



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ**

Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин, А. И. Конурин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: slimthing@mail.ru, hmelinin@misd.ru, akonurin@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Выполнено моделирование распространения плоской электромагнитной волны СВЧ диапазона в угольном пласте, включающем трещину гидроразрыва. Проведены расчеты коэффициента ее отражения от границы раздела сред “уголь – трещина с проппантом” с учетом вариации частоты зондирующего сигнала и электрофизических свойств материала, заполняющего трещину.

Трещина гидроразрыва, угольный пласт, плоская электромагнитная волна, коэффициент отражения, электромагнитные свойства, длина волны

**MATHEMATICAL MODELING OF PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE REFLECTION
FROM A HYDRAULIC FRACTURE IN A COAL SEAM**

E. V. Denisova, A. P. Khmelinin, and A. I. Konurin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: slimthing@mail.ru, hmelinin@misd.ru, akonurin@yandex.ru,
Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Propagation of a plane electromagnetic wave of the microwave range in a coal seam with hydraulic fracture is simulated. The coefficient of its reflection from the “coal-fracture with proppant” interface is calculated taking into account the variation of probing signal frequency and electromagnetic properties of the material filling the fracture.

Hydraulic fracture, coal seam, plane electromagnetic wave, homogeneous layer, coefficient of reflection, electromagnetic properties, wave length

Комбинация многоступенчатого гидроразрыва пласта с технологией горизонтально-направленного бурения стала основным фактором успешной разработки месторождений углеводородов. Сегодня эти методы используются более чем в 85 % пробуренных скважин. Однако несмотря на то, что технологии гидроразрыва давно признаны успешными, только недавно в горнодобывающей отрасли начали всерьез задумываться об эффективности существующих технических решений. Понимание того, как распределен проппант в ближнем и дальнем поле, является отправной точкой для определения участков пласта, не подверженных плотному контакту с ним. Неполное заполнение трещины проппантом приводит к снижению эффективности производства и конечного извлечения углеводородов. Например, даже незначительное (на 5 %) повышение точности оценки объема стимулированного пласта для гидроразрыва может способствовать увеличению чистой выручки примерно на 1 млрд долларов в течение всего срока эксплуатации крупного месторождения нефти.

Существующие наработки в области контроля пространственного положения и геометрических параметров трещин гидроразрыва в большинстве своем связаны с использованием низкочастотных электромагнитных методов исследований скважин, не позволяющих достичь высокой точности измерений из-за их низкой разрешающей способности по дальности, подвер-

женности шумовому воздействию, которое находится аналогично в низкочастотном диапазоне волн и имеет достаточно высокие амплитуды колебаний. Несмотря на то, что значительная часть экспериментальных исследований электромагнитных методов учитывает статистику уровня шума (геологического и шума окружающей среды), точность указанных методов при наилучших условиях может составлять 60 %.

Анализ результатов научных исследований по данному направлению показывает, что границы гидроразрыва пласта можно оценить с помощью высокочастотных электромагнитных методов, обеспечивающих новый подход к определению пространственного положения трещины гидроразрыва и ее геометрических параметров с течением времени. Достижение более высокой разрешающей способности электромагнитных методов и помехоустойчивости возможно за счет их реализации в сверхвысокочастотном диапазоне волн, что способно исключить влияние геологических шумов и шумов от самого процесса гидроразрыва.

В настоящее время метод гидроразрыва широко применяется на угольных предприятиях для интенсификации процесса дегазации угольных пластов. Однако оценка его эффективности осуществляется косвенно посредством математического моделирования с большими допущениями, поэтому проблема контроля процесса гидроразрыва является актуальной.

В связи с этим в рамках данной работы планируется теоретически обосновать возможность применения высокочастотных электромагнитных методов для решения задачи картирования трещин гидроразрыва угольном пласте. В основу таких подходов может быть положено применение проппанта с повышенной электропроводностью, что в совокупности обеспечит высокую точность в оценке местоположения, геометрии и ориентации трещин гидроразрыва угольного пласта. Зависимости между параметрами отражения электромагнитного поля, изученными до и после распределения проппанта, вариативными характеристиками исследуемых трещин (размеры, геометрия, ориентация, электропроводность) и вмещающих трещину геосред даст понимание того, как распределен проппант в трещине.

