

Методика системного анализа сигналов сейсмо-электрического эффекта при поиске углеводородов

■ Шайдуров Г.Я., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Приводятся системные формулы для оценки сигналов и помех при постановке сейсмо-электрического метода поиска углеводородов, включающие все основные параметры задачи и позволяющие прогнозировать ожидаемые результаты.

Корректность методики проверялась экспериментальным путем по данным постановки этой технологии на хорошо разведанной Быстринской площади Минусинского газоконденсатного месторождения (республика Хакасия) в 2017 году.

Дается оценка необходимости использования «бинарной» технологии с дополнительной подсветкой электрическим полем от вспомогательного источника.

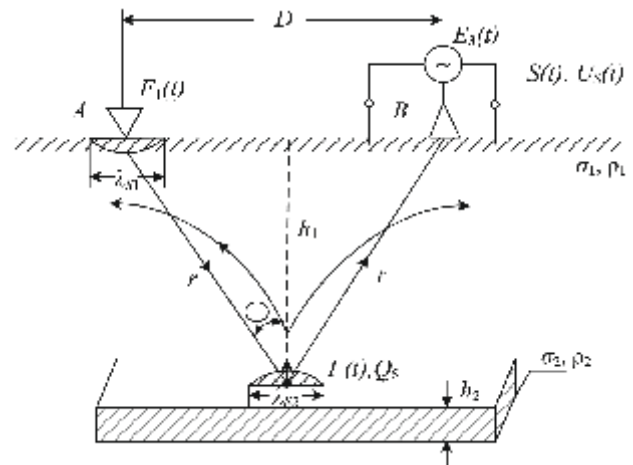
Сегодня во всем мире наблюдается большой интерес геофизиков к сейсмо-электрическому методу прямых поисков углеводородов, позволяющему, как это показано в [1], на морских работах до четырех раз увеличить эффективность бурения разведочных скважин.

Начиная с работ Иванова, Френкеля (СССР), Биота (США) [2, 3, 4], разными авторами производились теоретические исследования СЭ эффекта в пористых горных породах, основанные на решении дифференциальных уравнений, описывающих физические явления, происходящие в таких средах. Установлено, что акустическое воздействие на пористую породу вызывает существенные и длительные изменения ее электропроводности [5].

Однако пользователям и разработчикам аппаратного комплекса СЭ метода, как правило инженерам, требуется наглядная для физического понимания методика расчетов необходимой мощности сейсмических воздействий на продуктивный пласт, оптимальная рабочая частота и метод кодирования излучения, оценка статистических параметров обнаружения.

На рис. 1 представлена расчетная схема проведения работ.

На этой схеме продуктивный газовый пласт, площадью $L_1 \times L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ с элек-



▲ Рис. 1. Схема реализации полуактивного сейсмо-электрического метода.

тропроводностью $\sigma_2 = 10^{-5}$ сим/м, удельным весом газовой среды $\rho_2 = 100 \text{ кг/м}^3$, находится на глубине $h = 1500 \text{ м}$.

Импульсный невзрывной источник электромагнитного типа, соответствующий по параметрам известной системе «Енисей КЭМ-4», с силой ударного импульса $F = 10^5 \text{ кг}$, установлен на профиле в точке А, а сейсмоприемник и приемный электрический диполь в точке В с разносом между ними $D = 1000 \text{ м}$.

Электропроводность вмещающей горной породы и пласта для расчета приняты как $\sigma_1 = 10^{-3}$ сим/м, $\sigma_2 = 10^{-5}$ сим/м, плотность этих сред соответственно $\rho_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 100 \text{ кг/м}^3$, а скорость распространения сейсмических волн $V_1 = 4000 \text{ м/с}$; $V_2 = 500 \text{ м/с}$.

Указанные параметры специально выбраны для сопоставления с данными



▲ Рис. 2. Геологическая карта Быстринской площади.

опытных работ на Быстринской площади Минусинского газоконденсатного месторождения (республика Хакасия) проведены под руководством автора [6].

