

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЪЕМА ЗАКРЕПЛЕННОГО ПРОППАНТА

ELECTROMAGNETIC FRACTURING MONITORING EVALUATION FOR PROPPED RESERVOIR
VOLUME DETERMINATION

Г.С. Григорьев, М.В. Салищев, Д.Д. Попов

Научно-Технический Центр «Газпром нефть» (ООО «Газпромнефть НТЦ»)

П.Ю. Пушкарев

МГУ имени М.В. Ломоносова

Электронный адрес: Grigorev.GS@gazpromneft-ntc.ru

Ключевые слова: гидроразрыв пласта (ГРП), мониторинг ГРП, электроразведка

G.S. Grigoriev, M.V. Salishchev, D.D. Popov

Gazpromneft NTC LLC, RF, Saint-Petersburg

P.Yu. Pushkarev

Lomonosov Moscow State University

This article is aimed at the technological research in the field of non-seismic methods in oil and gas development. Proper hydraulic fracturing monitoring is one of the main unsolved issue: fracture geometry and propped reservoir volume determination. In this study forward electromagnetic modelling before and after fracking were done to assess its potential applicability in determining the geometry of a cracks.

Keywords: hydraulic fracturing, fracturing monitoring, electromagnetic methods

DOI: 10.24887/2587-7399-2018-4-39-43

ВВЕДЕНИЕ

При проведении гидроразрыва пласта (ГРП) одной из ключевых задач является определение положения и объема трещин, закрепленных проппантом. Основным инструментом мониторинга ГРП служит микросейсмика. Потенциально перспективен также электромагнитный (ЭМ) мониторинг, с помощью которого можно определять зоны, закрепленные проппантом. Под ЭМ мониторингом понимаются повторные низкочастотные (в квазистационарном приближении) исследования с источником в скважине и приемными линиями на земной поверхности. Данный метод основан на зависимости амплитуды компонент ЭМ поля от величины и структуры электропроводящего объема, созданного закачанным в пласт проппантом.

Целью работы является оценка принципиальной возможности ЭМ мониторинга ГРП баженновской свиты Западной Сибири путем решения прямой задачи.

Вследствие слабой интенсивности естественного ЭМ поля на уровне значительной интенсивности техногенных ЭМ помех предпочтительно использование ЭМ поля контролируемого источника [1]. При этом наиболее информативным является источник, заземленный с помощью скважины. Один электрод обычно располагается на устье скважины, другой – в исследуемом пласте (в создаваемом коллекторе).

Наилучший результат обеспечивают низкочастотные скважинно-наземные исследования [2, 3]. Исходя из опыта изучения осадочных бассейнов до глубин порядка первых километров эти частоты составляют приблизи-

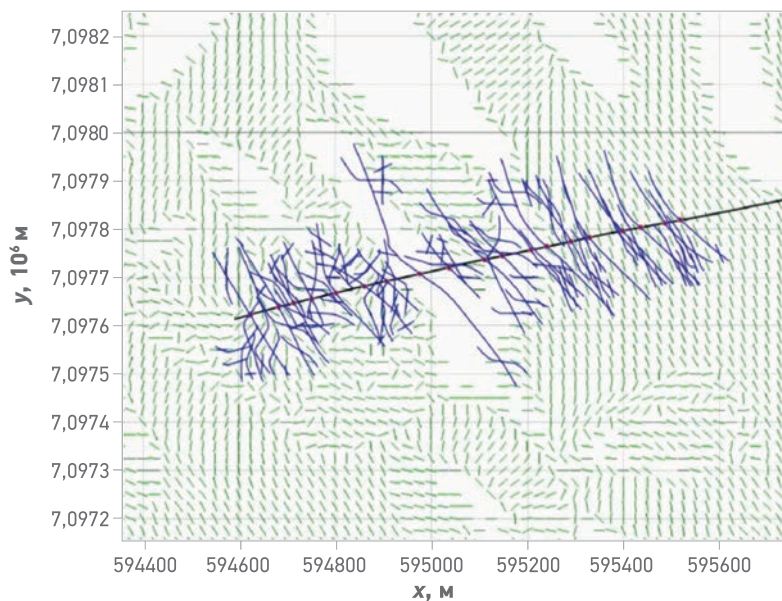


Рис. 1. Типичная модель распространения трещин на основе прямого расчета

тельно 100 – 0,1 Гц (периоды 0,01 – 10 с), на которых поле имеет квазистационарную структуру. Следует отметить, что измерения можно проводить как в частотной, так и во временной области, при этом соответствующий диапазон времен будет равен примерно 0,002 – 2 с (2 – 2000 мс).