Цель работы — исследование зависимостей коэффициента отражения плоской высокочастотной электромагнитной волны, распространяющейся в угольном массиве, от волновой толщины слоя – трещины с учетом вариации электромагнитных свойств материала ее заполняющего, которое позволит выявлять нарушения сплошности угольного пласта электромагнитными методами, а также обосновывать выбор свойств проппанта для реализации технологии гидроразрыва.

Опыт применения электромагнитных методов при исследовании угольных шахт. Методы обнаружения трещин гидроразрыва и их ориентации получили развитие благодаря компании El Paso Natural Gas на месторождении Пайндейл в 1974 и 1975 гг. Важность определения ориентации трещин была продемонстрирована их исследовательской программой в области картирования трещин, а экономическая значимость описана в [1]. В начале 1978 г. Sandia Labs участвовала в масштабных экспериментах по картированию гидравлических трещин с помощью Amoco Corporation в районе Виттенбурга [1]. По обширным сейсмическим записям, сделанным на поверхности во время массивного гидроразрыва, оказалось невозможным установить ориентацию трещины из-за высокого уровня шума. Однако удалось доказать, что сейсмические сигналы могут быть зарегистрированы в стволе скважины, и эти принятые сигналы используются для картирования и построения планового вида трещины в окрестности ствола скважины. После указанных ранее экспериментов в 1976 г., когда поверхностные сейсмические сигналы не были обнаружены, компания Sandia Labs инициировала программу по разработке скважинной сейсмической системы регистрации.

В [2] применяли технологию микросейсмического (далее МС) мониторинга для исследования формы и пространственной ориентации трещин, вызванных скважинным гидроразрывом в угольном пласте. После операции гидроразрыва проанализировано изменение напряжений и влажности угольной массы на разных расстояниях от скважины. Количество МС-сигналов и

энергия МС-событий показали хорошую корреляцию с кривой давления воды. Основываясь на методе распознавания интерференционных сигналов (ISR) и улучшенном методе информационного критерия Akaike (AIC), была разработана комплексная программа обнаружения МС-событий и выбора времени прибытия сигнала, которая подходит для слабых МС-сигналов с низким соотношением сигнал/шум, индуцированных гидроразрывом в угольном пласте. Выполнен комплексный анализ взаимосвязи между временным и пространственным распределением МС-событий и распространением гидравлических трещин. Показано также, что существует явная корреляция между МС-сигналами и процессом гидроразрыва. Расширение гидравлических трещин порождает МС-события, и чем больше размер трещин, тем больше энергия этих событий. В результате МС-мониторинга установлено, что гидроразрыв создает сеть трещин в форме плоского эллипсоида в угольном пласте. Радиус влияния гидроразрыва на угольный пласт в зависимости от его влажности варьирует примерно от 20 до 40 м. Эффективная площадь гидроразрыва пласта является основным показателем для оценки его воздействия на массив.

Благодаря проведению переходных электромагнитных испытаний в работе [3] рассматривается диапазон влияния подземного гидроразрыва на угольный пласт, а также задача обнаружения участков обводненности и извлечения газа в зоне воздействия. Кроме того, исследован характер распределения удельного сопротивления угольного пласта в процессе гидроразрыва и определена водоносная площадь. Из полученных результатов испытаний следует, что обводненные участки, измеренные помехоустойчивым переходным электромагнитным прибором после разрыва пласта, обычно находятся в зоне более низкого удельного сопротивления. В соответствии с замерами кажущегося удельного сопротивления угольного пласта до и после гидроразрыва определяется эффективная площадь влияния гидроразрыва пласта и оценивается дальность его воздействия на массив в 35 м. Отмечено, что рост содержания воды в угольном пласте обратно пропорционален расстоянию от скважины гидроразрыва. Эффективная зона гидроразрыва пласта с приращением содержания воды до 0.2 % составила 38 м. После гидроразрыва пласта концентрация извлечения газа будет находиться в диапазоне 25.4–75.4 %, в среднем 70.22 %, что на 21.22 % выше, чем у исходного угольного массива. Чистый объем добычи газа после гидроразрыва пласта примерно в восемь раз превышает объем добычи газа до гидроразрыва. Гидроразрыв пласта, очевидно, может повысить эффективность извлечения метана угольных пластов в подземных угольных шахтах, но точно определить стимулируемую площадь затруднительно.

