

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ: НЕФТЕНАСЫЩЕННЫЙ ПЛАСТ, ВМЕЩАЮЩИЙ ТРЕЩИНУ ГИДРОРАЗРЫВА

Екатерина Вячеславовна Денисова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, к.т.н., с.н.с. лаб. горной геофизики, тел. (383)2170-952, e-mail: slimthing@mail.ru

Алексей Павлович Хмелинин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, врио директора ИГД СО РАН, тел. (383) 205-30-30, e-mail: hmelinin@misd.ru

Антон Игоревич Конурин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирск, ул. Красный проспект 54, к.т.н., с.н.с. лаб. физико-технических геотехнологий, тел. (383) 205-30-30, e-mail: konurin@misd.ru

Выполнено моделирование распространения плоской электромагнитной волны СВЧ диапазона для расчета коэффициента ее отражения от однородного слоя. Рассмотрен частный случай многослойной геосреды: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва. При обосновании выбора частотного диапазона учитывалась величина неровности поверхности трещины. Выполнен расчет зависимости коэффициента отражения от частоты для электрически менее плотного поглощающего слоя внутри более плотного поглощающего вещества (пустотный слой внутри горной породы).

Ключевые слова: трещина гидроразрыва, нефтенасыщенный пласт, плоская электромагнитная волна, однородный слой, коэффициент отражения, электромагнитные свойства, длина волны, шероховатость

SIMULATION OF REFLECTION OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE IN A MULTILAYER MEDIUM: OIL-SATURATED FORMATION ENCLOSING A HYDRAULIC FRACTURE

Ekaterina V. Denisova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Geophysics Laboratory, office: +7 (383) 217-09-52, e-mail: slimthing@mail.ru

Alexey P. Khmelinin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Acting Director of the Institute of Mining, office: +7 (383) 205-30-30, e-mail: hmelinin@misd.ru

Anton I. Konurin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Physical and Engineering Geotechnology, office: +7(383) 205-30-30, e-mail: konurin@misd.ru

Propagation of a plane electromagnetic wave of the microwave range is simulated to calculate the coefficient of its reflection from a homogeneous layer. A particular case of a multilayer geomedium is considered: an oil-saturated formation enclosing a hydraulic fracture. When justifying the choice of the frequency range, the value of fracture surface irregularity was taken into account. The dependence of the reflection coefficient on frequency for an electrically less dense non-absorbing layer inside a denser non-absorbing substance (a void layer inside a rock) has been calculated.

Keywords: hydraulic fracture, oil-saturated formation, plane electromagnetic wave, homogeneous layer, reflection coefficient, electromagnetic properties, wavelength, irregularity

Введение

Проблема распространения электромагнитных волн в слоистых средах стала чрезвычайно важной за счет теоретического и практического применения в различных областях, в том числе в инженерной геологии. Большинство реальных структур, представляющих интерес, в том числе встречающиеся в природе и искусственно созданные, могут быть в какой-то степени представлены слоистыми структурами. Решение уравнений Максвелла для электромагнитных волн, распространяющихся в таких средах представляет собой серьезные трудности математического характера, и нет общего и единого подхода для их вычисления. В научной статье [1] выполнен обзор современных подходов к изучению процессов распространения электромагнитных волн в многослойных средах, рассмотрены решения прямых и обратных задач.

В рамках данной статьи авторы рассматривают многослойную среду: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва. Понимание того, какая часть излучаемой энергии отразится от верхней и нижней границы слоя (в данном случае трещины гидроразрыва), позволит получить информацию о его толщине и свойствах заполняющей среды (пропант или пустота). Таким образом, с помощью методов георадиолокации можно решать важную задачу о равномерности распределения пропанта в сети трещин гидроразрыва, что существенно повысит эффективность технологии гидроразрыва при разработке месторождений углеводородов.

Постановка задачи

Простейший случай распространения электромагнитной волны в слоистой среде показан на рисунке 1, когда волна нормально падает на ряд параллельных плоских слоев, каждый из которых однороден и обладает соответствующими параметрами: диэлектрической проницаемостью ϵ , электропроводностью σ , магнитной проницаемостью μ .

