УДК 550.837

О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта

Г.С.ГРИГОРЬЕВ¹, М.В.САЛИЩЕВ², Н.П.СЕНЧИНА³✉¹ ПАО «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Россия² Volga Gas plc., Москва, Россия³ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Григорьев Г.С. О применимости способа электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта / Г.С.Григорьев, М.В.Салищев, Н.П.Сенчина // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 492-500. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.2

Аннотация. Цель работы заключается в оценке возможностей электромагнитного мониторинга развития системы трещин, вызванных гидроразрывом пласта (ГРП), при определенном положении контролируемого источника. В качестве наиболее перспективной схемы мониторинга выбран вариант с расположением источника (вертикального электрического диполя) в интервале нефтеносного пласта и наблюдениями на земной поверхности. Построена эквивалентная системе трещин ГРП геоэлектрическая модель, которая была поделена на 11 зон, отвечающих стадиям ГРП. Для выбранной модели было проведено математическое моделирование путем решения прямой задачи с учетом влияния стальной обсадной колонны, наличие которой снизило эффект. Но несмотря на данный факт, сильного искажения аномалии электромагнитного поля над зоной ГРП не наблюдается. Анализ результатов моделирования на разных стадиях ГРП показал, что по мере появления новых трещин ГРП и заполнения их электропроводящим проппантом суммарный эффект возрастает. Данные об аномалии электрического поля показали максимальное отклонение от фонового значения более чем на 2 %. При достаточной электропроводности исследуемого объекта магнитное поле тоже становится информативным.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта; мониторинг; электроразведка; электромагнитное зондирование

Введение. Применяемый на месторождениях трудноизвлекаемой нефти ГРП – один из наиболее сложных видов работ в нефтегазовой отрасли. По всему миру ГРП является широко востребованной технологией для эксплуатации низкопроницаемых пластов-коллекторов [1, 8, 13]. Принцип действия ГРП заключается в том, что путем закачивания жидкости (проппанта) при высоком давлении происходит раскрытие естественных или образование искусственных трещин в продуктивном пласте в целях увеличения добычи трудноизвлекаемой нефти [23, 28, 29]. Методика ГРП известна с середины прошлого века, ее эффективность подтверждается результатами испытаний [17, 24, 36], лабораторным анализом параметров керна из зоны ГРП [9, 32, 33], геофизическими исследованиями скважин [30, 31, 35].

При проведении ГРП одной из ключевых задач является определение положения и объема трещин, закрепленных проппантом. Основным инструментом мониторинга ГРП служит микросейсмический мониторинг [8, 34, 36], суть которого заключается в регистрации сейсмических колебаний, вызванных образованием трещин ГРП. Данный метод определяет простирание, размеры и геометрию трещин ГРП на достаточно больших расстояниях от места наблюдения (в скважинах или на поверхности) [10, 25, 37].

Потенциально перспективен электромагнитный (ЭМ) мониторинг, с помощью которого можно определять зоны, закрепленные проппантом [15, 18, 19]. Вследствие слабых аномалий естественного ЭМ поля от зоны ГРП и значительной интенсивности техногенных ЭМ помех [6, 40] предпочтительно использование ЭМ поля контролируемого источника [16, 26, 38]. Соответственно, методика рассматриваемых электроразведочных работ близка к частотному зондированию или CSEM (controlled source electromagnetic method), показавшим высокую эффективность в глубинных исследованиях как на суше [4, 11, 14], так и на море [5, 12, 14].

Цель работы – определить эффективность применения определенной методики проведения ЭМ мониторинга ГРП путем решения прямой задачи для выбранных моделей сред.

Численное моделирование является широко применяемым подходом к априорной оценке параметров ГРП [27, 34]. Анализ материалов отечественных и зарубежных публикаций [21, 23] показывает, что наилучший результат обеспечивают низкочастотные скважинно-наземные исследования. Исходя из опыта изучения осадочных бассейнов до глубин порядка первых километров, частоты

ЭМ мониторинга необходимо выбрать в диапазоне 0,05-10 Гц. Преимущество использования более низкочастотных волн связано с большей глубиной исследования и низкими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) изучаемой среды. Сигнал с большей частотой в силу скин-эффекта может оказаться неинформативным [20, 22].