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для оценки возможностей мониторинга была построена 3D геоэлектрическая модель, состоящая из фонового горизонтально-слоистого разреза и аномальной неоднородной электропроводящей зоны, отвечающей системе трещин, заполненных проппантом. В соответствии с возможностями используемой

программы 3D моделирования геоэлектрическая модель была в итоге представлена в виде совокупности однородных по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) изотропных блоков, каждый из которых представляет собой призму с гранями, параллельными координатным плоскостям xOy , xOz , yOz . Фоновый разрез был составлен на основе данных бокового каротажа.

Разрез включает весь осадочный чехол и заканчивается высокоомным (31 Ом·м) доюрским комплексом, залегающим на глубине 2467 м. В осадочном чехле выделяется 12 слоев, УЭС которых изменяются от 1,5 до 11 Ом·м. Большая суммарная продольная проводимость осадочного чехла (более 600 См) затрудняет выявление аномалий в его нижней части.

Для построения априорной модели искусственной трещиноватости, возникающей в баженовской свите в процессе ГРП, использовался симулятор ГРП (рис. 1).

Трещины насыщены проппантом с высокой электрической проводимостью от 1 000 См/м до 1 000 000 См/м. Поскольку раскрытость трещин составляет порядка 1 см и менее, а горизонтальный размер трещиноватой зоны – более 1 км при глубине залегания более 2 км, для моделирования нужно было преобразовать рассмотренную модель в эквивалентную, состоящую из достаточно крупных блоков. Для этого в диапазоне глубин 2318–2355 м в центральную часть модели добавлены блоки, УЭС которых были выбраны таким образом, чтобы давать усредненное значение в соответствующем объеме модели с трещинами.

Для определения УЭС каждого блока требовалось оценить, какую часть его объема занимают насыщенные проппантом трещины. УЭС блока определяли по упрощенной формуле Арчи – Дахнова как произведение параметра пористости на УЭС проппанта. На рис. 2 приведено распределение УЭС в слое при размере однородных блоков 6,25×6,25 м.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения прямой задачи использовалась программа В.Л. Друскина и Л.А. Книжнермана [1], позволяющая решать прямые трехмерные 3D ЭМ задачи в квазистационарном приближении в частотной и временной областях. В качестве возбудителей поля может использоваться плоская волна или совокупность электрических и магнитных диполей. Программа основана на методе конечных разностей. Область моделирования покрыва-

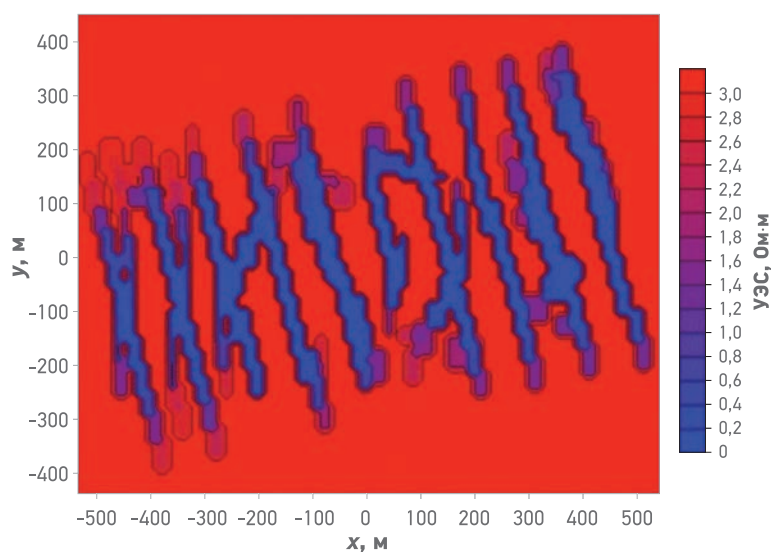


Рис. 2. Распределение УЭС рассматриваемого интервала при размере блока 6,25×6,25 м

