная антенна, нефтенасыщенный пласт, скважина, электромагнитные свойства, коэффициент отражения, плоская электромагнитная волна, диаграмма направленности, коэффициент усиления антенны

Modeling directivity of dipole antenna in borehole environment in oil reservoir

A. P. Khmelinin^{1}, E. V. Denisova, A. I. Konurin, L. V. Shebalkova²*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: hmelinin@misd.ru

Abstract. The authors have obtained the analytical relations for the plane electromagnetic wave reflection coefficient at the borehole–borehole environment interface. The numerical modeling of directivity diagrams is carried out on the scale of the gain factor of a dipole antenna arranged in the borehole environment in an oil reservoir. The modeling takes into account the influence exerted by the properties of the borehole fill material on the electromagnetic field of the antenna in the radio-frequency range.

Keywords: dipole antenna, oil reservoir, borehole, electromagnetic properties, reflection coefficient, plane electromagnetic wave, directivity diagram, antenna gain factor

Введение

В связи с тем, что индукционные методы геонавигации не обладают достаточной точностью и не обеспечивают безопасность проходки скважин в нефтенасыщенных пластах, последние годы стали популярны георадиолокационные методы исследования около-скважинного пространства [1]. С помощью геора-

дара, работа которого основана на передаче и приеме высокочастотных электромагнитных волн, исследуют подземное пространство на наличие различного типа неоднородностей. При распространении электромагнитной волны в структурно-неоднородных массивах горных пород происходит ее отражение от границ раздела сред с различными электромагнитными характеристиками. Далее, отраженная от такой границы раздела сред электромагнитная волна принимается с помощью приемной антенны и путем обработки принятых сигналов формируется временной профиль геологического разреза. По параметрам интенсивности принятого сигнала, его форме и времени задержки определяют пространственное положение, электрические параметры и геометрию цели. Система георадара включает в себя передающую и приемную антенны, а также систему управления приемом и передачей сигналов и устройство хранения данных. При этом широко используют широкополосные антенны на разный диапазон частот, глубину обнаружения и область применения. В низкочастотном диапазоне (десятки МГц) дальность обнаружения георадаром будет больше, но его разрешающая способность значительно снижается, наоборот, при использовании более высокой частоты (сотни МГц) дальность уменьшается, но разрешающая способность относительно высокая. Известны промышленные приборы, которые используют для исследования геологических разрезов пород поверхностного залегания (производство Россия – Грот, ОКО, Лоза, производство США – *SIR-3000* и т.п.) на дальностях до 30 м для песчаного грунта [1]. Скважинный георадар подразумевает размещение антенны в скважине, он может обнаруживать и оценивать геологическое строение глубоких подземных областей с высоким разрешением [2]. Частотный диапазон современного скважинного радара обычно около 100-1000 МГц, и глубина проникновения в скальную породу составляет 20 м и более [3]. Традиционная передающая антенна скважинного радара и приемные антенны всенаправленные, поэтому они могут определять только глубину цели и расстояние до скважины, но не ее азимут [4].

В работах [5-7] предложены конструкции направленного скважинного георадара, которые представляют собой передающую антенну и четыре приемные, что позволит повысить разрешающую способность по азимуту обнаружения цели. А в работе [8] рассмотрены возможности направленного скважинного георадара для оценки трехмерного местоположения геологических границ. Направленная антенна представляет собой круглую дипольную антенную решетку, размещенную в скважине. Разница во времени прихода сигналов, принимаемых дипольными элементами, позволяет оценить направление прихода принятой волны. С помощью такого метода можно создать трехмерное изображение границы раздела сред в горной породе. При скважинных радиолокационных измерениях цилиндрические слои, составляющие среду около-скважинного пространства, всегда окружают антенны, иногда существенно влияя на их характеристики и характеристики принимаемых радиолокационных сигналов. Эти изменения, вызванные наличием скважины, называют скважинным эффектом.