Таким образом, принято решение рассмотреть ЭМ мониторинг, основанный на повторных измерениях низкочастотного поля источника (вертикального электрического диполя), размещенного в скважине в интервале пласта-коллектора. Методика основана на регистрации амплитуд компонент ЭМ поля при разных размерах и строении электропроводящего объема, созданного закачаным в пласт проппантом.

Для достижения поставленной цели проведено математическое моделирование, результаты которого отражают применимость методики для мониторинга гидроразрыва пласта. Сопоставление результатов решения прямой задачи было получено для двух моделей: с однородным сопротивлением пласта и с наличием проводящего проппанта в данном слое, которые отвечают ситуациям до и после ГРП и позволяют оценить величину изменений, оказываемых процедурой гидроразрыва.

Анализ результатов включает в себя выявление зависимости амплитуды сигнала ЭМ поля от частоты, а также определение изменений в поведении аномалии ЭМ поля по мере появления новых стадий ГРП.

Методология. Возможности ПО MAXWELLF [3, 4], использованные при проведении математического моделирования аномалий ЭМ поля от трещин ГРП, описаны в предшествующих публикациях [2, 7]. В статье рассмотрены конкретные геоэлектрические модели с определенной системой наблюдения.

В данном исследовании для геоэлектрических моделей питающая линия, которая является контролируемым источником ЭМ поля, была представлена вертикальным электрическим диполем длиной в 100 м, расположенным в интервале глубин 2,0-2,1 км. Сила тока в контролируемом источнике составила 100 А. Система наблюдения была представлена 9 профилями на поверхности, расположенными параллельно друг другу. Длина каждого профиля – 3,2 км, расстояние между профилями – 325 м, а расстояние между точками наблюдений – 100 м. В каждой точке наблюдения находились по два приемника компонент электрического поля (E_x , E_y – горизонтальные составляющие напряженности электрического поля по осям x и y , В/м) и по три приемника магнитных компонент (H_x , H_y – горизонтальные составляющие напряженности магнитного поля по осям x и y , А/м; dB_z/dt – производная по времени от магнитной индукции, нТл/м).

После решения прямой задачи на выходе предоставляются данные вещественных и мнимых значений двух электрических (E_x и E_y) и трех магнитных (H_x , H_y и dB_z/dt) компонент для каждой точки наблюдения. При дальнейших расчетах сначала рассматривались две компоненты электрического поля – E_x и E_y , которые преобразовывались в единое значение горизонтальной составляющей напряженности электрического поля ($E_{гор}$ – комплексное значение, включающее в себя компоненты как E_x и E_y). Расчет $E_{гор}$ производился по формуле для линейно-поляризованного поля:

$$E_{гор} = (E_x^2 + E_y^2)^{0,5}.$$

Для него использовались данные с диапазоном частот 0,06-3,93 Гц. Таким же образом рассчитывалось горизонтальная составляющая индукции магнитного поля.

На первом этапе моделирования были получены данные электрического и магнитного полей до проведения ГРП, которые показывают влияние вмещающей среды на измеряемое ЭМ поле. На втором этапе – после проведения ГРП – вводится электропроводящий проппант. Расклинивающий агент с металлическим напылением, обладающий высокой электропроводностью, заполняет трещины ГРП и на фоне вмещающей среды создает резкий контраст в электропроводности, представляя систему трещин ГРП объектом, вызывающим аномалии электрических и магнитных полей. После введения электропроводящего проппанта выполняется второй сбор данных для получения аномального отклика ЭМ поля. Конечная визуализация полученных результатов после решения прямой задачи осуществляется в виде аномалий электрического и магнитного полей, которые рассчитывались по формулам:

$$A_E = (E_{ГРП} - E_{оп}) \cdot 100E_{оп};$$

$$A_M = (H_{ГРП} - H_{оп}),$$

Рис.1. Модель среды, используемая в ходе моделирования

где A_E – аномалия электрического поля, %; $E_{ГРП}$ – электрическое поле после проведения гидроразрыва, В/м; $E_{ОП}$ – электрическое поле до проведения гидроразрыва, В/м; A_M – аномалия магнитного поля, нТл; $H_{ГРП}$ – магнитное поле после проведения гидроразрыва, нТл; $H_{ОП}$ – магнитное поле до проведения гидроразрыва, нТл.