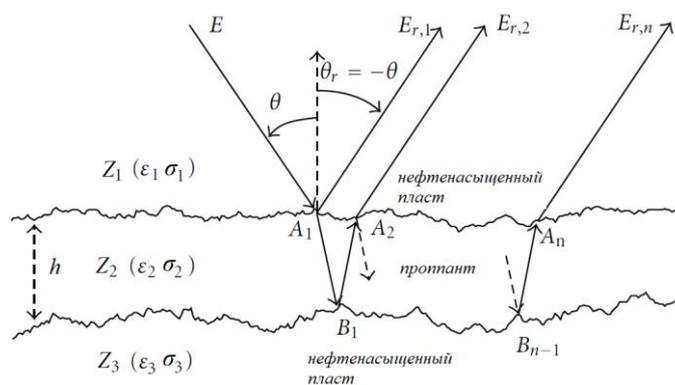


Рис. 1. Процессы отражения в многослойной среде

При рассмотрении явлений отражений плоских электромагнитных волн задача нахождения коэффициентов отражения значительно усложняется вследствие возникновения внутри слоя сложного интерференционного волнового процесса. Данный процесс обуславливается многократным переотражением на верхней и нижних границах слоя прошедшей через верхнюю границу волны. В результате таких многократных актов отражения и прохождения на каждой из границ слоя образуются интерференционные волновые поля как в самом слое, так и в окружающих полупространствах ($A_1 \dots A_n, B_1 \dots B_n$). Вследствие гармонического характера изменения характеристик падающей на слой волны, а, следовательно, и всех отраженных и прошедших волн как в слое, так и вне его, в результате интерференции создается стационарный единый волновой процесс, характеризующийся определенными амплитудными и фазовыми характеристиками, количественно зависящими от электромагнитных свойств сред и отношения длины электромагнитной волны, падающей на слой к толщине слоя [2].

Целью исследований данной работы является получение амплитудно-частотных зависимостей коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от трещины гидроразрыванефтенасыщенного пласта с учетом вариации электромагнитных свойств материала (проппанта) заполняющего эту трещину. Полученные результаты позволят оценить возможности применения методов георадиолокации для картирования трещин гидроразрыва.

Принятые допущения и электромагнитные свойства исследуемых слоев

Согласно рис. 1 слой 2 представляет собой трещину, заполненную проппантом толщиной h в первом приближении с плоскими границами раздела. В качестве проппанта, как правило используют песок, насыщенный водой, или в последнее время для обеспечения контрастности сред, с целью повышения разрешающей способности электромагнитных методов картирования трещин гидроразрыва, применяют проппант повышенной электропроводности, например, содержащий солевые растворы или металлические частицы [3-10]. Относительная диэлектрическая проницаемость Слоя 2 – проппанта равна ϵ_2 , магнитная проницаемость $\mu_2=1$, электропроводность σ_2 . Слой 2 расположен между

полубесконечными геосредами 1 и 3, которые являются вмещающим трещину массивом и представляют собой нефтенасыщенный пласт с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1=\varepsilon_3$, магнитной проницаемостью $\mu_1=\mu_3=1$ и электропроводность $\sigma_1=\sigma_3$. Параметры используемых при расчетах сред представлены в таблице 1.