Для оценки стимулированной площади в работе [4] предложена методика МС-мониторинга с целью изучения сейсмических откликов индуцированных трещин гидроразрыва пласта. Для исследования предназначались три угольных пласта. Массив геофонов устанавливался вдоль подземной скважины, чтобы обнаружить МС-сигналы, вызванные гидроразрывом. Для проверки результатов МС-мониторинга измерялось содержание воды в каждом угольном пласте до и после гидроразрыва. Серия МС-событий была обнаружена в течение всего процесса гидроразрыва, а резкие МС-события с большей энергией чаще всего происходили в течение первого часа процесса гидроразрыва. Энергия резкого МС-события имела более высокую величину, чем другие. Распределение МС-сигналов проявляло сложные морфологические особенности. Ненаправленный МС-отклик действовал в радиусе менее 40 м. Гидроразрыв пласта может стимулировать к разрушению как сам угольный пласт, так и близлежащие слои горных пород. Достижимая стимулированная площадь в угольном пласте определена равной $50 \times 50 \text{ м}^2$ в зависимости от плотности МС-сигналов и содержания воды. В [4] показано, что метод МС-мониторинга потенциально может быть использован для оценки масштабов гидроразрыва в подземных угольных шахтах.

В работе [5] эксперимент гидроразрыва проведен на угольной шахте, расположенной в г. Ибинь провинции Сычуань. Электромагнитный метод переходных процессов применялся до и после гидроразрыва в сочетании с анализом результатов численного моделирования напряжен-

ности пласта посредством программного обеспечения FLAC3D для оценки масштабов влияния гидроразрыва. Результаты численного моделирования показали, что пластическая зона обычно распространяется по границе угольного пласта и кровли из-за наличия слоистости. В эксперименте использовался импульсный электромагнитный прибор UCS800. Основная цель заключалась в том, чтобы выяснить, каким образом раздроблен каменноугольный массив до и после гидроразрыва, нет ли там обширных трещин. Зона распределения воды также являлась серьезной проблемой, требующей решения. Точки измерения размещались рядом с верхней частью скважин. Важно было избегать по мере возможности использования на месте оборудования и устройств, влияющих на результаты обнаружения из-за повышенного уровня шума. Давление составляло 20 МПа и действовало 4 ч, прежде чем его сбросили в процессе гидроразрыва. В скважине на глубинах от 33 до 50 м было зафиксировано относительно высокое кажущееся сопротивление, свидетельствующее о том, что каменноугольная масса раздроблена и в этой области появились трещины гидроразрыва. Максимальное кажущееся сопротивление измерялось на отметках 35 и 41 м соответственно, это указывает на наличие зон трещинообразования. Кроме того, были установлены взаимосвязи между изменением сопротивления и содержанием воды в каменноугольной массе, которая значительно увеличивается после гидроразрыва.

Многие угольные шахты имеют значительные зоны обводнений вследствие наличия грунтовых вод. Соединение грунтовых вод с тоннелями может привести к тому, что образовавшееся наводнение разрушит угольный пласт. Из-за большой разницы диэлектрической проницаемости между водоносной и окружающей породой такие зоны могут быть определены с помощью высокочастотных методов георадиолокации. Примеры использования высокочастотных электромагнитных методов обнаружения зон обводнения в угольных шахтах представлены в [6–9]. Георадар обеспечивает хорошую точность при поиске зон обводнений, но дальность их применения может быть ограничена большим поглощением сигнала в угольных пластах, насыщенных водой. В [6] авторы предлагают сочетание сейсмического метода обнаружения с георадиолокационным.