ется прямоугольной сеткой, в узлах которой определяются компоненты поля. Сетка должна быть составлена так, чтобы расстояние между узлами было по возможности мало, а расстояние до границ области моделирования – велико (по сравнению с длиной волны). Модель среды в программе представляет собой совокупность прямоугольных параллелепипедов, погруженных в однородное полупространство. Поэтому каждый слой фонового разреза представлял собой параллелепипед с границами, удаленными до краев области моделирования. Трехмерные неоднородности соответственно представляли собой компактные параллелепипеды.

Питающая линия (АВ) была составлена из вертикальных электрических диполей, началась у земной поверхности и заканчивалась на глубине 2355 м. Для того, чтобы проследить распределение аномалии горизонтальной компоненты E_x от зоны ГРП на поверхности, требуется, чтобы скважина с питающей линией располагалась на относительно удалении от данной зоны. Это и было сделано при построении модели. Положение питающей линии важно учитывать, так как вблизи скважины электрическое поле от питающей линии оказывает сильное влияние на исследуемую среду, т.е. отследить появление аномалии вблизи скважины весьма проблематично.

Система наблюдения была представлена пятью профилями, расположенными параллельно друг другу. Шаг между точками наблюдения составлял 100 м. В каждой точке наблюдения находилось по два приемника горизонтальных электрических компонент поля (E_x и E_y) и по три приемника магнитных компонент (B_x , B_y и B_z).

Частоты, на которых рассчитывалось поле, находились в диапазоне от 0,06 до 62 Гц, при этом каждая последующая частота отличалась от предыдущей в 2 раза.

Решение в программе определяется итерационным способом. С ходом итераций программа анализирует поведение поля в контрольном приемнике. От выбора контрольного приемника во многом зависит точность получаемого результата. Обычно в качестве контрольного выбирается приемник с минимальным значением поля. В рассматриваемом случае был выбран приемник на максимальном расстоянии от источника.

Решение прямой задачи было получено для двух моделей: с однородным изучаемым слоем (3 Ом·м) и с неоднородной зоной в этом слое. Эти модели отвечают ситуациям соответственно до и после проведения ГРП. Далее расчеты повторялись для более проводящих аномалий, отвечаю-

щих пропантам с повышенной электрической проводимостью.

Результаты представлялись в виде графиков модулей компонент поля в зависимости от частоты и расстояния на отдельных частотах (графики профилирования). По этим графикам можно выделить благоприятные участки и частоты, на которых электропроводящая трещиноватая зона проявляется наиболее интенсивно, и величина соответствующей аномалии превышает 1 %, что позволяет выделить ее на практике.

На рис. 3 представлен график поля по профилю, пересекающему центральную часть зоны ГРП с электрической проводимостью пропанта, равной 10^5 См/м. На графике показано несколько распределений аномалии $|E_x|$ вдоль профиля в зависимости от частоты. Из рис. 3 видно, что наиболее высокоамплитудные аномалии от трещин ГРП прослеживаются при применении ЭМ волны на частотах 0,06 и 0,49 Гц. Преимущество использования более низкочастотных волн непосредственно связано с большей глубиной исследования, а также с низкими значениями УЭС изучаемой среды. Из-за низких значений УЭС высокочастотные ЭМ волны быстрее затухают и не способны показать более детальную картину на больших глубинах.