Построение геоэлектрической модели. Для оценки возможностей мониторинга была построена трехмерная геоэлектрическая модель сложной геометрии, состоящая из однородного полупространства и аномальной неоднородной электропроводящей зоны, отвечающей системе трещин, заполненных проппантом (рис. 1). В соответствии с возможностями используемой программы 3D-моделирования, геоэлектрическая модель была представлена в виде совокупности однородных по УЭС изотропных блоков, каждый из которых представляет собой призму с гранями, параллельными координатным плоскостями xOy , xOz , yOz .

Система трещин ГРП представлена блоком

(1000×1200×100 м), который помещен в однородную среду на глубину 2000 м.

В ходе моделирования рассматривалось низкочастотное ЭМ поле (квазистационарная область), что позволило пренебречь токами смещения. С точки зрения ЭМ исследований с применением квазистационарных полей было важно, чтобы значение УЭС вмещающей среды было небольшим, так как токи проводимости не способны проходить высокоомные объекты. Таким образом, УЭС вмещающей среды будет составлять 20 Ом·м как наиболее оптимальное значение.

Для построения априорной модели искусственной трещиноватости, возникающей в пласте в процессе его гидроразрыва, использовался симулятор ГРП.

Трещины насыщены проппантом с высокой электрической проводимостью – 1000 См/м. Поскольку раскрытость трещин составляет 1 см и менее, а горизонтальный размер трещиноватой зоны – более 1 км при глубине залегания свыше 2 км, для моделирования нужно преобразовать рассмотренную модель в эквивалентную, состоящую из достаточно крупных блоков. Для этого в диапазоне глубин 2,0-2,1 км 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. Просуммировав объемы всех попавших в блок частей трещин, был получен объем части блока, насыщенной проппантом. Таким образом, через отношение суммарного объема, занимаемого в блоке трещинами, и объема самого блока, вычисляется коэффициент пористости.

УЭС блока определяли по упрощенной формуле Арчи – Дахнова, как произведение параметра пористости на УЭС проппанта. Используя подход, рассмотренный в классических работах основоположников электромагнитных методов (Ваньяна Л.Л., 1997 г.), возьмем модель, в которой кубические зерна разделены сплошными проводящими пленками, и получим параметр пористости $P = 1,5/K_p$. Таким образом, получаем нужное нам выражение:

$$\rho = 1,5\rho_p/K_p,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление блока, Ом·м; ρ_p – удельное электрическое сопротивление проппанта ($\rho_p = 0,001$), Ом·м; K_p – коэффициент пористости.

В ходе моделирования учитывалось влияние вертикальной обсадной колонны, реальные значения электропроводности которой достигают 10^6 См/м, а диаметр приблизительно равен 150 мм.

Такие параметры в ходе расчета ПО MAXWELLF не могло учесть, поэтому требовалось снизить электропроводность обсадки до допустимого значения, позволяющего данной программе рассчитать поведение ЭМ поля. Для этого была рассчитана эффективная электропроводность:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_{\text{к}}K + \sigma_{\text{вм.с}}(1 - K),$$

где $\sigma_{\text{эф}}$ – эффективная электропроводность обсадной колонны, используемая в моделировании; $\sigma_{\text{к}}$ – настоящая электропроводность обсадной колонны, См/м; $\sigma_{\text{вм.с}}$ – электропроводность вмещающей среды, См/м; K – коэффициент, определенный как отношение объема обсадной колонны к объему всего блока.

Используя данную формулу при расчете эффективной электропроводности обсадной колонны, было получено значение – 997 См/м (предельное значение электропроводности блока в ПО MAXWELLF – 1000 См/м), а ее диаметр составил 3,2 м.

Обсуждение. Результатом проведения ЭМ мониторинга ГРП являются графики и карты аномального эффекта электрического и магнитного полей относительно фонового уровня.

Сначала требовалось оценить зависимость амплитуд аномалий электрического и магнитного полей от частоты. Полученные в ходе моделирования данные дают информацию об амплитуде поля для каждой частоты. Таким образом, был построен график, по которому можно выделить наиболее благоприятный и полезный сигнал с оптимальной частотой, позволяющий зафиксировать положительный эффект, превышающий уровень шума, от электропроводящей трещиноватой зоны.

Анализ влияния частоты сигнала на амплитуду аномалии электрического поля показал, что наибольшую амплитуду в рамках линейно-поляризованного поля вызывает сигнал с частотой 3,93 Гц (рис.2, а). Диаметрально противоположная ситуация наблюдается с магнитным полем: наибольшей амплитудой обладает сигнал с минимальной частотой – 0,06 Гц (рис.2, б). Таким образом, сигналы были использованы для дальнейшего составления карт и графиков аномалий данных полей. Конечные результаты моделирования мониторинга отображаются как постепенное наращивание амплитуды сигнала ЭМ поля за счет накопления его энергии с течением времени.

