Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" http://mathmod.esrae.ru/
URL статьи: mathmod.esrae.ru/30-113
Ссылка для цитирования этой статьи:
Московский И.Г., Головин Б.А. Некоторые примеры оценки чувствительности упругих и электромагнитных полей к изменению пористости осадочных горных пород // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2020. №2

УДК 550.837 DOI: 10.24411/2541-9269-2020-10204

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УПРУГИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ К ИЗМЕНЕНИЮ ПОРИСТОСТИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Московский И.Г.[1,2], Головин Б.А.[2]
[1]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов, mosig@mail.ru
[2] Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия, Саратов, bagolovin@yandex.ru

SOME EXAMPLES OF ESTIMATING THE SENSITIVITY OF ELASTIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS TO CHANGE IN POROSITY OF SEDIMENTARY ROCKS

Moskowsky I.G.[1,2], Golovin B.A.[2]
[1]Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov, mosig@mail.ru
[2] N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Russia, Saratov, bagolovin@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты оценки чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к малым изменениям пористости горной породы, выполненные по методике, основанной на вычислении локальных и средних коэффициентов эластичности. Значения параметров горных пород, используемые в расчетах, соответствуют породам-коллекторам нефтяных месторождений. Наибольшую чувствительность к изменению пористости горной породы показывают скорости электромагнитных волн и волн давления поровой жидкости.

Ключевые слова: чувствительность геофизических полей, коэффициент эластичности, скорость упругой волны, скорость волны порового давления, скорость электромагнитной волны.

Abstract. The article presents the results of assessing the sensitivity of the velocities of elastic and electromagnetic waves to small changes in the porosity of the rock, performed according to the method based on the calculation of local and average coefficients of elasticity. The values of the rock parameters used in the calculations correspond to the reservoir rocks of the oil fields. The highest sensitivity to changes in rock porosity is shown by the velocities of electromagnetic waves and pore fluid pressure waves.

Keywords: sensitivity of geophysical fields, coefficient of elasticity, elastic wave velocity, pore pressure wave velocity, electromagnetic wave velocity.

Введение

Выявление геологических аномалий по измеряемым в скважинах или на дневной поверхности геофизическим полям сопряжено с необходимостью выбора метода исследования, включающего в себя тип измеряемого геофизического поля и его характеристики [1-4]. В работе [1] рассмотрен подход к выбору метода исследования геологических объектов, основанный на количественной оценке чувствительности характеристик геофизических полей при малых изменениях значений параметров геологического разреза с помощью расчета и ранжирования локальных и средних коэффициентов эластичности. В качестве примера в [1] рассмотрена задача об оценке чувствительности характеристик магнитотеллурического поля в модели горизонтально-слоистой среды при малых изменениях электропроводности одного слоя. Указанная методика позволяет проводить сравнение чувствительности характеристик полей различной физической природы. В связи с этим в качестве примера проведен численный эксперимент по оценке чувствительности упругих и электромагнитных полей при изменении пористости горной породы. Контроль за изменением пористости в породах важен, в частности, для выявления аномальной высоких (или низких) пластовых давлений при бурении нефтегазовых скважин [5].

Оценка чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к малым изменениям пористости горных пород

Будем далее полагать, что в пористой горной породе возбуждаются упругие или электромагнитные колебания и осуществляется регистрация скоростей распространения этих колебаний в данной среде. Рассмотрим задачу о сравнении чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к изменению пористости горной породы.

В случае упругих колебаний в пористой насыщенной породе могут регистрироваться: продольная волна (P-волна), поперечная волна (S-волна) и волна давления поровой жидкости (пластовая вода или буровой раствор в зоне проникновения). Продольная и поперечная упругие волны распространяются со скоростями v_P и v_S, соответственно. Скорости упругих волн определяются из равенств:

$$v_P = \sqrt{\frac{K + (4/3)\mu}{\rho}} \quad \text{и} \quad v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \tag{1}$$

где ρ, K и μ – плотность, модуль всестороннего сжатия и модуль сдвига горной породы, соответственно.