Оценим влияние величины шероховатости поверхности трещины на рассеяние когерентного поля от такой поверхности с учетом вариации частоты. В последние годы понятие шероховатости границ раздела сред стало применяться при моделировании сложных многослойных структур в различных областях [11]. Авторы статей [11-12] рассматривают решение задачи по рассеянию электромагнитных волн от слоистых сред, состоящих из одной или нескольких случайных шероховатых поверхностей. Для изучения влияния шероховатости поверхности на когерентные рассеянные поля используется параметр шероховатости Рэля. Разделение отражающих поверхностей на гладкие и шероховатые связано с соотношениями между длиной облучающей радиоволны λ , среднеквадратической высотой неровностей поверхности r_h и углом θ между нормалью к среднему уровню поверхности и направлением распространения волны. Считают, что для условно гладкой поверхности согласно критерию Рэля выполняется неравенство: $r_h \cos\theta < \frac{\lambda}{8}$. В обратном случае поверхность считается шероховатой [13]. Поскольку при измерении высоты угол падения θ близок к нулю, приближенно считают, что условием гладкости поверхности является превышение λ над r_h на порядок и больше. При неровностях порядка сантиметров поверхность можно считать гладкой лишь для электромагнитных волн дециметрового и более длинноволнового диапазона. Георадиолокационные системы для сантиметровых волн должны при этом проектироваться на основе модели шероховатой поверхности. Когда электромагнитная волна достигает гладкой поверхности, имеет место зеркальное отражение с равными друг другу углами падения и отражения. При падении волны на шероховатую поверхность отражение носит диффузный характер [13].

Таблица 1

Электромагнитные свойства слоев, частотный диапазон

Среда и ее параметры	f , МГц	$60\lambda\sigma$	λ , м	λ_{cp} , м
Вариант 1.Слой 2: трещина, заполненная пропантом – песок, насыщенный пресной водой: $\varepsilon_2=30$, $\sigma_2=3 \cdot 10^{-2} 1/Ом \cdot м$	500	1,08	0,6	0,109
	1000	0,54	0,3	0,054
	3000	0,18	0,1	0,018
1. Вариант 2.Слой 2: трещина, заполненная пропантом – песок, насыщенный соленой водой: $\varepsilon_2=30$, $\sigma_2=2 1/Ом \cdot м$	500	72	0,6	0,081
	1000	36	0,3	0,048
	3000	12	0,1	0,017
Вариант 3.Слой 2: трещина, заполненная пропантом – влажный песок: $\varepsilon_2=20$, $\sigma_2=10^{-2} 1/Ом \cdot м$	500	0,36	0,6	0,134
	1000	0,18	0,3	0,067
	3000	0,06	0,1	0,022
2. Вмещающий слой 1 и 3 (одинаковый для 1-3 вариантов расчета) – песчаник нефтенасыщенный: $\varepsilon_1=\varepsilon_3=15$, $\sigma_1=\sigma_3=10^{-2} 1/Ом \cdot м$	500	0,36	0,6	0,154
	1000	0,18	0,3	0,077
	3000	0,06	0,1	0,025

По методике, предложенной в работах [12, 14, 15] были выполнены расчеты полей, рассеянных от шероховатых слоев, с разной величиной неровностей ($r_h=2,5$ мм, 5 мм и 10 мм). На рисунке 2 представлено частотное поведение полей E_r рассеянных на шероховатых слоях по отношению к амплитуде $E_{амп}$ рассеянного поля для эквивалентной идеально плоской поверхности в широком диапазоне частот [0,5-8 ГГц] для трех вариантов заполнения трещины пропантом при неизменных свойствах вмещающего слоя (см. Таблицу 1).