Анализ аномалии электрического поля на разных стадиях ГРП (1-11 стадия) (рис.3, а) показал, что по мере появления новых трещин ГРП и заполнения их электропроводящим проппантом, суммарный эффект от трещин возрастает. Следует отметить, что трещины, образовавшиеся на первой стадии ГРП, не дали «положительного эффекта», т.е. аномалия не достигла положительного значения. Можно предположить, что отсутствие положительной аномалии вызвано недостаточной концентрацией проводящего проппанта в трещинах первой стадии. Начиная со второй стадии, амплитуда аномалии приобретает положительные значения. Так как на графике (рис.3, а) показан суммарный эффект от трещин ГРП, увеличивающийся по мере формирования новых трещин, то вклад от каждой стадии можно оценить по приращению амплитуды аномалии после их

Рис.2. Графики зависимостей амплитуд аномалий электрического (а) и магнитного (б) полей от частоты

Рис.3. Изменение амплитуд аномалий электрического (а) и магнитного (б) полей по мере появления новых стадий ГРП (частота сигнала – 3,93 и 0,06 Гц соответственно)

проведения. Можно сделать вывод, что максимальный вклад в аномалию внесли 2-5 стадии. Этот факт можно интерпретировать как наибольшее содержание проппанта в трещинах данных стадий. После пятой каждая последующая стадия вносила меньший эффект, чем предыдущая. Наименьший вклад в аномалию внесли 10 и 11 стадии.

Данные по магнитному полю частично коррелируют с данными об электрическом поле. Следует отметить, что на первых четырех стадиях магнитное поле не предоставило качественной информации, лишь с пятой стадии данные о магнитном поле стали пригодны для их интерпретации. Согласно рис.3, б, можно сделать вывод, что пятая и шестая стадии внесли наибольший вклад в увеличение амплитуды магнитной аномалии, но по мере появления новых стадий вклад в изменение данной аномалии становился все меньше. Как и в электрическом поле, наименьший эффект оказали последние стадии ГРП.

Чтобы показать поведение аномалии ЭМ поля в зависимости от геометрии системы электропроводящих трещин были построены карты (рис.4 и 5).

Несмотря на то, что наличие стальной обсадной колонны в электроразведочных методах может сильно исказить полученный в ходе измерений сигнал [39], результаты моделирования показали положительный суммарный эффект – 2,23 % (рис.3, а и 4) от электропроводящих трещин ГРП. Анализируя данные карты, можно увидеть, что по мере появления новых стадий (образования трещин ГРП) амплитуда аномалии растет, при этом ее максимум сосредотачивается над зонами с наибольшей электропроводностью.

Аналогичная ситуация наблюдается с аномалией магнитного поля, вызванного вертикальным источником, которое при отсутствии структур с повышенной электропроводностью на поверхности не будет проявляться. Однако если появится проводящая неоднородность (трещины ГРП, заполненные проппантом), то должно возникнуть магнитное поле, позволяющее определить данную неоднородность и зафиксировать ее на поверхности. Начиная с пятой стадии ГРП, содержание электропроводящего проппанта в трещинах стало достаточным, чтобы магнитное поле стало информативным (рис.3, б и 5).

Основная проблема регистрируемого магнитного поля заключается в его слабой интенсивности. Наличие вблизи полигона источников высокоамплитудных помех не позволит извлечь полезный сигнал. Следовательно, необходимо учитывать данный фактор при измерении магнитного поля от трещин гидроразрыва и не проводить измерения в непосредственной близости от источников интенсивных техногенных помех.

Таким образом, методика измерений позволила зафиксировать высокоамплитудную аномалию электрического поля непосредственно над зоной ГРП. Магнитное поле может тоже считаться информативным при достаточной электропроводности исследуемого объекта. Наличие стальной

Рис.4. Карты изменения аномалии электрического поля по мере появления новых стадий ГРП (частота сигнала – 3,93 Гц)

Рис.5. Карты изменения аномалии магнитного поля по мере появления новых стадий ГРП (частота сигнала – 0,06 Гц)

обсадной колонны снизило эффект, так как часть энергии ЭДС была направлена на возбуждение токов в самой колонне. Но несмотря на данный факт, сильного искажения аномалии ЭМ поля над зоной ГРП не наблюдается.