В георадарах, в том числе и скважинных, широкое применение получили дипольные и щелевые антенны ввиду особенностей конструкции. Направленные

свойства таких антенн изучались как при их расположении непосредственно в породном массиве, так и в скважине, в том числе и заполненной буровым раствором. При помещении антенны в цилиндрическую скважину отмечаются значительные искажения диаграммы направленности, вследствие возникновения явлений дифракции электромагнитных волн на отражающей поверхности. Изменение формы диаграммы направленности напрямую связано с изменением электромагнитных характеристик среды. Например, при помещении электрического диполя из воздуха в хорошо проводящую среду наблюдается расширение диаграммы направленности антенны вследствие различного затухания электромагнитных волн, излучаемых на участках вблизи концов диполя и на участках вблизи его центра [9]. Влияние диэлектрической проницаемости жидкости, заполняющей скважину на параметры антенн скважинного георадара рассматриваются в работе [5].

Наиболее актуально использование направленных скважинных георадаров для исследования скважин и около-скважинного пространства нефтенасыщенных пластов. Такие георадары размещают в горизонтальном стволе скважины для мониторинга водонефтяного контакта, для картирования среды нефтяного коллектора или даже для управления бурением нефтеносной породы. В целом, скважинная радиолокационная система может отображать слоистую геоструктуру на расстоянии 0,5–10 м от ствола скважины в большинстве нефтяных коллекторах с высоким разрешением. [10]

Особенности процессов отражения электромагнитных волн в проводящих средах

Скважинные георадары используют высокочастотные электромагнитные волны для обнаружения границ раздела геосред. Их способность отображать геологическую структуру около-скважинного пространства зависит в основном от электромагнитных свойств среды, в которой распространяются волны и их частоты. Рассмотрим отражающую способность границ нефтенасыщенного пласта. Для упрощения расчетов фронт излучаемой волны принят плоским, а электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость не зависят от частоты.

Схема постановки задачи изображена на рисунке 1. Около-скважинное пространство (среда 2) представляет собой однородный нефтенасыщенный пласт, который является смесью глинястых или песчаных пород с нефтью и обладает электропроводностью $\sigma=5 \cdot 10^{-4} \div 0.5$ 1/Ом·м, диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=5 \div 15$ в зависимости от влажности и глинистости. Изменение электропроводности нефтенасыщенного пласта существенно зависит от содержания в нем воды и ее солености. Сама скважина может быть заполнена пресной ($\varepsilon=81$, $\sigma=0.01$ 1/Ом·м) или соленой ($\varepsilon=81$, $\sigma=4$ 1/Ом·м) водой, либо воздухом ($\varepsilon=1$, $\sigma=0$ 1/Ом·м) – среда 1. Магнитная проницаемость таких сред равна 1.

Рассмотрим нормальное падение электромагнитной волны на границу раздела двух изотропных полупространств (см. рис. 1). При этом длина волны много меньше расстояния до границы раздела сред.

Пусть на плоскую границу, разделяющую однородные полупространства двух электрических сред 1 и 2 с соответствующими диэлектрическими проница-

емостями ε_1 и ε_2 , проводимостями σ_1 и σ_2 , и магнитной проницаемостью равной 1 падает перпендикулярно поляризованная электромагнитная волна, излучаемая передающей антенной скважинного георадара.

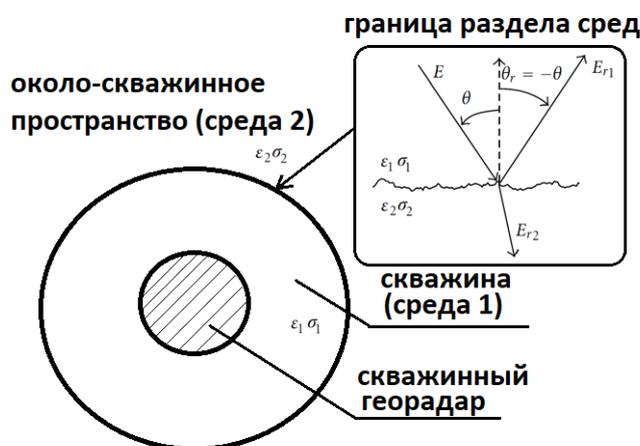


Рис. 1. Процессы отражения-преломления плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела двух сред «скважина (среда 1) – около-скважинное пространство (среда 2)». Поперечное сечение скважины, вмещающей скважинный георадар

В [11] и [12] приведены формулы Френеля для расчета отраженной электрической компоненты электромагнитного поля, поскольку обе среды обладают как диэлектрической проницаемостью, так и электропроводностью, коэффициент отражения при нормальном падении будет иметь комплексное значение:

$$V_{\perp} = \frac{1-N}{1+N}, \text{ где } N = \sqrt{\frac{\varepsilon_2'}{\varepsilon_1'}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 - i60\lambda\sigma_2}{\varepsilon_1 - i60\lambda\sigma_1}}.$$