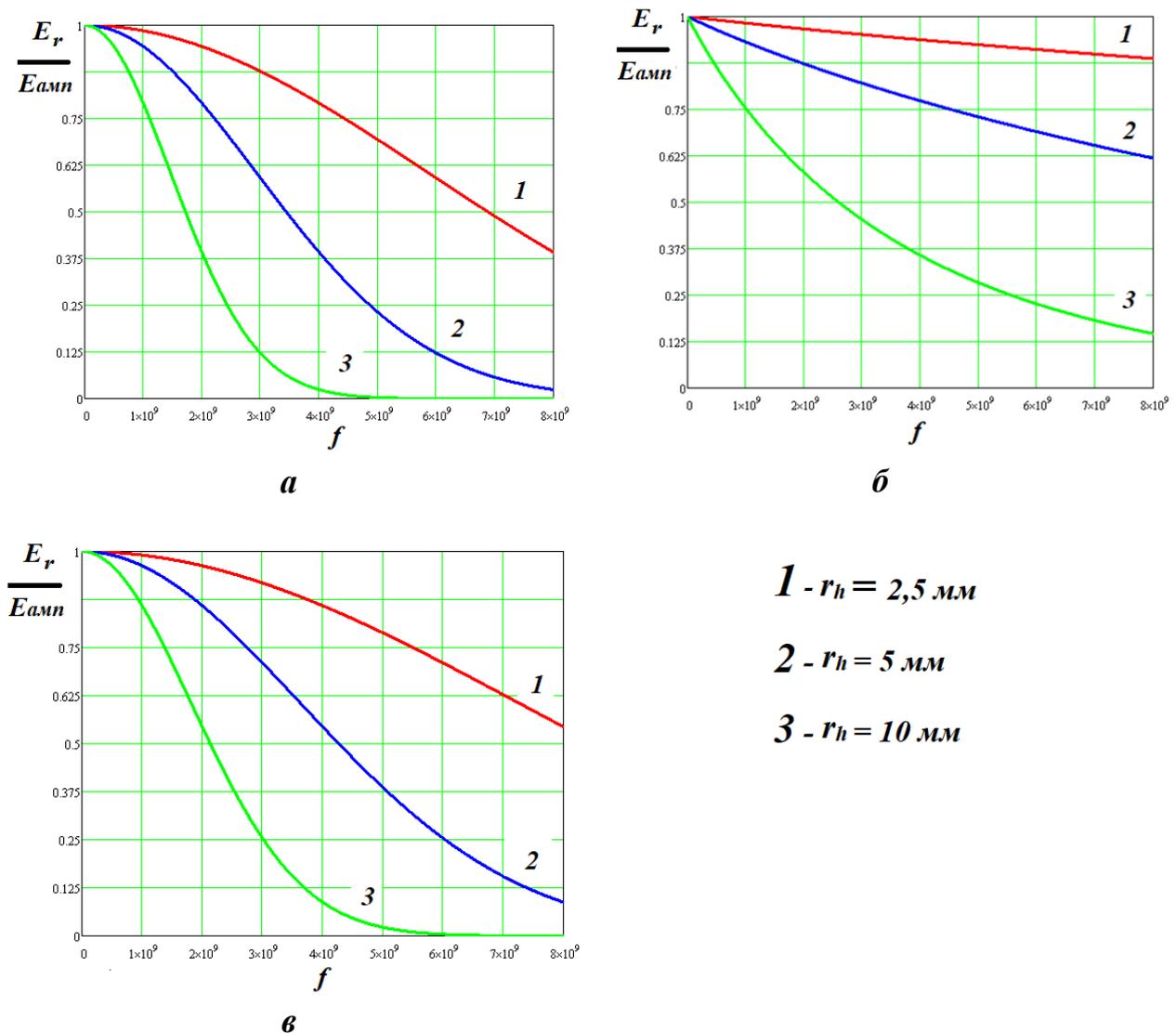


Рис. 2. Затухание когерентного поля из-за шероховатости слоя от частоты:

а – для Варианта 1 ($\epsilon_2=30$, $\sigma_2=3 \cdot 10^{-2}$ 1/Ом·м); б – для Варианта 2 ($\epsilon_2=30$, $\sigma_2=2$ 1/Ом·м); в – для Варианта 3 ($\epsilon_2=20$, $\sigma_2=10^{-2}$ 1/Ом·м)

Влияние шероховатости границ раздела непрерывно возрастает с частотой, вызывая уменьшение рассеянной величины E_r в слое. Это подтверждается параметрами рэлеевской шероховатости, которые увеличиваются с увеличением частоты. Согласно полученным расчетам для заданных параметров, рассеянная напряжённость E_r можно считать несущественным (до 25%) в диапазоне частот до

3 ГГц при величине шероховатости слоя не превышающей 2,5 мм. При этом, чем выше электропроводящие свойства проппанта ($\epsilon i \sigma$), тем менее существенно сказывается шероховатость поверхности слоя трещины гидроразрыва на обнаруженные характеристики. Для дальнейших расчетов примем, что поверхность трещины не имеет шероховатостей по своей величине превышающих 2,5 мм. Частота распространения электромагнитных волн в рассматриваемых средах не превышает 3 ГГц ввиду их существенного поглощения в более высоком диапазоне частот. Фронт волны принят плоским.