Закключение. Основным отличием данного исследования от предыдущих, описанных в публикациях [2, 7], является поочередное тестирование стадий ГРП, которое показало определенные закономерности в поведении аномалий электрического и магнитного полей. Были определены стадии, которые оказали наибольшее и наименьшее влияние на суммарный эффект от проводящей трещиноватой зоны. В ходе моделирования учитывалось влияние вертикальной обсадной колонны, которое не оказало негативного эффекта на полученный сигнал. Такие результаты дают возможность произвести решение обратной задачи по реальным данным, которые будут получены в ходе проведения полевых испытаний.

Таким образом, применение системы электромагнитного зондирования с контролируемым источником, заземленным в интервале пласта-коллектора, и площадными наземными измерениями, может дать положительные результаты при мониторинге ГРП (при условии использования высокопроводящего проппанта). Оптимальный диапазон используемых частот в рамках линейно-поляризованного поля – от 0,1 до 10 Гц, так как сигнал с большей частотой в силу скин-эффекта может оказаться неинформативным. В данном исследовании были выбраны сигналы с частотами 3,93 и 0,06 Гц.

Главной задачей является проведение полевых испытаний ЭМ мониторинга в целях тестирования реальных данных и сопоставления их с результатами математического моделирования. Кроме того, следует рассмотреть влияние на поведение аномалии ЭМ поля горизонтальной обсадной колонны, размещенной в пласте-коллекторе. Учет влияния горизонтальной обсадной колонны на результаты полевых измерений позволит определить наиболее оптимальную методику решения обратной задачи и корректно интерпретировать данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов / С.И.Кудряшов, С.И.Бачин, И.С.Афанасьев и др. // Нефтяное хозяйство. 2006. № 7. С. 80-83.
2. Григорьев Г.С. Возможности электромагнитного мониторинга ГРП для оценки стимулированного объема пород / Г.С.Григорьев, М.В.Салищев, П.Ю.Пушкарев // Геофизика. 2018. № 4. С. 90-93.
3. Друскин В.Л. Очерк основных исследований Отдела математического моделирования ЦГЭ за 1981-2006 гг. / В.Л.Друскин, Л.А.Книжнерман // Геофизика. 2007. № 4. С. 61-65.
4. Жамалетдинов А.А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируемыми источниками (опыт критического анализа). СПб: СОЛО, 2012. 163 с.
5. Ингеров О.И. Современные тенденции в развитии аппаратного комплекса для электроразведочных работ на суше и на море // Материалы пятой Всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011, 16-21 мая, 2011, Санкт-Петербург, Россия. СПб: СПбГУ, 2011. Кн. 1. С. 86-103.
6. Могилатов В.С. Малоизученные феномены в электроразведке // Записки Горного института. 2017. Т. 222. С. 783-788. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.783
7. Оценка применимости электромагнитного мониторинга гидроразрыва пласта при определении объема закрепленного проппанта / Г.С.Григорьев, М.В.Салищев, Д.Д.Попов, П.Ю.Пушкарев // ПРОнефть. Профессионально о нефти. 2018. № 4 (10). С. 39-43. DOI: 10.24887/2587-7399-2018-4-39-43
8. Совершенствование методического подхода к планированию мероприятий по гидроразрыву пласта на нефтяных месторождениях / И.В.Буренина, Л.А.Авдеева, И.А.Соловьева и др. // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 344-353. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.344
9. Шакурова Ал.Ф. Моделирование гидравлического разрыва пласта / Ал.Ф.Шакурова, Ай.Ф.Шакурова // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 33-47.
10. Шмаков Ф.Д. Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга ГРП // Технологии сейсморазведки. 2012. № 3. С. 65-72.
11. A land controlled-source electromagnetic experiment using a deep vertical electric dipole: experimental settings, processing, and first data interpretation / E.Vilamajo, B.Rondeleaux, P.Queralt et al. // Geophysical Prospecting. 2015. Vol. 63. Iss. 6. P. 1527-1540. DOI: 10.1111/1365-2478.12331