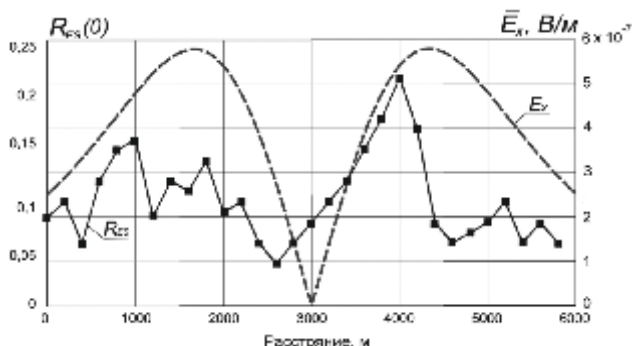
На рис. 2 представлена геологическая карта этой площади с обозначением изолиний одинаковой глубины с площадью аномальной зоны $L_1 \times L_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Газосодержащий пласт по данным бурения находится на глубинах 1500–1800 м.

На рис. 3 показаны результаты профилирования и расчеты электрического поля СЭ эффекта.

При этом экспериментальная кривая профилирования построена в виде коэффициента взаимной корреляции (КВК) электрического $E(t)$ и сейсмического $S(t)$ сигналов:

$$R_{ES}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) S(t - \tau) dt \quad (1)$$

▼ Рис. 3. Экспериментальная и расчетная профильные характеристики.



Где: $T=6$ мин – время наблюдения усредненных сигналов.

По виду профильных характеристик, двугорбый их характер с минимумом в центре аномалии указывает на то, что такого рода профильные кривые электрического поля могут быть получены от вертикального электрического диполя находящегося в центре продуктивного пласта.

Таким образом, излагаемая ниже методика расчета основана на оценке напряженности вторичного электрического поля вертикального электрического диполя на поверхности земли в точке установки приемного диполя В.

Длительность импульса источника «Енисей КЭМ-4» равнялась 5 мс, а период повторения 10 с.

Смещение поверхности пласта Z под действием сейсмического удара $F_2(t)$ запишем в виде дифференциального уравнения:

$$m \frac{\delta^2 Z}{\delta t^2} + \frac{P_0 \delta Z}{V_2 \delta t} - F_2(t) = 0 \quad (2)$$

Где: P_0 – сила сопротивления среды; $m = \frac{1}{2} V_2 \cdot \tau \cdot \rho_2 S_1$ – масса смещаемой среды; V_2 – скорость смещения среды; ρ_2 – плотность среды; τ – длительность сейсмического импульса; $S_1 = \lambda_s^2$ – площадь первой зоны Френеля.

Решение этого уравнения дает:

$$Z = \frac{F_2(t) \tau^2}{m \left(1 + \frac{P_0}{m V_2} \right)} \quad (3)$$

Для газосодержащей среды можно не учитывать силу сопротивления среды P_0 и в этом случае:

$$Z = \frac{F_2(t) \tau^2}{m} = \frac{2 F_2(t) \tau}{S_1 \cdot V_2 \cdot \rho_2} \quad (4)$$

Где $S_1 \approx \lambda_{s2}^2 = \left(\frac{V_2}{f_s} \right)^2$ – площадь первой

зоны Френеля на поверхности пласта; λ_{s2} – кажущаяся длина волны (КДВ) [7];
 $f_s = \frac{1}{2\tau}$ – средняя частота в спектре импульса.

Выражая силу удара через давление на пласт $F_2(t) = P_2(t) \cdot S_1$, из (4) получим окончательное уравнение для оценки Z , считая, что газовая среда смещается на глубину прохождения импульса $\Delta h_2 = V_2 \tau$

$$Z = \frac{P_2(t) \tau}{V_2 \rho_2} \quad (5)$$

При проектировании работ на нефть необходимо в (4) учесть силу сопротивления P_0 , которую целесообразно определить измерением на керне взятом из скважины пробуренной в районе поисков.

Давление волны на пласт в дальней зоне источника определим через соотношение [7]:

$$P_2(t) = \frac{4F_1 \eta}{\pi R_u^2} \cdot \frac{\lambda_{s1}}{r} e^{-\alpha r} \cos \theta \quad (6)$$

Где: η – КПД источника; R_u – радиус опорной плиты излучателя;

$\lambda_{s1} = \frac{V_0}{f_s}$ – размер первой зоны Френеля на поверхности земли; V_0 – скорость продольной волны у поверхности; $f_s = \frac{1}{2\tau}$ – средняя рабочая частота ударного импульса; – коэффициент поглощения сейсмической волны в горной породе.