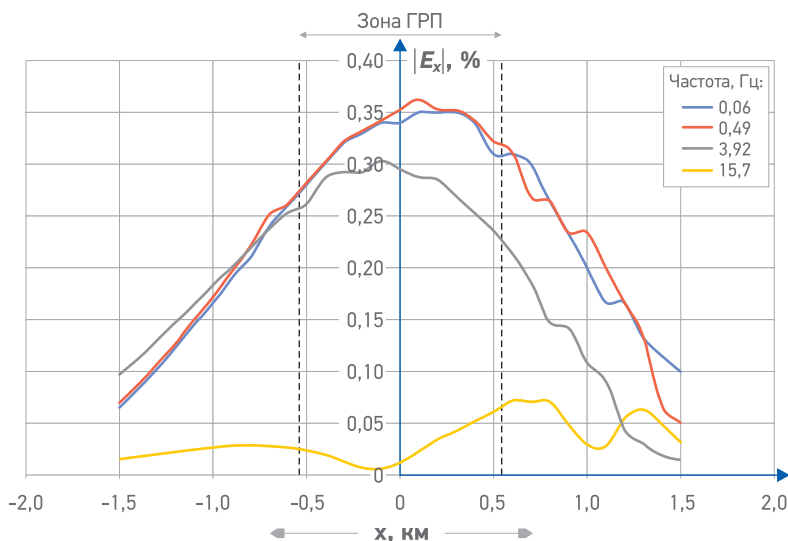


Рис. 3. Распределение аномалии $|E_x|$ в зависимости от частоты ЭМ волн

В ходе проведения моделирования была определена следующая закономерность: аномалия $|E_x|$ возрастает почти от 0 до 1 % и более с ростом электрической проводимости пропанта от 1 000 до 1 000 000 См/м (рис. 4). Следует также отметить, что амплитуда полученной аномалии горизонтальной компонен-

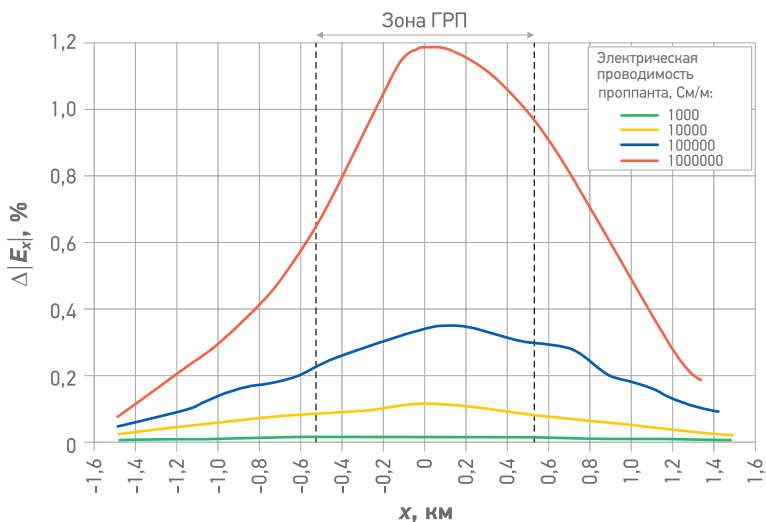


Рис. 4. 3D моделирование ЭМ мониторинга ГРП (АВ: $x = 1800$, $y = 100$, $z = 0 - 2355$ м): $|E_x|$ по профилю $x = -1500 - 1500$ (шаг 100 м); $y = 0$; $z = 0$ на частоте 0,49 Гц