По формуле Муавра вычисление корня из комплексного числа: $\sqrt{\varepsilon_1 - i60\lambda\sigma_1} = \sqrt[4]{\varepsilon_1^2 + (60\lambda\sigma_1)^2} \cdot e^{i\frac{1}{2}\arctg\frac{60\lambda\sigma_1}{\varepsilon_1}}$, аналогичную зависимость можно получить и для второй среды. Введем обозначения: $\sqrt{\varepsilon_1 - i60\lambda\sigma_1} = b_1 \cdot e^{i\alpha_1}$, где для первой среды – материала, заполняющего скважину: $b_1 = \sqrt[4]{\varepsilon_1^2 + (60\lambda\sigma_1)^2}$, а $\alpha_1 = \frac{1}{2}\arctg\frac{60\lambda\sigma_1}{\varepsilon_1}$, а для второй – около-скважинного пространства – нефтенасыщенного пласта соответственно: $b_2 = \sqrt[4]{\varepsilon_2^2 + (60\lambda\sigma_2)^2}$, а $\alpha_2 = \frac{1}{2}\arctg\frac{60\lambda\sigma_2}{\varepsilon_2}$, в [13] получена следующая формула для расчета модуля коэффициента отражения:

$$|V_{\perp}| = \frac{\sqrt{(b_1\cos\alpha_1 - b_2\cos\alpha_2)^2 + (b_1\sin\alpha_1 - b_2\sin\alpha_2)^2}}{\sqrt{(b_1\cos\alpha_1 + b_2\cos\alpha_2)^2 + (b_1\sin\alpha_1 + b_2\sin\alpha_2)^2}}. \quad (1)$$

Получены аналитические зависимости модуля коэффициента отражения от границы нефтенасыщенного пласта (среда 2), рассчитанного по формуле (1), при

этом учитывалась вариация электромагнитных свойств материала, заполняющего скважину (среда 1) и рабочей частоты излучаемой волны.