Коэффициент 4 в (6) учитывает число излучателей в источнике. Так в «Енисей КЭМ-4» таких излучателей четыре, с силой удара каждого $F_1 = 25 \cdot 10^3$ кг.

Подстановка в (6) следующих частных значений параметров: $F_1 = 25 \cdot 10^3$ кг кг; $\eta = 0.7$; $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с; $R_u = 0.7$ м; $V_0 = 2000$ м/с; $f_s = 100$ Гц; $\lambda_{s1} = 20$ м; $r = 1600$ м; $\alpha = 10^{-4}$ 1/м;

$\cos \theta = \frac{h_1}{r} = \frac{10^3}{1.6 \cdot 10^3}$, дает амплитуду давления $P_2 = 1600$ кг/м².

Такое давление вызывает в элементе пласта с площадью $S_1 = 1 \text{ м}^2$, ток с амплитудой:

$$I_1 = E_0 S_1 \sigma_2 \cdot Z \quad (7)$$

Здесь учитываются только ток проводимости, поскольку на низких частотах < 100 Гц токи смещения практически не играют роли.

С учетом всей площади пласта с чис-

лом элементов, $n = \frac{L_1 L_2}{\lambda_s^2}$ – суммарный ток эквивалентного электрического диполя, размещенным в центре пласта.

$$I_\Sigma = 2E_0 \sigma_2 \cdot L_1 L_2 \frac{P_2 \tau}{V_2 \cdot \rho_2} \quad (8)$$

Общий электрический заряд пласта:

$$Q_E = I_\Sigma \cdot \tau \quad (9)$$

Плотность тока, вызванного этим зарядом в районе точки наблюдения:

$$j_x = \frac{I_\Sigma}{4\pi h_1^2} e^{-\beta h} \sin \theta \quad (10)$$

Где: $\beta = \sqrt{\pi f_s \mu_0 \sigma_1}$ – коэффициент поглощения электрического поля.

Напряженность электрического поля в точке наблюдения:

$$E_x = \frac{j_x}{\sigma_1} \quad (11)$$

Откуда получим системную формулу для оценки напряженности вторичного электрического поля сейсмо-электрического эффекта:

$$E_{xp} = \frac{E_0 \sigma_2 L_1 L_2}{4\pi h_1^2 \sigma_1} \cdot \frac{P_2 \tau}{V_2 \rho_2} e^{-\beta h} \sin \theta \quad (12)$$

Подстановки частных значений всех параметров $\sigma_2/\sigma_1 = 10^{-2}$; $h_1 = 1500$ м; $E_0 = 120$ м; $P_2 = 1600$ кг/м²; $L_1 \cdot L_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ м²; $V_2 = 500$

м/с; $\rho_2=100$ кг/м³; $e^{-\beta h}=0.7$; $\sin\vartheta=0.33$, $Z=1.6 \cdot 10^{-4}$ м, дает $E_{xp}=4.6$ мкВ/м.

Коэффициент поглощения переменного электрического поля в горной породе $\beta=3 \cdot 10^{-4}$ 1/м, оценивается на средней частоте $f_E=10$ Гц фильтра нижних частот установленного на входе приемника для защиты от промышленных помех в диапазоне 0.1–20 Гц.

В экспериментах на указанной выше Минусинском газоконденсатном месторождении с похожими параметрами системы, наблюдались величины $E_3=1 \div 2$ мкВ/м, что с учетом взятых приближений параметров, позволяет считать описанную методику достаточно корректной.

Например, если взять $\sigma_2=10^{-6}$ сим/м, то $E_x=0.4$ мкВ/м.

Давление сейсмического удара в точке установки сейсмоприемника:

$$P_{3Z} = P_2 \cdot \frac{\lambda_{s2}}{r} \cdot e^{-\alpha r} \cos \theta = 34 \text{ кг/м}^2 = 340 \text{ па} \quad (13)$$

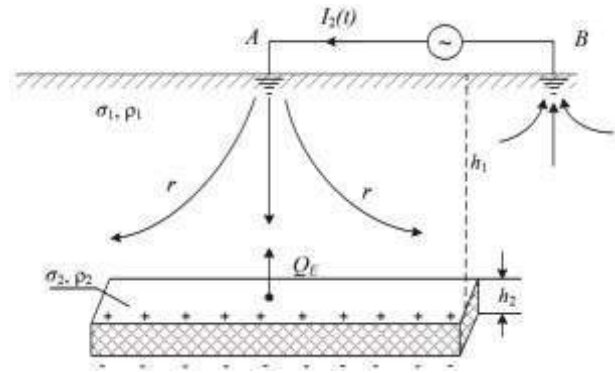
При известной марке сейсмоприемника и параметров, используя (13), можно определить напряжение на его выходе.