Для оценки возможностей метода георадиолокации при картировании трещин гидроразрыва, заполненных пропантом, в качестве которого выбран песок с разной степенью влажности, предложена математическая модель трехслойной геосреды “угольный массив – трещина, заполненная влажным песком – угольный массив”.

Расчетная модель и методы исследования. Угольный массив обладает удельным электрическим сопротивлением $\rho = 10 - 10^4$ Ом·м и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3 - 5$. В качестве пропанта используется песок, насыщенный пресной водой с параметрами $\rho = 130 - 500$ Ом·м и $\varepsilon = 5 - 30$. Магнитная проницаемость таких сред равна 1. При расчетах параметров электромагнитных волн в СВЧ диапазоне в первом приближении фронт волны принят плоским.

В [10] утверждается что среда, представляющая собой неидеальный диэлектрик с параметрами ε и $\sigma = 1/\rho$, ведет себя по отношению к распространяющимся в ней радиоволнам частоты ω как диэлектрик с комплексным значением диэлектрической проницаемости. Это избавляет от необходимости проводить специальное исследование распространения радиоволн в такой среде. Все относящиеся к процессам распространения в среде типа неидеальный диэлектрик выводы могут быть получены из соответствующих зависимостей для идеального диэлектрика путем замены в них вещественной диэлектрической проницаемости на комплексное значение ε_k . В практических расчетах удобнее заменять относительную диэлектрическую проницаемость на относительную комплексную диэлектрическую проницаемость, определяемую формулой [10]

$$\varepsilon'_k = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_0} = \varepsilon' - i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} .$$

Рассчитаем параметры электромагнитных волн, распространяющихся в однородном угольном пласте и в однородном пропанте для широкого диапазона рабочих частот f от 500 МГц до 3 ГГц. Для случая, когда плотность токов смещения $j_{см}$ намного больше плотности тока прово-

димости $j_{\text{пр}}$, значения $j_{\text{см}}/j_{\text{пр}} \gg 1$. Это может иметь место либо в недостаточно проводящей среде (“хороший” диэлектрик), либо в относительно хорошем проводнике (например, морская вода), если в нем распространяются волны очень высокой частоты [11]. Формулы для расчета скорости распространения волн в среде v и коэффициента поглощения δ имеют вид [10]: $v \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$,

$\delta \approx \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\epsilon'}}$, где c — скорость света. Длина волны в среде $\lambda' \approx \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon'}}$, длина волны в вакууме $\lambda \approx \frac{c}{f}$.

Для оценки дальности распространения электромагнитных волн в заданных средах вычислим расстояние x , при котором $e^{-\delta x} = 10^6$, т. е. $x = 6 \ln 10 / \delta$, что соответствует уменьшению амплитуды волны при прохождении расстояния x в 1 млн раз. Результаты расчетов и исходные параметры исследуемых сред приведены в таблице.

Параметры распространения плоской электромагнитной волны в различных геосредах с учетом изменения частоты

Среда и ее параметры	f , МГц	$\left \frac{j_{\text{см}}}{j_{\text{пр}}} \right = \frac{\epsilon'}{60\lambda\sigma}$	δ , м ⁻¹	x , м	v , 10 ⁸ м/с	λ , м	λ' , м
Проппант – песок, насыщенный пресной водой: $\epsilon = 30$, $\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$ 1/Ом·м	500	16	1.72	8.03	0.55	0.6	0.109
	1000	33.3	1.72	8.03	0.55	0.3	0.054
	3000	100	1.72	8.03	0.55	0.1	0.018
Вмещающий слой – уголь каменный: $\epsilon = 3$, $\sigma = 0.125 \cdot 10^{-2}$ 1/Ом·м	500	66.6	0.136	101.6	1.73	0.6	0.34
	1000	136.6	0.136	101.6	1.73	0.3	0.17
	3000	428.8	0.136	101.6	1.73	0.1	0.06
Проппант – влажный песок: $\epsilon = 15$, $\sigma = 1 \cdot 10^{-2}$ 1/Ом·м	500	41.6	0.487	28.39	0.77	0.6	0.154
	1000	83.3	0.487	28.39	0.77	0.3	0.077
	3000	250	0.487	28.39	0.77	0.1	0.025