Аналитический расчет зависимости коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от слоя (трещины, заполненной проппантом), расположенного внутри нефтенасыщенного пласта

Чтобы рассчитать коэффициент отражения от слоя, достаточно вычислить «входной импеданс» слоя $Z_{вх}$, т.е. импеданс на границе 1-2. В литературе [16] получена формула, позволяющая пересчитывать импеданс с одной границы слоя на другую:

$$Z_{вх} = \frac{Z_1 - iZ_2 \operatorname{tg} k_2 h}{Z_2 - iZ_1 \operatorname{tg} k_2 h} Z_2 \quad (1)$$

Коэффициент отражения от слоя будет определяться формулой [16]:

$$V = \frac{Z_{вх} - Z_3}{Z_{вх} + Z_3}, \quad (2)$$

где Z_1, Z_2 и Z_3 – нормальные импедансы на соответствующих границах слоя, определяемые при данном виде поляризации падающей волны:

$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_k}}$, т.к. μ рассматриваемых слоев равна 1, а $\epsilon_k = \epsilon' - i60\lambda\sigma$ – комплексная диэлектрическая проницаемость, то расчет сопротивлений слоев сводится к вычислению $Z = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_k}}$. Постоянная распространения в слое равна $k_2 = \frac{i\omega\sqrt{\epsilon_k}}{c} = \frac{\omega}{c}(n + pi)$. В литературе [17] введено обозначение $\sqrt{\epsilon_k} = n - ip$, и формулы для расчетов коэффициентов p и n :

$$n = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + (60\lambda\sigma)^2} \right]}, p = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[-\epsilon' + \sqrt{\epsilon'^2 + (60\lambda\sigma)^2} \right]}. \quad (3)$$

Интерпретация уравнений Френеля и Снелиуса при расчете коэффициентов отражения и преломления проста в случае падения электромагнитной волны на границу раздела сред двух диэлектриков. В среде с потерями по своим свойствам

приближающихся к проводникам или «неидеальным диэлектрикам» волновое число ki и импеданс Z необходимо рассматривать как комплексные числа. [18-19]

При выполнении условия: $\varepsilon' \gg 60\lambda\sigma$ плотность токов смещения ($\mathbf{j}_{см}$) значительно больше, чем плотность тока проводимости $\mathbf{j}_{пр}$, значения $\frac{j_{см}}{j_{пр}}$ много больше 1. Это имеет место в средах по своим свойствам приближающихся к диэлектрику, при этом упрощены выражения для коэффициентов p и n [17, 20]: $n \approx \sqrt{\varepsilon}$ и $p = \frac{60\lambda\sigma}{2\sqrt{\varepsilon'}}$. Подставив эти коэффициенты в формулы для расчета скорости распространения волн в среде: $v_{ср} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}$.

Упрощение формул для расчета коэффициентов n и p в случае сред, приближающихся по своим свойствам к полупроводнику. Если плотность токов проводимости значительно превосходит плотность токов смещения, то имеет место условие: $\varepsilon' \ll 60\lambda\sigma$. Тогда коэффициенты n и p равны соответственно [17, 20]: $n \approx \sqrt{30\lambda\sigma}$, $p \approx \sqrt{30\lambda\sigma}$. Скорость распространения волн в среде будет равна: $v_{ср} \approx \frac{c}{\sqrt{30\lambda\sigma}}$.