В целях понимания необходимости дополнительной «подсветки» георазреза электрическим полем, то есть реализации «бинарной» технологии СЭ метода [1], сопоставим величины электрических зарядов продуктивного пласта, создаваемых сейсмическим ударом Q_s и внешним полем длинного заземленного кабеля проложенного на поверхности Земли с током I_k (рис. 4).

Согласно (7), плотность электрического заряда пласта от сейсмического удара при:

$$Q_s = I_1 \tau = 9.6 \cdot 10^{-10} \text{ кул/м}^2 \quad (14)$$

Заряд от кабеля с током образуется лишь под точкой его заземления и



▲ Рис. 4. Схема электрической «подсветки» полем заземленного кабеля.

составляет при токе $I_k=1$ а на величину:

$$Q_E = \frac{I_k \tau}{4\pi h^2} e^{-\beta h} = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ кул/м}^2 \quad (15)$$

Таким образом «бинарная» технология дает выигрыш в величине сигнала при токе порядка $I_k=10$ а и ее можно использовать на суше. Однако, в отличие от морских работ, подсветка георазреза электрическим импульсом на суше вызовет в районе приемника непредсказуемый уровень дополнительных помех за счет неоднородности кажущегося сопротивления вдоль профиля исследования и сигналов становления электрического поля на слоистой структуре георазреза. Поэтому увеличение мощности источника тока в кабеле вряд ли приведет к увеличению отношения сигнал/помеха на входе приемника.

К тому же, необходимость прокладки питающего кабеля в сложной горнотектонической местности, доставка источников и установка заземлений, приводит к удорожанию стоимости работ.

Опыт постановки СЭ метода не указанном выше газовом месторождении, показал реальную возможность проведения на суше работ методом СЭ без дополнительной подсветки электрическим полем.

Представляет интерес сопоставить данные профилирования на Быстринской площади пассивным методом, с

извлечением информации путем наблюдения параметра коэффициента взаимно-корреляционного $R_{ES}(0)$, электрических $E(t)$ и сейсмических $S(t)$ шумов земли в диапазоне частот 0.1–20 Гц [6] и полуактивным, с использованием сейсмоисточника «Енисей КЭМ-4».

В пассивном варианте электрические сигналы принимались на заземленный диполь длиной 100–200 м, а сейсмические – сейсмоприемником GS-20DX.

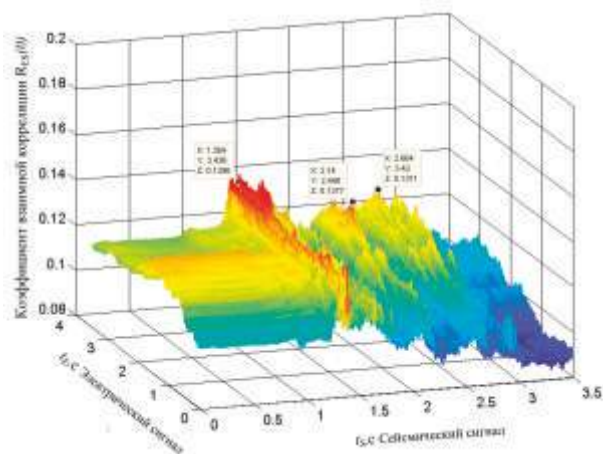
При этом напряженность электрического поля шумов составляла 1–2 мкВ/м и была сопоставимой с электрическим полем теллурических токов в нормальной зоне.

В этом случае выделить информацию сейсмо-электрического эффекта газового пласта удалось за счет накопления во времени (до 6 мин) и высокой корреляции сейсмического удара на пласт с создаваемым этим ударом электрическим зарядом.

В полуактивном варианте наблюдалась напряженность электрического поля СЭ эффекта сопоставимая с пассивным методом, что позволяет оценить давление на пласт сейсмических шумов и получить представление об источнике их происхождения.