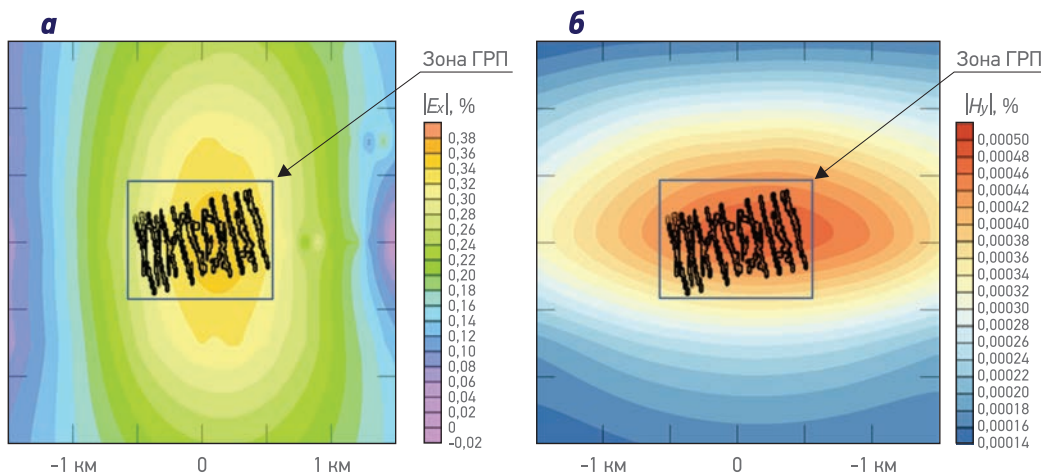


Рис. 5. Карты эффектов аномалий $|E_x|$ (а) и $|H_y|$ (б)

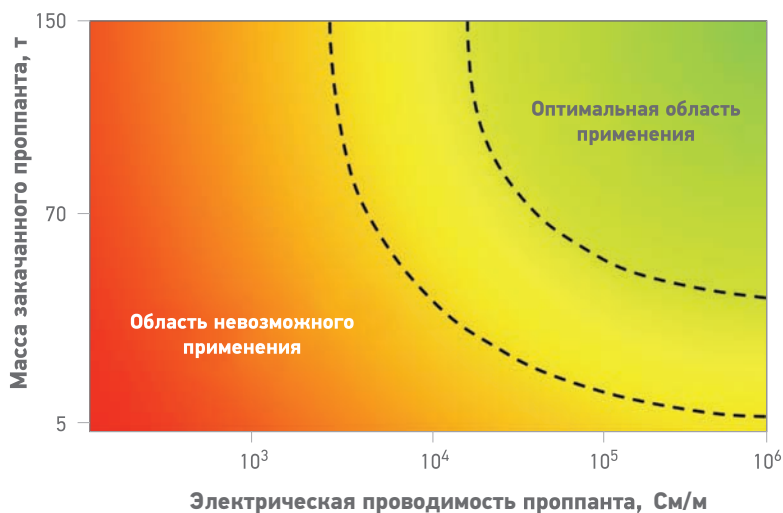


Рис. 6. Матрица применимости проппанта для ЭМ мониторинга ГРП

ты E_x достигает максимального значения в центральной зоне ГРП, но по мере перемещения к периферии данной зоны прослеживается падение значений аномалии, что, возможно, связано со снижением концентрации проппанта.

Немаловажным является эффект, полученный в магнитном поле. Прежде всего, поле вертикального электрического диполя (ВЭД) в горизонтально-слоистой среде (ГСС) имеет три компоненты: E_x , E_z и H_y (остальные три равны нулю). Более того, на земной поверхности E_z и H_y также равны нулю. Таким образом, магнитное поле ВЭД на поверхности ГСС отсутствует. Однако, если появляется проводящая неоднородность (насыщенная проппантом область), то возникает магнитное поле, позволяющее ее картировать (рис. 5).

Таким образом, магнитное поле в данной задаче является информативным. Можно также рассмотреть вертикальную компоненту H_z . Она отсутствует в ГСС (причем не только

на поверхности, но и внутри нее), но при наличии проводящих аномалий в H_z также должна наблюдаться соответствующая аномалия. Компоненту H_z на поверхности достаточно просто измерить, для этого используются петли.

Для определения приблизительного положения зоны ГРП в плане были построены карты эффектов аномалий (см. рис. 5). Из рис. 5 видно плановое распределение аномалий горизонтальных компонент ЭМ поля E_x и H_y .

Область с наибольшими значениями $|E_x|$ и $|H_y|$ находится в центральной части карты, в районе расположения зоны ГРП.