По результатам расчетов, представленным в таблице, можно сделать вывод о том, что все анализируемые среды относятся к диэлектрикам с комплексной диэлектрической проницаемостью. При этом ни коэффициент затухания, ни фазовая скорость распространения не зависят от частоты. Для всех сред поглощение будет существенным, но в песке с высокой влажностью оно более значительно, так как амплитуда поля уменьшается в 10^6 при прохождении пути 8.03 м. При в угольном пласте это расстояние возрастает до 101.6 м в связи с тем, что скорость распространения электромагнитной волны в нем более чем в три раза выше по сравнению с песком, насыщенном пресной водой.

Простейший случай распространения электромагнитной волны в слоистой среде показан на рис. 1, где волна нормально падает на ряд параллельных плоских слоев, каждый из которых однороден и обладает соответствующими параметрами — диэлектрической проницаемостью ϵ и электропроводностью σ . Далее будем рассматривать отражение плоских радиоволн от слоя, образованного плоскими границами трех однородных сред. На поверхности среды 3 с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_3 лежит слой, характеризуемый диэлектрической проницаемостью ϵ_2 и имеющий толщину h . Источник излучения находится на поверхности первой среды.

При анализе явлений отражений плоских электромагнитных волн задача нахождения коэффициентов отражения усложняется из-за возникновения внутри слоя сложного интерференционного волнового процесса, который обусловлен многократным переотражением на верхней и нижней границах слоя прошедшей через верхнюю границу волны. В результате таких много-

кратных 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 закона изменения характеристик падающей на слой волны, а также всех отраженных и прошедших волн в слое и вне его в результате интерференции создается стационарный единый волновой процесс с определенными амплитудными и фазовыми характеристиками, который количественно зависит от электромагнитных свойств сред и отношения длины электромагнитной волны, падающей на слой, к толщине слоя [12].

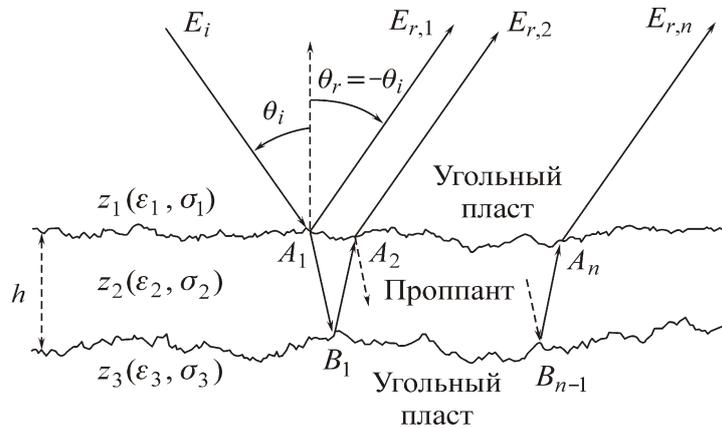


Рис. 1. Процессы отражения в многослойной среде

В [13, 14] выведен коэффициент отражения от плоского слоя, в который входят коэффициенты отражения на верхней V_{12} и нижней V_{23} границах слоя 2:

$$V = \frac{V_{12} + V_{23} e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} \operatorname{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} h}}{1 + V_{12} V_{23} e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} \operatorname{tg} \delta h} e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} h}},$$

где $V_{12} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$, $V_{23} = \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2}$; $\operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_2}{2\pi f \epsilon_2 \epsilon_0}$ — тангенс угла потерь, вычисляемый как соотношение действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости слоя ϵ_2 ; $\epsilon_0 = 2.8\pi \cdot 10^{-12}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м [12].