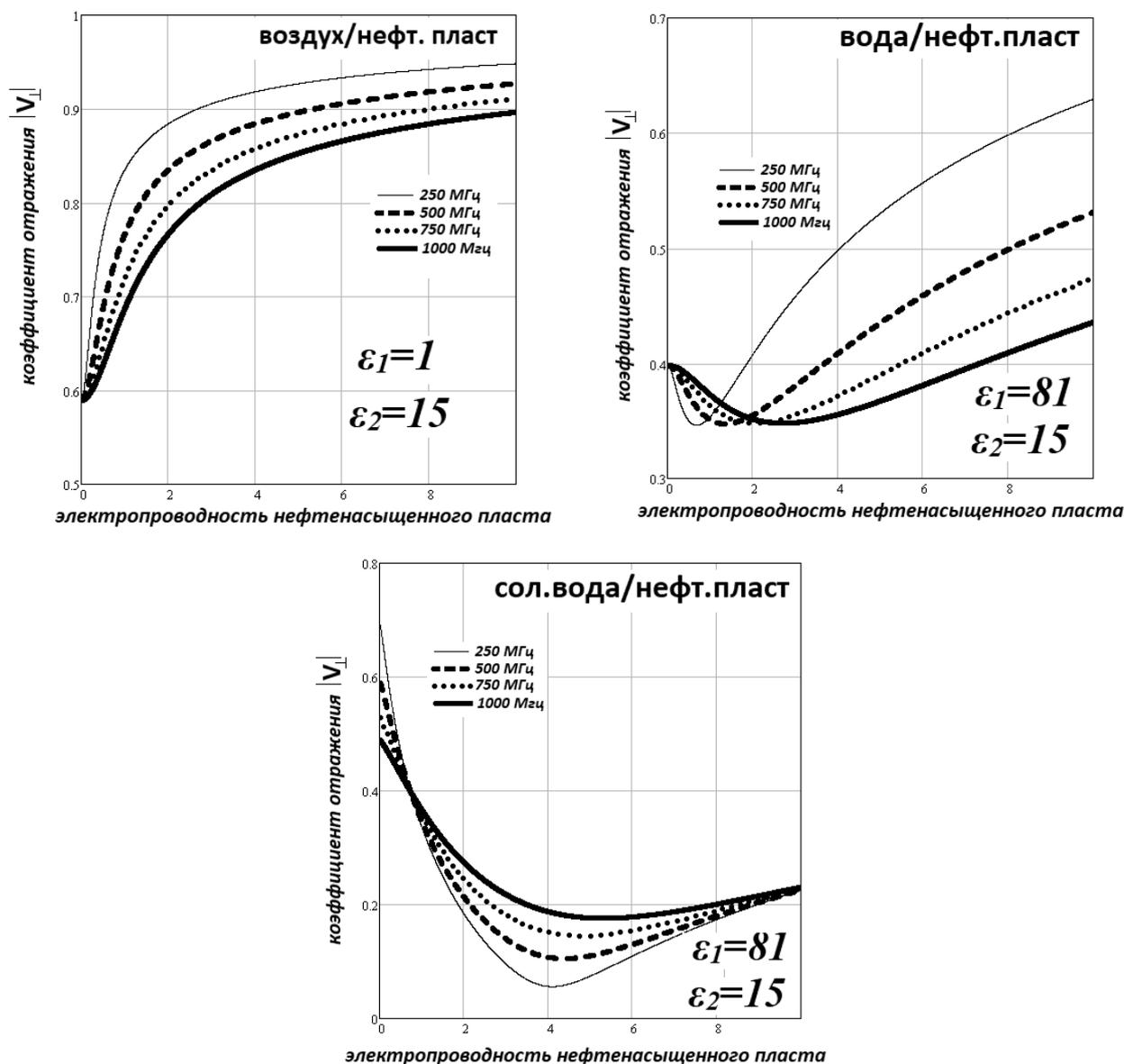


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от границы раздела сред «скважина (среда 1) – около-скважинное пространство (среда 2)» от электропроводности нефтенасыщенного пласта (среда 2)

Согласно полученным результатам (рис. 2), электропроводность нижнего слоя (нефтенасыщенного пласта), которая в реальных условиях может изменяться и зависит от водонасыщенности пласта и солености, существенно влияет на коэффициент отражения электромагнитной волны. Для случая «воздух/нефтенасыщенный пласт» различия в значениях диэлектрической проницаемости настолько велики, что разница в электропроводности практически не влияет на амплитуду отраженного сигнала, а при ее значении приближающемся к 10

$1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ увеличивается в 1.5 раза, достигая $\sim 0,9$, что соответствует практически полному внутреннему отражению. При заполнении скважины соленой водой, в случае, когда проводимость нефтенасыщенного пласта приближается по своим значениям к проводимости соленой воды ~ 4 $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ коэффициент отражения существенно уменьшается, в особенности, для частоты 250 МГц он практически стремится к нулю, что соответствует практически полному поглощению сигнала. Для случая заполнения скважины пресной водой коэффициент отражения от границы раздела сред «вода/нефтенасыщенный пласт» существенно возрастает с увеличением электропроводности нефтенасыщенного пласта с 0.1 до 10 $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ практически в три раза на частоте 250 МГц.

Численное моделирование направленных свойств дипольной антенны в скважине

В работе [14] изучено влияние цилиндрической слоистой структуры скважины на формирование диаграммы направленности диполя и его импеданс методом конечных разностей во временной области (*FDTD*). Выявлены существенные различия при формировании диаграмм направленности диполя, расположенного в скважине, заполненной воздухом и в скважине, заполненной водой. В последней диаграмма направленности диполя имеет дополнительные боковые лепестки на более высокой частоте (рассматривались частоты 69 и 122 МГц). Похожие исследования для нефтенасыщенного коллектора были выполнены и в монографии [1].

В работе [15] экспериментально и с помощью *FDTD* исследуется влияние границ скважины нефтенасыщенного пласта на формирование диаграммы направленности передающей антенны скважинного георадара с рабочей частотой 80 МГц. Рассматривается скважина, заполненная водой. Предложенный в работе [15] подход может быть применен для определения электрофизических свойств геосред – проводимости и относительной диэлектрической проницаемости, и расположения трещин, в том числе пересекающих ствол скважины.