12. Analysis of relationship of DNME polarization parameters with reservoir properties / S.J.Garina, S.A.Ivanov, E.O.Kudryavceva et al. // 78th EAGE Conference and Exhibition 2016: Efficient use of Technology – Unlocking Potential, 30 May-2 June, 2016, Vienna, Austria. European Association of Geoscientists & Engineers, 2016. Vol. 2016. P. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201601088
13. Benson Lamidi A-L. Semi-analytical assessment of condensate banking effects in fracture design and optimisation of gas-condensate reservoirs // Innovations in Geosciences – Time for Breakthrough, 9-12 April, 2018, St. Petersburg, Russian Federation. European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. Vol. 2018. P. 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800142
14. Borehole controlled-source electromagnetics for hydrocarbon-saturation monitoring in the bockstedt oil field, onshorenorthwest Germany / K.Tietze, O.Ritter, C.Patzner et al. // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2018. Vol. 21. Iss. 2. P. 364-372. DOI: 10.2118/183165-PA
15. Constable S. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration // Geophysics. 2010. Vol. 75. Iss. 5. P. 75A67-75A81. DOI: 10.1190/1.3483451
16. Continuous TDEM for monitoring shale hydraulic fracturing / Yan Liang-Jun, Chen Xiao-Xiong, Hao Tang et al. // Applied Geophysics. 2018. Vol. 15. Iss. 1. P. 26-34. DOI: 10.1007/s11770-018-0661-1
17. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks / D.G.Roy, T.N.Singh, J.Kodikara, M.Talukdar // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. P. 1941-1946. DOI: 10.1007/s00603-017-1196-0
18. Cross-borehole geoelectrical time-lapse monitoring of in situ chemical oxidation and permeability estimation through induced polarization / T.Bording, A.K.Kühl, G.Fiandaca et al. // Near Surface Geophysics. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 43-58. DOI: 10.1002/nsg.12131
19. Cuevas N. Surface-borehole electromagnetic method – a review on the technology development and potential for geothermal applications // EAGE/BVG/FKPE Joint Workshop on Borehole Geophysics and Geothermal Energy, 22 November, 2019, Munich, Germany. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019. P. 1-2. DOI: 10.3997/2214-4609.201903164
20. Far-field proppant detection using electromagnetic methods: Latest field results / T.Palisch, W.Al-Tailji, L.Bartel et al. // SPE Production & Operations. 2018. Vol. 33. Iss. 3. P. 557-568. DOI: 10.2118/184880-MS
21. Heagy L.J. Modeling electromagnetics on cylindrical meshes with applications to steel-cased wells / L.J.Heagy, D.W.Oldenburger // Computers and Geosciences. 2019. Vol. 125. P. 115-130. DOI: 10.1016/j.cageo.2018.11.010
22. Hickey M.S. Monitoring and imaging the dynamics and extent of hydraulic fracturing fluid movement using ground-based electromagnetics, with application to the eagle ford shale / M.S.Hickey, S.Treviño, M.E.Everett // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 20-22 July, 2015, San Antonio, Texas, USA. OnePetro, 2015. № URTEC-2172634-MS. DOI: 10.15530/URTEC-2015-2172634
23. Investigation of the factors influencing the flowback ratio in shale gas reservoirs: A study based on experimental observations and numerical simulations / Lin Hun, Zhou Xiang, Chen Yulong et al. // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2021. Vol. 143. Iss. 11. № 113201. DOI: 10.1115/1.4049605
24. Kopeikin R.R. The algorithm for calculating a multi-stage hydraulic fracturing for a horizontal well / R.R.Kopeikin, A.M.Shagiakhmetov // Horizontal Wells 2019: Challenges and Opportunities, 27-31 May, 2019, Kaliningrad, Russian Federation. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019. P. 1-6. DOI: 10.3997/2214-4609.201901878
25. Monitoring horizontal well hydraulic stimulations and geomechanical deformation processes in the unconventional shales of the midland basin using fiber-based time-lapse VSPs, microseismic, and strain data / R.Hull, R.Meek, H.Bello et al. // The Leading Edge. 2019. Vol. 38. Iss. 2. P. 130-137. DOI: 10.1190/tle38020130.1
26. New methods of controlled-source electromagnetic detection in China / Qingyun Di, Guoqiang Xue, Changchun Yin, Xiu Li // Science China Earth Sciences. 2020. Vol. 63. P. 1268-1277. DOI: 10.1007/s11430-019-9583-9

27. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, Yuan Jing Qiang // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 64. P. 20-31. DOI: [10.1016/j.compgeo.2014.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.011)
28. Numerical simulation of complex fracture geometry caused by hydrodynamics in shale with pre-existing weak planes / Yongquan Hua, Qiang Wangab, Jinzhou Zhao et al. // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 199. № 108306. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.108306](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108306)
29. Prediction of the settling velocity of the rod-shaped proppant in vertical fracture using artificial neural network / Zhaopeng Zhua, Xianzhi Songa, Gensheng Li // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 200. № 108158. DOI: [10.1016/j.petrol.2020.108158](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108158)
30. Rational gas inflow restriction technologies during the development of oil rims / N.A.Rovnik, V.A.Lushpeev, D.S.Tananykhin, I.V.Shpurov // *Topical Issues of Rational use of Natural Resources*. CRC Press, 2019. P. 888-900. DOI: [10.1201/9781003014638-54](https://doi.org/10.1201/9781003014638-54)
31. Rationale for selection of an oil field optimal development system in the eastern part of the Pechora sea and its calculation / V.S.Sabukevich, D.G.Podoprigha, A.M.Shagiakhmetov // *Periodico Tche Quimica*. 2020. Vol. 17. Iss. 34. P. 634-655.
32. Раупов И. Laboratory researches of the polymeric composition in the pore space of bulk models / I.Raupov, D.Podoprigha // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 3. P. 365-371.
33. Раупов И.Р. Research of polymer compositions rheological properties for oil production / I.R.Raupov, G.Y.Korobov // *Acta Technica*. 2018. Vol. 63. № 3. P. 493-500.
34. Response of cracking processes in variations of geophysical fields / A.Rybin, E.Bataleva, K.Nepeina et al. // *Journal of Applied Geophysics*. 2020. Vol. 181. № 104144. DOI: [10.1016/j.jappgeo.2020.104144](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144)
35. Shadrin A.V. The methodology for working out the techniques for geophysical monitoring of the process of directional hydraulic fracturing of a hard roof and the process of local hydrotreating of a coal seam face working space, its implementation within the framework of RSF project / A.V.Shadrin, V.I.Klishin // *International Scientific Conference «Knowledge-based technologies in development and utilization of mineral resources»* 5-8 June, 2018, Novokuznetsk, Russian Federation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. Vol. 206. DOI: [10.1088/1755-1315/206/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/206/1/012022)
36. Shagiakhmetov A. The development of a water proofing polymeric composition based on carboxymethylcellulose for carbonate reservoirs / A.Shagiakhmetov, D.Tananykhin // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 2. P. 273-276.
37. Thiel S. Electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing: Relationship to permeability, seismicity, and stress // *Surveys in Geophysics*. 2017. Vol. 38. P. 1133-1169. DOI: [10.1007/s10712-017-9426-2](https://doi.org/10.1007/s10712-017-9426-2)
38. Treviño-Reséndez J.D.J. Electrochemical technologies for treating petroleum industry wastewater / J.D.J.Treviño-Reséndez, A.Medel, Y.Meas // *Current Opinion in Electrochemistry*. 2021. Vol. 27. № 100690. DOI: [10.1016/j.coelec.2021.100690](https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100690)
39. Um E.S. 3D borehole-to-surface and surface electromagnetic modeling and inversion in the presence of steel infrastructure / E.S.Um, Jihoon Kim, M.Wilt // *Geophysics*. 2020. Vol. 85. Iss. 5. P. E139-E152. DOI: [10.1190/geo2019-0034.1](https://doi.org/10.1190/geo2019-0034.1)
40. Vertical electrical sounding (VES) for estimation of hydraulic parameters in the porous aquifer / A. de Almeida, D.F.Maciél, K.F.Sousa et al. // *Water*. 2021. Vol. 13. Iss. 2. № 170. DOI: [10.3390/w13020170](https://doi.org/10.3390/w13020170)

Авторы: Г.С.Григорьев, руководитель направления, Grigorev.GS@gazprom-neft.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7394-7973> (ПАО «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Россия), М.В.Салищев, ведущий геофизик, pgk@volgagas.com, <https://orcid.org/0000-0002-5527-4688> (Volga Gas plc., Москва, Россия), Н.П.Сенчина, канд. геол.-минерал. наук, доцент, senchina_np@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-648X> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.05.2020.

Статья принята к публикации 27.07.2021.