Рассмотрим изменения модуля коэффициента отражения от плоского слоя при вариации рабочей частоты, диэлектрической проницаемости и электропроводности слоя 2, в качестве которого используется проппант (влагонасыщенный песок). Полученные зависимости (рис. 2, 3) модуля коэффициента отражения имеют осциллирующий характер и представляют собой чередование максимумов и минимумов этих величин при некоторых периодических значениях h/λ_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 с ростом толщины слоя h наблюдается уменьшение амплитудных значений $|V_{\max}|$ и $|V_{\min}|$ осциллирующей функции. Это уменьшение обусловлено множителем $e^{-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} \operatorname{tg} \delta h}$. При увеличении толщины слоя h поле во второй среде — трещине, заполненной проппантом, будет затухать до 0 и коэффициент отражения от слоя станет равным коэффициенту отражения от его верхней границы. В случае, если $\epsilon_2 = \sqrt{\epsilon_1 \cdot \epsilon_3}$ и затухание в слое отсутствует, вся энергия слоя переходит в третью среду, что подтверждается результатами моделирования на рис. 2, где видно, что чем

больше контраст диэлектрических проницаемостей слоев, тем больше коэффициент отражения от верхней границы. Напротив, когда вмещающий массив и материал, заполняющий трещину гидроразрыва, имеют близкие значения диэлектрических проницаемостей, то коэффициент отражения от верхней границы резко уменьшается. В связи с этим, перспективным для повышения точности картирования трещин гидроразрыва угольного пласта будет применение проппанта с высокой диэлектрической проницаемостью.

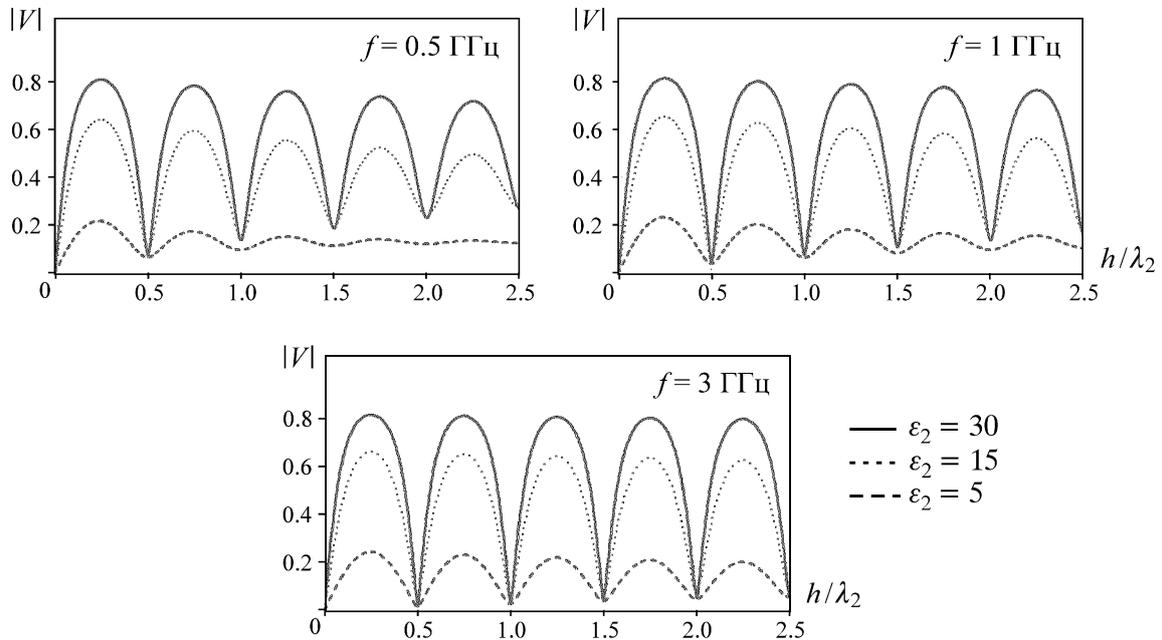


Рис. 2. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения при нормальном падении электромагнитной волны на трещину гидроразрыва, заполненную проппантом. Вмещающий массив — угольный пласт; проппант — песок, насыщенный пресной водой с разной диэлектрической проницаемостью, при неизменной электропроводности $\sigma_2 = 5 \cdot 10^{-10}$ 1/Ом·м