В работах [16-17] были изучены возможности электромагнитных методов исследования скважин гидравлического разрыва при заполнении их как пресной, так и соленой водой. А в работе [18] выполнены исследования глубины проникновения бурового раствора на основе пресной воды в нефтенасыщенный пласт с учетом высокого пространственного разрешения скважинного георадара по сравнению с обычными каротажными методами, что позволяет оценить проницаемость пласта на основе полученной глубины проникновения.

В настоящее время существует большое разнообразие программных продуктов для реализации электродинамических вычислений, которые отличаются богатым функционалом и удобным интерфейсом, однако при интерпретации результатов моделирования направленных свойств антенны возникают трудности. Численное моделирование в этих программных продуктах осуществляется в пределах конечной области пространства. Для имитации присутствия одиночной антенны в свободном пространстве область моделирования ограничена поглощающими границами. В этом случае вид диаграммы направленности, полученный

в процессе моделирования, будет близок к полученным результатам в безэховой камере. Аналогичный подход применим для моделирования антенн относительно высокой направленности расположенных на большой высоте над подстилающей поверхностью. Однако при электродинамическом моделировании антенны радиочастотного диапазона, расположенной вблизи или на подстилающей поверхности необходимо учитывать влияние ее размеров на процесс излучения электромагнитных волн. Такие исследования выполнены в работах [19-21].

С помощью МКЭ было выполнено численное моделирование направленных свойств дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта (см. численную модель на рис. 3). Для минимизации влияния конечной области исследуемого пространства на результаты, поле антенны рассматривалось с учетом выполнения условия распространения электромагнитных волн в дальней зоне: $k \cdot R \gg 1$, где k – волновое число: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, а R – расстояние до антенны.

Для того, чтобы оценить влияние границ скважины нефтенасыщенного пласта, в том числе и заполненной различными флюидами, на формирование направленного излучения дипольной антенны, размеры исследуемого пространства были приняты одинаковыми для всех вариантов моделирования, исходя из выполнения условия выше.

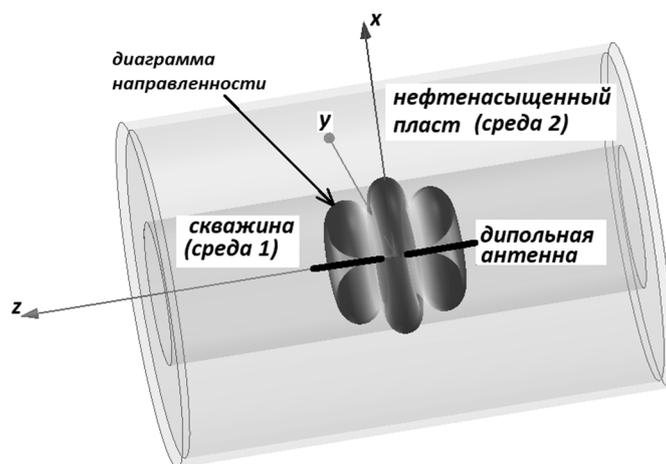


Рис. 3. Общий вид модели для исследования направленных свойств дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта

Ниже на рис. 4 представлены результаты численного моделирования диаграмм направленности в масштабе коэффициента усиления дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта, при заполнении скважины пресной или соленой водой (электромагнитные параметры сред см. выше). В работах [5-6] выполнен анализ рабочих частот скважинных георадаров, который обеспечивает оптимальную разрешающую способность на

дальностях до нескольких метров в проводящих средах, таких как нефтенасыщенный пласт. Частотный диапазон от 100 до 1000 МГц, в котором работает большинство современных георадаров обеспечивает потребности в скважинных исследованиях геосред с повышенной проводимостью. В связи с этим, численное моделирование направленных свойств дипольной антенны выполнено для следующих частот: 250, 500, 750 и 1000 МГц. Диаметр скважины принят 129 мм.

Согласно полученным результатам численного моделирования диаграммы направленности в масштабе коэффициента усиления дипольной антенны, расположенной в скважинном пространстве нефтенасыщенного пласта (рис. 4) установлено, что чем выше рабочая частота скважинного георадара, тем больше поглощение электромагнитного сигнала в среде (см. значения коэффициента усиления антенны в приведенных таблицах на рис. 4). При заполнении скважины соленой водой поглощение сигнала становится максимальным, что затрудняет выполнение скважинных исследований на всех выбранных частотах. Наименьшее влияние на формирование диаграммы направленности дипольной антенны оказывают стенки скважины, заполненной воздухом. При заполнении скважины пресной водой и реализации ее скважинных георадарных исследований, необходимо выбирать частотный диапазон исходя из обеспечения минимального влияния стенок скважины на диаграмму направленности георадара и допустимого поглощения электромагнитного сигнала в геосреде при обеспечении требуемой дальности исследований около-скважинного пространства.