Для пористой горной породы, поры которой заполнены флюидом (поровой жидкостью) параметры ρ, K и μ можно определить по формулам для эффективных параметров пористой флюидонасыщенной среды Гассмана [6]:

$$\rho = k_n \rho^f + (1-k_n)\rho^s, \tag{2}$$

$$K = K^s \frac{k_n K^s \overline{K} - (1+k_n) K^f \overline{K} + K^f K^s}{k_n (K^s)^2 + (1-k_n) K^f K^s - K^f \overline{K}}, \tag{3}$$

$$\mu = \overline{\mu}, \tag{4}$$

где ρ, K и μ – эффективные плотность, модули всестороннего сжатия и сдвига, соответственно; ρ^s, K^s – плотность и модуль всестороннего сжатия материала твердой матрицы; ρ^f, K^f – плотность и модуль всестороннего сжатия флюида; k_n – коэффициент пористости породы; $\overline{K}$, $\overline{\mu}$ – модули всестороннего сжатия и сдвига скелета породы (т.е. сухой горной породы, поры которой заполнены, например, газом). Величина модуля всестороннего сжатия скелета породы $\overline{K}$ определяется значениями модуля K^s твердой матрицы и величиной пористости k_n породы. В расчетах часто используется следующая эмпирическая связь модуля $\overline{K}$ с параметрами K^s и k_n [6]:

$$\overline{K} = \frac{K^s}{1+\delta k_n}, \tag{5}$$

где $\delta = 50$. Формула (5) получена по измерениям в сухих песчаниках [7].

Таким образом, скорости v_P и v_S упругих волн в пористой флюидонасыщенной среде можно вычислить по формулам (1), где параметры ρ, K и μ рассчитываются из соотношений (2)-(5).

Скорость v_f волны давления поровой жидкости можно определить по формуле, предложенной в работе [8]:

$$v_f = \mathrm{Re}\left(\left[\frac{d\chi(\omega)}{d\omega}\right]^{-1}\right)_{\omega=\omega_0} = \mathrm{Re}\left(\frac{2\chi\omega}{\chi^2 - \omega^2 \rho^f c}\right)_{\omega=\omega_0}, \tag{6}$$

где $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ – круговая частота; ν_0 – основная частота в спектре сигнала, возбуждающего упругие колебания; $\chi = \sqrt{-i\omega a c}$, $\mathrm{Im}\chi > 0$; $a = \frac{\eta k_n}{k_{np}} - i\omega\rho^f$; η – динамическая вязкость флюида; k_{np} – коэффициент проницаемости породы; $c = \frac{1}{k_n K^s}\left[\frac{\overline{K}}{K^s} - (1-k_n) - k_n \frac{K^s}{K^f}\right]$.

При импульсном возбуждении электромагнитной волны в пористой среде скорость v_e волны равна [9]:

$$v_e = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}} \left(\frac{2\Delta}{\Delta + \sqrt{1+\Delta^2}} \right)^{1/2}, \tag{7}$$

где $c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; μ_1 – относительная магнитная проницаемость среды (для большинства пород $\mu_1 = 1$); ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\Delta = \frac{\omega\varepsilon}{\sigma}$; $\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; σ – удельная электропроводность среды; $\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота; ν – основная частота в спектре сигнала, возбуждающего электромагнитные колебания.

Удельную электропроводность σ и диэлектрическую проницаемость ε_1 пористой насыщенной породы можно вычислить по формулам [9,10]:

$$\sigma = k_n \sigma^f + (1 - k_n)\sigma^s, \tag{8}$$

$$\varepsilon_1 = k_n \varepsilon^f + (1 - k_n)\varepsilon^s, \tag{9}$$

σ^f, ε^f – электропроводность и диэлектрическая проницаемость флюида; σ^s, ε^s – электропроводность и диэлектрическая проницаемость материала скелета породы. Подставляя (8) и (9) в (7) находим скорость v_e электромагнитной волны, распространяющаяся в пористой насыщенной горной породе.

Таким образом, соотношения (1) – (9) определяют зависимости скоростей упругих и электромагнитных волн от коэффициента пористости k_n горной породы: $v_P = v_P(k_n)$, $v_S = v_S(k_n)$, $v_f = v_f(k_n)$, $v_e = v_e(k_n)$.