Подставляя (1) в (2) получена формула для расчета коэффициента отражения от слоя [2, 16]:

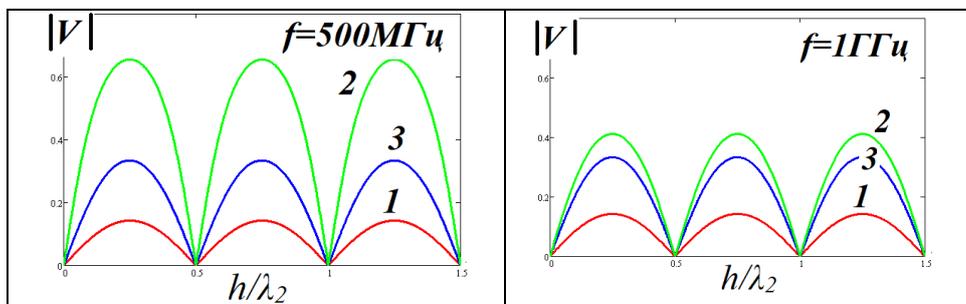
$$V = \frac{(Z_2 - Z_3)(Z_1 - Z_2)e^{-ik_2h} + (Z_2 - Z_3)(Z_1 + Z_2)e^{ik_2h}}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{-ik_2h} + (Z_2 - Z_3)(Z_1 - Z_2)e^{ik_2h}} \quad (4)$$

Данную формулу можно переписать в виде выражений, в которые входят коэффициенты отражения на верхней V_{12} и нижней V_{23} границах слоя [2, 16]:

$$V = \frac{V_{12} + V_{23} e^{2ik_2h}}{1 + V_{12}V_{23} e^{2ik_2h}} \quad (5)$$

где: $V_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$; $V_{23} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2}$.

На рис.3 представлена частотная зависимость модуля коэффициента отражения $|V|$ от волновой толщины слоя $\frac{h}{\lambda_2}$ (где λ_2 – длина волны в слое 2, т.е. в пропанте).



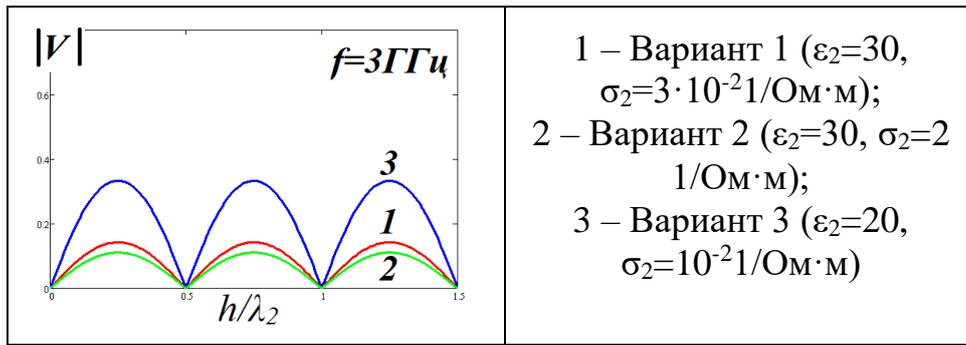


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения при нормальном падении электромагнитной волны на трещину гидроразрыва, заполненную проппантом

Полученные зависимости модуля коэффициента отражения имеют осциллирующий характер и представляют собой чередование максимумов и минимумов этих величин при определенных периодических значениях $\frac{h}{\lambda_2}$. Причем положение максимумов $|V|$ соответствует той частоте падающей волны, на которой при заданной толщине слоя и его электромагнитных параметрах, определяющих величину λ_2 , слой в наибольшей степени пропускает через себя энергию падающей на него волны. При этом для более проводящего проппанта в виде песка насыщенного соленой водой (Вариант 2) модуль коэффициента отражения существенно зависит от частоты электромагнитной волны, которая определяет поглощение излучаемой энергии в слое. Для двух других вариантов проппанта по своим свойствам приближающихся к диэлектрикам модуль коэффициента отражения практически не зависит от частоты электромагнитной волны. Предложенная модель расчета не учитывает поглощающие свойства слоя, при $h \rightarrow \infty$ необходимо учитывать поглощение электромагнитной волны в среде и рассматривать коэффициенты поглощения k_1, k_2 и k_3 как комплексные величины. При этом зависимость модуля коэффициента отражения от волновой толщины слоя будет иметь также осциллирующий характер, однако с увеличением толщины слоя h наблюдается уменьшение амплитудных значений ($|V_{max}|$ и $|V_{min}|$) этой осциллирующей функции.