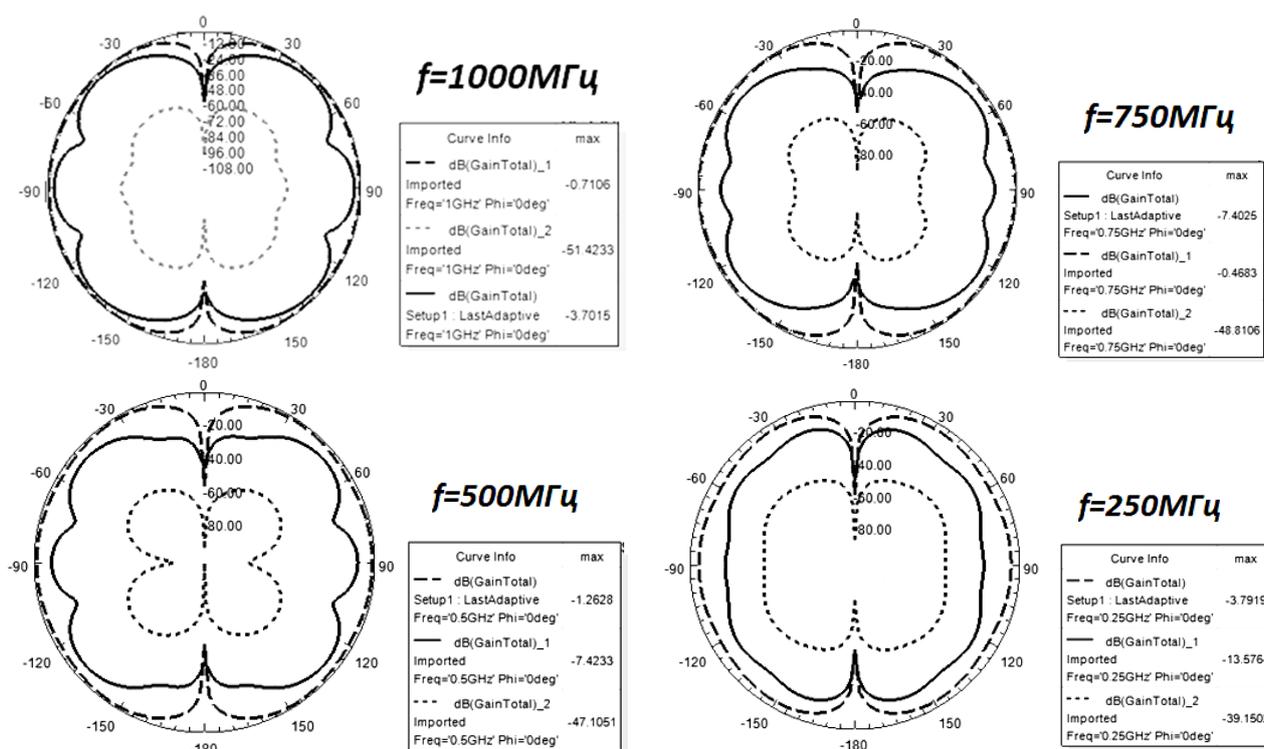


Рис. 4. Сечения диаграммы направленности в масштабе коэффициента усиления дипольной антенны в плоскости ХУ: пунктирная линия – скважина заполнена воздухом, сплошная линия – скважина заполнена пресной водой, линия из точек – скважина заполнена соленой водой