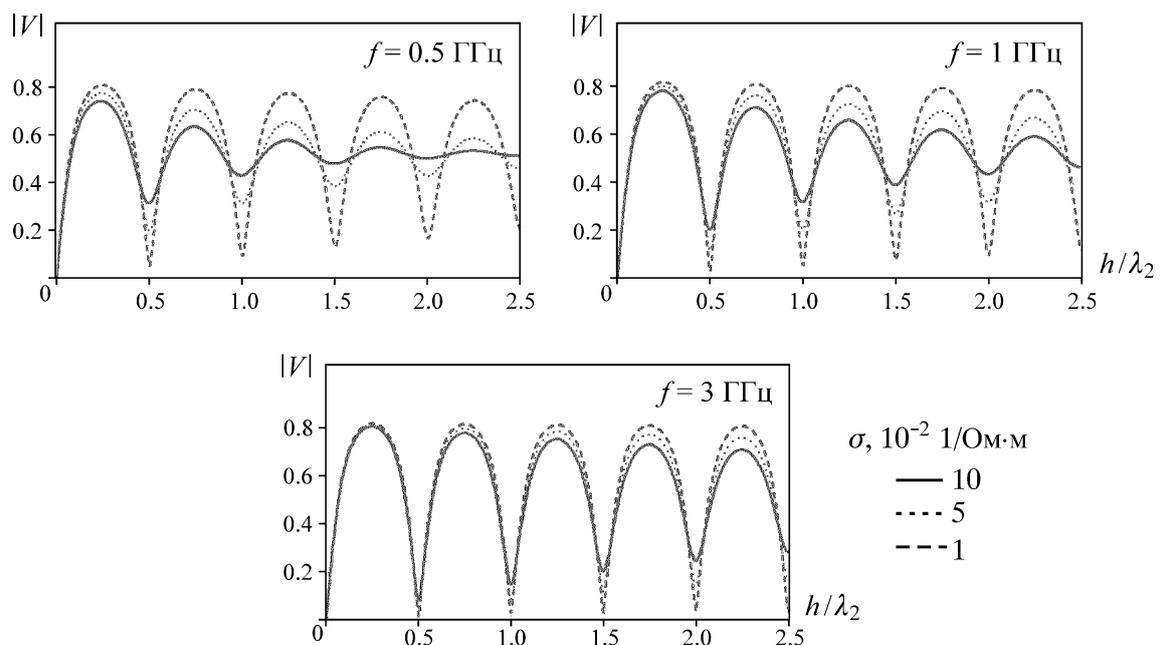


Рис. 3. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения при нормальном падении электромагнитной волны на трещину гидроразрыва, заполненную проппантом. Вмещающий массив — угольный пласт; проппант — песок, насыщенный пресной водой с разной электропроводностью, при неизменной диэлектрической проницаемости: $\epsilon_2 = 30$

Чем выше электропроводность проппанта (рис. 3), тем сильнее модуль коэффициента отражения зависит от частоты электромагнитной волны, которая определяет поглощение излучаемой энергии в слое. Для проппанта, электропроводность которого примерно равна электропроводности вмещающего массива — угольного пласта, и по своим свойствам эти среды приближаются к диэлектрикам, модуль коэффициента отражения для них практически не зависит от частоты электромагнитной волны. На более высоких частотах с ростом толщины слоя (при $h/\lambda_2 > 1$) поверхность трещины, заполненная проппантом, воспринимается как плоская граница раздела сред и энергия практически не проникает в трещину, а почти полностью отражается от верхней границы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение рабочей частоты электромагнитной системы картирования трещин и использование проппанта с повышенной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью могут существенно повысить точность обнаружения трещин гидроразрыва в угольных пластах.