При нормальном падении волны на слой ($\theta=0$) и условии, что $h=m\lambda_2/2$, где m – целое число 1, 2, 3,.... (имеет место так называемый *полуволновой слой*), из выражения (5) следует что коэффициент отражения от такого слоя равен [20]:

$$V = \frac{V_{12} + V_{23}}{1 + V_{12}V_{23}} = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1} = V_{13}.$$

Это соответствует коэффициенту отражения от границы между окружающими слой полупространствами. И, если импедансы полупространств

одинаковы, как в нашем случае: $Z_1=Z_3$, то отражение от слоя полностью отсутствует $V=0$ и волна проходит без потерь на отражение, не замечая слоя [2].

Аналитический расчет амплитудно-частотной зависимости коэффициента отражения от электрически менее плотного слоя внутри горной породы

После осуществления технологии гидроразрыва и до процесса распределения расклинивающего трещины проппанта целесообразно оценить распределение участков трещинообразования вдоль исследуемой скважины. В связи с этим, рассмотрена модель слоя электрически менее плотного непоглощающего вещества внутри более плотного непоглощающего вещества – это пустотный слой трещины внутри нефтенасыщенного пласта.

Обозначим $V_{12}=V$, тогда $V_{23}=-V$. Постоянная распространения в слое при этом равна $k_2 = \frac{j\omega\sqrt{\epsilon}}{c} = j\omega/v_{cp}$, откуда [21]:

$$V'(f) = V(f)e^{j\varphi(f)} = \frac{V - Ve^{-j2\pi f\Delta t}}{1 - V^2e^{-j2\pi f\Delta t}}$$

где $\Delta t = 2h/v_{cp}$ – время двойного распространения волны в слое. Модуль коэффициента отражения [21]:

$$|V(f)| = \frac{2V|\sin\pi f\Delta t|}{\sqrt{1 - 2V^2\cos 2\pi f\Delta t + V^4}}$$

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика модуля коэффициента отражения с периодом $1/\Delta t$. Максимумы равны $2V/(1+V^2)$, т.е. несколько больше V . Таким образом такой слой можно рассматривать как режекторный гребенчатый фильтр, у которого «зубья» режекции расположены на частотах $m/\Delta t$, где $m=1, 2, 3, \dots, m$.

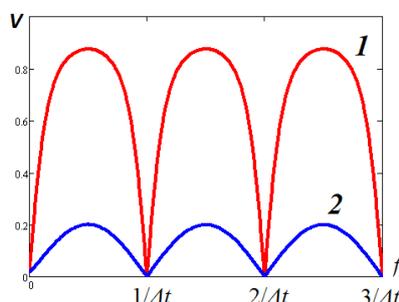


Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от менее электрически плотного слоя внутри нефтенасыщенного пласта: 1 – пустотный слой с $\epsilon_2=1$; 2 – слой влажного песка с $\epsilon_2=10$

При этом, согласно данным рис. 4 модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от пустотного слоя (т.е. трещины не заполненной проппантом) значительно превышает модуль коэффициента отражения электромагнитной волны от трещины, заполненной влажным песком с диэлектрической проницаемостью соизмеримой с диэлектрической проницаемостью нефтенасыщенного пласта, что на практике позволит выделять зоны трещинообразования после осуществления гидроразрыва пласта электромагнитными методами. Это позволит проводить картирование трещин гидроразрыва для расчета требуемого объема проппанта.