Выводы

Таким образом, на основе выполненного анализа научной литературы по развитию скважинного георадарного метода, полученных результатах аналитических и численных исследований можно сделать вывод об актуальности и возможности применения данного инструментального метода применительно к исследованию скважин и около-скважинного пространства в нефтенасыщенных породах, в том числе повышенной электропроводности. На результаты исследований существенным образом влияют электромагнитные свойства материала, заполняющего скважину и самого нефтенасыщенного пласта. Разрешающая способность по азимуту при определении различного типа неоднородностей (трещин, зон обводнения и т.п.) нефтенасыщенного пласта будет определяться направленными свойствами дипольной антенны или комплекса дипольных антенн скважинного георадара.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эпов М. И., Миронов В.Л., Музалевский К.В., Дашевский Ю.А. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Серия: Интеграционные проекты СО РАН. Вып. 32. – М.: Издательство СО РАН, 2011. – 114 с.
2. Sixin L., Zhaofa Z., Motoyuki S. Subsurface Water-filled Fracture Detection by Borehole Radar: A Case History // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2005, 11. 4 pp.
3. Takayama, T., Sato M. A Novel Direction-Finding Algorithm for Directional Borehole Radar // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007, 45, 2520–2528.
4. Jang H., Kuroda S., Kim H. J. SVD Inversion of Zero-Offset Profiling Data Obtained in the Vadose Zone Using Cross-Borehole Radar // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10):3849-3855.
5. Wentian W., Sixin L., Xuzhang S., Wen-Jun Z. Analysis of the Borehole Effect in Borehole Radar Detection // *Sensors*, 2020. 20. 5812.
6. Wentian W., Sixin L., Xuzhang S., Wen-Jun Z. 3D Imaging Algorithm of Directional Borehole Radar Based on Root-MUSIC // *Remote Sensing*, 2021. 13. 2957.
7. Liu S., Wang W., Fu L., Lu Q. Linear Prediction-Based DOA Estimation for Directional Borehole Radar 3-D Imaging // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2019, 57, 5493–5501.
8. Satoshi E., Shyuhei K., Kengo F., Yuta K., Takaaki S., Ryota U. Consideration of Oblique Incidence in 3-D Imaging of a Planar Interface With a Circular Dipole Array in an Air-Filled Borehole // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020. PP. 1.
9. Рубан А.Д., Бауков Ю.Н., Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч.3. Высокочастотные электромагнитные методы. – Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2002. – 147 с.
10. Chen Yong Hua, Oristaglio M. L. A modeling study of borehole radar for oil-field applications // *Geophysics* 67, 2002: 1486-1494.
11. Kadlec R., Fiala P. The response of layered materials to EMG waves from a pulse source // *Progress In Electromagnetics Research*. 2015. Vol. 42. pp. 179–187.
12. Kadlec R., Fiala P. Electromagnetic Wave Propagation in Heterogeneous Structures // *Piers Online*. 6. 2010. P. 613-616.
13. Судакова М.С., Владов М.Л., Садуртдинов М.Р. Влияние электропроводности на коэффициент отражения электромагнитной волны // *Вестник Московского университета. СЕР. 4. ГЕОЛОГИЯ*. – 2018. – № 1. – С. 100–106.
14. Sixin L., Motoyuki S. Transient radiation from an unloaded, finite dipole antenna in a borehole: Experimental and numerical results // *GEOPHYSICS*, vol. 70, no. 6 (nov.-dec. 2005); p. k43–k51.

15. Sixin L., Motoyuki S. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. *Geoscience and Remote Sensing // IEEE Transactions on.* 40, 2002. 2083-2092.
16. Hoversten G., Schwarzbach C. Monitoring Hydraulic Fracture Volume using Borehole to Surface EM and Conductive Proppant. – October 2020, *Geophysics* 86(1):1-76.
17. Hoversten G., Schwarzbach C. Monitoring hydraulic-fracture volume using surface-to-borehole EM and conductive proppant // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018.* – 2018. 863-867.
18. Zhou F., Giannakis I., Giannopoulos A., Holliger K., Slob E. Estimating reservoir permeability with borehole radar // *GEOPHYSICS*, 2020. 85. 1-42.
19. Yashchenko A., Krivaltsevich S. The estimate of Hertz dipole patterns using finite difference time domain (FDTD) simulation for case a layered-inhomogeneous underlying surface // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 1901. 012111.
20. Кривальцевич С.В., Яценко А.С., Майненгер К.А., Кудрин О.И. Влияние размеров области с поглощающими граничными условиями на результат численного моделирования диаграммы направленности антенны ДКМВ диапазона // *Динамика систем, механизмов и машин.* 2019. – Том 7, № 2. – С. 232-237.
21. Yashchenko A., Krivaltsevich S., Bobrov P. Evaluation of the effective dielectric capacity in the near-surface soil // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.

© А. П. Хмелинин, Е. В. Денисова, А. И. Конурин, Л. В. Шебалкова, 2022