ВЫВОДЫ

Математическое моделирование распространения плоской электромагнитной волны СВЧ-диапазона в угольном пласте, включающем трещину гидроразрыва, показало, что чем больше контраст диэлектрических проницаемостей слоев, тем больше коэффициент отражения от верхней границы. Напротив, когда вмещающий массив и материал, заполняющий трещину гидроразрыва, имеют близкие значения диэлектрических проницаемостей, то коэффициент отражения от верхней границы резко уменьшается. В связи с этим, перспективным для повышения точности картирования трещин гидроразрыва угольного пласта будет применение проппанта с высокой диэлектрической проницаемостью. Установлено, что повышение частоты и использование проводящего проппанта позволят повысить разрешающую способность электромагнитных методов картирования трещин гидроразрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Schuster Carl L.** Detection within the wellbore of seismic signals created by hydraulic fracturing, paper presented at the SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, October 1978, no. SPE-7448-MS.
2. **Li Nan, Fang Liulin, Sun Weichen, Zhang Xin, and Chen Dong.** Evaluation of borehole hydraulic fracturing in coal seam using the microseismic monitoring method, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(1), pp. 1–19.
3. **Wang Xiaoguang.** Evaluation of underground hydraulic fracturing using transient electromagnetic method, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 1–12.
4. **Jiang Zhizhong, Li Quanguai, Hu Qianting, Chen Jiufu, Li Xuelong, Wang Xiaoguang, and Xu Yangcheng.** Underground microseismic monitoring of a hydraulic fracturing operation for CBM reservoirs in a coal mine, *Energy Science & Engineering*, 2019, vol. 7.
5. **Zhang Dong-ming, Yang Han, Rao Zi, Ou Zhong-yu, and Tang Ping.** Research on application of transient electromagnetic method in hydraulic fracturing, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, vol. 38(1).
6. **Fan Cui, Zhi-Rong Zhao, Yun-Fei Du, Yu Bai, Chang-Qing Xu, Xiao-Feng Jia.** Correction of seismic attribute-based small-structure prediction errors using GPR data: A case study of the Shuguang Coal Mine, Shanxi, *Applied Geophysics*, 2020, 17, pp. 489–500.
7. **Ma Yongsheng, Shen Jinsong, Su Benyu, Ma Yanyan, and Sun Qilong.** Research on Ground of Penetrating Radar in the Coal Mine Detecting: A Case Study of Application in Huaibei Coal Mine, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2019, vol. 25, pp. 37–42.

8. **Chang Jianghao, Su Benyu, Malekian Reza, and Xing Xiuju.** Detection of water-filled mining goaf using mining transient electromagnetic method, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 2977–2984.
9. **Su Benyu, Malekian Reza, Yu Jingcun, Feng Xihui, Liu Zhixin.** Electrical anisotropic response of water conducted fractured zone in the mining goaf, 2016, pp. 6216–6224.
10. **Dolukhanov M. P.** Propagation of radiowaves, Moscow, Publishing House of Communications and Radio, 1960, 392 pp. (in Russian) [Долуханов М. П. Распространение радиоволн. — М.: Изд-во по вопросам связи и радио, 1960. — 392 с.]
11. **Mirolubov N. N.** Course of theoretical foundations of radio engineering (propagation and emission of electromagnetic energy), Moscow, Dzerzhinsky's Artillery Engineering Academy, 1957, 653 pp. (in Russian) [Миролюбов Н. Н. Курс теоретических основ радиотехники (распространение и излучение электромагнитной энергии). — М.: Артиллерийская инженерная академия им. Дзержинского, 1957. — 653 с.]
12. **Ruban A. D., Baukov Yu. N., and Shkuratnik V. L.** Mining geophysics. Electrometric methods of geological control, Part III. High-frequency electromagnetic methods, Teaching Aid, Moscow, Moscow State Mining University, 2002, 147 pp. (in Russian) [Рубан А. Д., Бауков Ю. Н., Шкурятник В. Л. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Ч. 3. Высокочастотные электромагнитные методы / Учеб. пособие. — М.: МГГУ, 2002. — 147 с.]
13. **Brekhovskikh L. M.** Waves in layered media, Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1957, 343 pp. (in Russian) [Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 343 с.]
14. **Zubkovich S. G.** Statistical characteristics of radio signals reflected from the Earth's surface, Moscow, Soviet radio, 1968, 224 pp. (in Russian) [Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Советское радио, 1968. — 224 с.]