Выводы

Выполнен аналитический расчет амплитудно-частотной зависимости коэффициента отражения плоской электромагнитной волны от слоя (трещины, заполненной проппантом), расположенного внутри нефтенасыщенного пласта. При расчетах диэлектрическая проницаемость слоев и волновое число рассматривались как комплексные величины. Установлено, что модуль коэффициента отражения существенно зависит от волновой толщины слоя трещины гидроразрыва, а также электромагнитных свойств заполняющего ее проппанта. При этом, чем выше его электропроводность, тем более выражена эта зависимость. Расчеты были выполнены с учетом когерентного рассеяния электромагнитного поля на шероховатой поверхности трещины. Была определена минимальная величина шероховатости слоя для заданных условий при которой поверхность можно рассматривать как плоскую границу раздела сред. Предложенные методики расчета и полученные результаты дадут возможность обосновывать использование проводящего проппанта, выбирать его оптимальные электромагнитные параметры для обеспечения высокой разрешающей способности при картировании трещин гидроразрыва.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Imperatore P., Iodice A., Pastorino M., Pinel N. Modelling Scattering of Electromagnetic Waves in Layered Media: An Up-to-Date Perspective // International Journal of Antennas and Propagation Volume 2017.
2. Рубан А.Д., Бауков Ю.Н., Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч.3. Высокочастотные электромагнитные методы. – Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2002. – 147с.
3. Hoversten G., Commer M. Electromagnetic Characterization of Hydraulic Fracture Shape and Permeability // 77th EAGE Conference and Exhibition. – 2015.
4. Khmelinin, A.P., Konurin, A.I., Khmelinin, D.P., Konurina, M.I. Antenna assembly for down-the-hole measuring probe for locating and sizing hydraulic fracturing cracks in rock mass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 523(1), 012032.
5. Патент на изобретение №2374438. Способ контроля развития трещины гидроразрыва пласта и ее геометрии / О.Н. Журавлев, Д.А. Коротеев, М. Чарара // Оpubл. в БИ. – 2009. – № 18.
6. Patent US №6330914. Method and apparatus for tracking hydraulic fractures in unconsolidated and weakly cemented soils and sediments / Hocking Grant, Wells Samuel L // Pub. 18.12.2001.

7. Патент на изобретение №2695411. Способ определения геометрии трещин при гидро-разрыве пласта / Г.В. Падерин, Е.В. Шель // Опубл. в БИ. – 2019. – № 21.
8. Hoversten G., Schwarzbach C. Monitoring Hydraulic Fracture Volume using Borehole to Surface EM and Conductive Proppant. – October 2020, Geophysics 86(1):1-76.
9. 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.
10. Hoversten G., Schwarzbach C., Belliveau P., Haber Eldad, Shekhtman R. Borehole to Surface Electromagnetic Monitoring of Hydraulic Fractures // Conference: 79th EAGE Conference and Exhibition 2017. – 2017.
11. Tabatabaenejad A., Duan X., Moghaddam M. Coherent scattering of electromagnetic waves from two-layer rough surfaces within the kirchhoff regime // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – vol. 51. – no. 7. – pp. 3943–3953.
12. Pinel N., Le Bastard C., Bourlier C., Sun M. Asymptotic modeling of coherent scattering from random rough layers: Application to road survey by GPR at nadir // International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2012.
13. Алексеев О.А., Баскаков А.И., Терехов В.А. Радионавигационные системы. Часть 1. Автономные радионавигационные системы летательных аппаратов. – Учебное пособие: под ред. Ю.Н. Бугаева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 68 с.
14. Pinel N., Bourlier C., Saillard J. Degree of roughness of rough layers: extensions of the rayleigh roughness criterion and some applications // Progress In Electromagnetics Research B. – 2009. – vol. 19. – pp. 41–63.
15. Pinel N., Bourlier C. Scattering from very rough layers under the geometric optics approximation: further investigation // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – vol. 25. – no. 6. – pp. 1293–1306.
16. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 343 с.
17. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1960. – 392 с.
18. 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.
19. Kadlec R., Fiala P. Electromagnetic Wave Propagation in Heterogeneous Structures // Piers Online. 6. – 2010. – 613-616.
20. Миролюбов Н.Н. Курс теоретических основ радиотехники (распространение и излучение электромагнитной энергии). – Воен. ордена Ленина и ордена Суворова артиллер. инж. акад. им. Ф. Э. Дзержинского. – Москва: [АИА им. Дзержинского], 1957. – 653 с.
21. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 128 с.

© Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин, А. И. Конури, 2021