Алгоритм оценки чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к изменению пористости горной породы состоит из следующей последовательности действий.

1. Расчет скоростей $v_P(k_n)$, $v_S(k_n)$, $v_f(k_n)$, $v_e(k_n)$ по формулам (1) – (9) для фиксированного набора параметров пористой насыщенной горной породы.

2. Определение скоростей $v_P(k_n + \Delta k_n)$, $v_S(k_n + \Delta k_n)$, $v_f(k_n + \Delta k_n)$, $v_e(k_n + \Delta k_n)$ для тех же значений параметров среды, за исключением значения k_n, его изменить на величину Δk_n (где Δk_n можно выбрать $\Delta k_n = \delta \cdot k_n$, δ – малое значение, например, $\delta = 0.01$).

3. Расчет для каждой из рассматриваемых скоростей v значения коэффициента эластичности:

$$E_{k_n}(v) = \left(\frac{v(k_n + \Delta k_n) - v(k_n)]}{v(k_n)} \right) \Big/ \left(\frac{\Delta k_n}{k_n} \right).$$

4. Учитывая, что часть параметров среды изменяются в заданных пределах, то для оценки чувствительности скоростей v_P, v_S, v_f, v_e от

ISSN 2541-9269

пористости горной породы k_n, определяются средние значения коэффициента эластичности $\langle E_{k_n}(v)\rangle$, для этого расчеты по пунктам 1-3 повторяются для каждого набора варьируемых параметров, после чего выполняется осреднение по всем таким наборам.

5. Сравнительный анализ локальных $E_{k_n}(v)$ и/или средних значений $\langle E_{k_n}(v)\rangle$ коэффициентов эластичности, заключающийся в ранжировании скоростей v_P, v_S, v_f, v_e по возрастанию их коэффициентов эластичности.

Результаты расчетов оценки чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к малым изменениям пористости осадочных горных пород

С помощью описанного выше алгоритма проведены расчеты коэффициента эластичности скоростей v_P, v_S, v_f, v_e от пористости горной породы k_n для песчаников и известняков насыщенных пластовыми водами. В табл. 1 приведены значения параметров горных пород, используемые в расчетах. Основная частота ν_0 в спектре сигнала, возбуждающего упругие колебания в расчетах полагалась в пределах 10^3-10^4 Гц. Основная частота ν для электромагнитных волн менялась в диапазоне 10^4-10^6 Гц.

Таблица 1

Значения параметров горных пород

Параметры пород	Песчаники	Известняки	Пластовые воды
k_n	0,05-0,40	0,05-0,40	–
k_{np}, м^2	10^{-16}-10^{-12}	10^{-16}-10^{-12}	–
ρ^s, г/см^3	2,58-2,86	2,62-2,87	–
ρ^f, г/см^3	–	–	1-1,2
K^s, ГПа	19-33	52-71	–
K^f, ГПа	–	–	2,2
μ, ГПа	18-28	23-32	–
σ^s, См/м	10^{-6}-10^{-5}	10^{-6}-10^{-4}	–
σ^f, См/м	–	–	10^{-3}-10^{2}
ε^s	2-4	2-4	–
ε^f	–	–	79-81
η, Па·с	–	–	$0{,}2\cdot10^{-3}$-$1{,}6\cdot10^{-3}$

ISSN 2541-9269

Как показывают результаты расчетов значения эластичности скоростей v_P, v_S, v_f, v_e в зависимости от значений параметров пород меняются по абсолютной величине от 0 до 0,54. Результаты ранжирования коэффициента эластичности также зависят от значений параметров. Так, например, в одних случаях максимальной является эластичность скорости v_f волны давления поровой жидкости, в других случаях – эластичность скорости v_e электромагнитных волн.