На рис. 5 показана трехмерная картина, связывающая по времени сейсмические и электрические сигналы СЭ эффекта в аномальной точке указанного выше газоконденсатного месторождения. На этом рисунке гребни отклика соответствуют отражению от границ пластовой залежи газа.

Электрическое поле, представленное в виде КВК $R_{ES}(0)$, после каждого удара сейсмоисточника, продолжает существовать длительное время. Как видно из рис. 5, это время превышало 5 с, что указывало на медленный разряд пласта через окружающую горную породу.



▲ Рис. 5. Трехмерная картина записи КВК $R_{ES}(0)$ в аномальной точке (Быстрянская площадь республика Хакасия).

Возможен эффект накопления электрического заряда в пласте по мере повторения ударов сейсмоисточника.

Системная формула (12) дает возможность, при известных параметрах σ_1 , σ_2 , V_1 , V_2 , полученных на керне, и размеров аномалии $L_1 \cdot L_2$, оценить мощность пласта и запасы месторождения.

Этот эксперимент проводился в 2017 г.

В качестве источника сейсмических ударов использовалась станция «Енисей КЭМ-4», а прием и обработка отраженных сигналов производилась сейсмостанцией.

По записям 40 точек наблюдения вдоль профиля с разносом 20 м был построен георазрез, на котором четко выделялись слои месторождения.

Заключение

Изложена методика расчетных оценок наблюдаемых сигналов сейсмо-электрического эффекта проверена опытными работами на хорошо разведанном, в том числе бурением, газоконденсатном месторождении. Ее можно рекомендовать для проектирования поисковых работ на углеводороды.

«Бинарная» технология с дополнительной «подсветкой» электрическим полем успешно использовалась на море

[1]. На суше эта технология осложняет и удорожает работы, снижает разрешающую способность СЭ метода и вряд ли найдет практическое применение в горно-таежной местности.

Взаимно-корреляционный алгоритм обработки сигналов сейсмо-электрического эффекта является оптимальным при работе в шумах.

Выбранный диапазон рабочих частот для приема сигналов электрического поля 0.1÷20 Гц обеспечивает помехозащиту от промышленных помех.

Работа выполнена поддержкой Гранта РФФИ № 20-07-00267.

Литература

1. Мельников В.П., Лисов В.И., Брюховецкий О.С., Бобровников Л.З. Инновационная геофизика: бинарные технологии прямых поисков месторождений полезных ископаемых. ч. 1 // Инженер-нефтяник. М.: ООО «Ай Ди Эс Дриллинг», 2011, № 1, с. 47—51.

2. Иванов А.Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР. 1939. № 1. С.

3. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмо-электрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. - Сер. Географ. и геофизика, 1944, № 4, с. 133—150.

4. Biot M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. J., Acoust. Soc. Am. 28, 1956.

5. Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. и др. Основы сейсмoeлектроразведки. М.: Недра, 1995. 268 с.

6. Шайдуров Г.Я., Кудинов Д.С., Потылицын В.С., Романова Г.Н. О наблюдении сейсмо-электрического эффекта на газоконденсатном месторождении в естественных электромагнитных и сейсмических шумах Земли в диапазоне 0,1

– 20Гц. Геология и геофизика. 2018. т. 59. № 5. С.703—708.

7. Гуревич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка, М.: Недра, 1980, 541 с.

Подробнее об авторе



Шайдуров
Георгий Яковлевич,

доктор технических наук,
Заслуженный деятель
науки и техники РФ,
профессор Сибирского
федерального университета
(СФУ).

Окончил в 1957 году радиотехнический факультет Томского политехнического института (ТПИ), до 1987 года работал в промышленности Красноярск. С 1987 по 2007 гг. – заведующий кафедрой радиосистем Красноярского государственного технического университета.

С 2007 года – профессор Военно-инженерного института Сибирского федерального университета.

Автор и соавтор шести монографий, 80 патентов на изобретение, более 300 научных публикаций, в том числе монографий «Импульсные электромагнитные системы поиска», Красноярск, КГТУ, 1999 г., 350 с., «Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе», Красноярск, СФУ, 2016 г., 270 с.

Кандидатская диссертация 1968 год, ТПИ. Докторская диссертация 1986 года, институт «Гидроприбор», г. Ленинград.