На основании полученных результатов была составлена матрица применимости проппанта, используемого для ГРП баженновской свиты, кровля пласта находится на глубине 2318 м, подошва – на глубине 2355 м, толщина составляет 37 м (рис. 6). Данная матрица дает информацию об оптимальных массе и электрической проводимости проппанта, используемого на каждой стадии закачки. Следует отметить, что при составлении матрицы требовалось учитывать положение зоны ГРП: ее глубину залегания, площадь распространения, толщину, объем трещин. Данные па-

раметры могут влиять на концентрацию проппанта и, как следствие, на величину ЭМ аномалии. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что увеличение концентрации проппанта в трещинах ГРП может компенсировать его низкую электрическую проводимость в относительно небольших интервалах и не помешать в ходе измерений зафиксировать аномалию. В данном случае при моделировании использовались масса проппанта, равная 70 т, что позволило при электрической проводимости проппанта, равной 10^5 См/м, зафиксировать наличие аномалии ЭМ поля. С учетом влияния промышленного шума ($\approx 0,3$ %) применение 70 т проппанта с электрической проводимостью ниже 10^5 См/м не позволит должным образом зафиксировать аномалию ЭМ поля от трещин ГРП. Нерешенной остается задача определения контура трещиноватой зоны и выявления внутри нее участков более и менее интенсивной трещиноватости, с наличием и отсутствием проппанта. Для ее решения необходимо выполнить больший объем моделирования с использованием более широкого модельного ряда, разных вариантов расположения источника и системы наблюдений, а также этапом решения обратной задачи с оценкой точности полученного решения. На основании этого с использованием различных трансформаций и способов визуализации сигнала можно попытаться выработать оптимальную методику ЭМ мониторинга ГРП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования была построена геоэлектрическая модель, проведено моделирование скважинно-наземных повторных наблюдений, показавшее значимое (более 1 %) влияние на измеряемое ЭМ поле электропроводящей трещиноватой зоны, образовавшейся при ГРП с применением высокопроводящего проппанта. Был также определен наиболее целесообразный диапазон частот ЭМ поля для мониторинга ГРП.

При моделировании важно было учитывать геометрические характеристики зоны ГРП, а при фиксации аномалии на поверхности – концентрацию проппанта и его электрическую проводимость. Эти параметры могут компенсировать друг друга в относительно небольших интервалах. Проведенное исследование подтверждает потенциальную возможность применения ЭМ мониторинга ГРП. При этом сила тока в контролируемом источнике должна составлять порядка 100 А, диапазон используемых частот – от 0,1 до 100 Гц, оптимальная электрическая проводимость и масса проппанта – соответственно 10^{5-6} См/м и 5–150 т на каждой стадии закачки.

Однако окончательное заключение о применимости метода можно сделать только после моделирования скважинных измерительных установок, решения обратной задачи на модельных данных и проведения моделирования с проппантом-изолятором.

Список литературы

1. Rees N., Heinson G., Conway D. Monitoring hydraulic stimulation using telluric sounding // *Earth, Planets and Space*. – 2018. – 70:7. – 12 p.
2. Hickey M.S., Trevino S., Everett M. Monitoring hydraulic fracturing fluid movement using ground-based electromagnetics, with applications to the Anadarko basin and the Delaware basin. Unconventional resources technology conference (URTeC) // SPE 178679-MS. – 2017.
3. Far-field proppant detection using electromagnetic methods: latest field results / T. Palisch, W. Al-Tailji, L. Bartel [et al.] // SPE 184880-MS. – 2017.
4. Друскин В.Л., Книжнерман Л.А. Спектральный дифференциально-разностный метод численного решения трехмерных нестационарных задач электроразведки // *Физика Земли*. – 1988. – № 8. – С. 63-74.

References

1. Rees N., Heinson G., Conway D., *Monitoring hydraulic stimulation using telluric sounding*, *Earth, Planets and Space*, 2018, 70:7, 12 p.
2. Hickey M.S., Trevino S., Everett M., *Monitoring hydraulic fracturing fluid movement using ground-based electromagnetics, with applications to the Anadarko basin and the Delaware basin*. *Unconventional resources technology conference (URTeC)*, SPE 178679-MS, 2017.
3. Palisch T., Al-Tailji W., Bartel L., Cannan C., Zhang J., Czapski M., Lynch K., *Far-field proppant detection using electromagnetic methods: latest field results*, SPE 184880-MS, 2017.
4. Druskin V.L., Knizhnerman L.A., *Spectral differential method of forward 3D modelling* (In Russ.), *Fizika Zemli*, 1988, no. 8, pp. 63-74.