Для обобщенного сравнения чувствительности скоростей упругих и электромагнитных волн к изменению пористости насыщенной породы составлены выборки (для песчаников и для известняков), состоящие из 10 000 комбинаций значений параметров сред, распределенных равномерно на интервалах, указанных в табл. 1. Для каждого набора рассчитаны значения коэффициентов эластичности скоростей v_P, v_S, v_f, v_e и проведено их ранжирование по величине. В табл. 2 приведены результаты ранжирования в процентах по отношению к объему выборки. Например, если для известняков у скорости v_f в столбце для E_2 стоит 90,0% – это означает, что у насыщенных известняков в 90,0% комбинаций значений параметров сред эластичность E_2 скорости v_f меньше эластичности E_1 одной из рассмотренных скоростей, но превышает эластичности E_3, E_4 двух других скоростей.

Таблица 2

Ранжирование коэффициентов эластичности для скоростей упругих и электромагнитных волн

	Скорости	Ранжирование ($E_1 > E_2 > E_3 > E_4$) коэффициентов эластичности по величине (% для выборки объемом 10 000)			
		для E_1	для E_2	для E_3	для E_4
песчаники	v_P	0	0,1	18,6	81,3
	v_S	0	0,1	81,3	18,6
	v_f	0,4	99,4	0,1	0,1
	v_e	99,6	0,4	0	0
известняки	v_P	0	0,3	32,9	66,8
	v_S	0	0,1	66,8	33,1
	v_f	9,6	90,0	0,3	0,1
	v_e	90,4	9,6	0	0

ISSN 2541-9269

Средние значения коэффициентов эластичности у рассмотренных выборок:

для песчаников –

$\langle E_{k_n}(v_P)\rangle = 0{,}04$, $\langle E_{k_n}(v_S)\rangle = 0{,}08$, $\langle E_{k_n}(v_f)\rangle = 0{,}37$, $\langle E_{k_n}(v_e)\rangle = 0{,}49$;

для известняков –

$\langle E_{k_n}(v_P)\rangle = 0{,}05$, $\langle E_{k_n}(v_S)\rangle = 0{,}08$, $\langle E_{k_n}(v_f)\rangle = 0{,}44$, $\langle E_{k_n}(v_e)\rangle = 0{,}49$.

Средние значения эластичности максимальны для скорости электромагнитной волны, кроме того, в рассмотренных выборках эластичность электромагнитной волны является максимальной в более 90% комбинаций значений параметров сред (табл. 2). Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что из рассмотренных характеристик наиболее чувствительной к изменению пористости во влагонасыщенных песчаниках и известняках является скорость электромагнитных волн. В известняках, сопоставимой с v_e по чувствительности к изменению пористости является скорость v_f волны давления поровой жидкости, так как средние значения эластичности для v_e и v_f у них близки: $\langle E_{k_n}(v_e)\rangle / \langle E_{k_n}(v_f)\rangle \approx 1{,}1$.

Выводы

1. Проведен численный эксперимент, основанный на сравнительном анализе локальных и средних коэффициентов эластичности, по оценке чувствительности упругих и электромагнитных полей при изменении пористости осадочных горных пород.

2. Результаты численного эксперимента показывают, что во влагонасыщенных песчаниках и известняках эластичность скорости электромагнитных волн в среднем в 6-12 раз превосходит эластичность скоростей продольных и поперечных упругих волн и в 1,1-1,3 раза эластичность скорости волн давления поровой жидкости.

3. Сравнительный анализ коэффициентов эластичности скоростей упругих и электромагнитных волн во влагонасыщенных песчаниках и известняках показывает более высокую чувствительность к изменению пористости пород скоростей электромагнитных волн и волн давления поровой жидкости по сравнению со скоростями продольных и поперечных упругих волн.

Литература

1. Московский И.Г. К оценке чувствительности геофизических полей к малым изменениям параметров геологического разреза // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. № 3. URL: mathmod.esrae.ru/26-96.

2. Московский И.Г. Методика оценки значимости входных параметров на результаты прогноза устойчивости стенок скважины. 2018. № 4. URL: mathmod.esrae.ru/20-82.
3. Головин Б.А., Московский И.Г., Головин К.Б. Методика выбора контролируемых параметров при бурении нефтегазовых скважин // Недра Поволжья и Прикаспия. Вып. 99. Август 2019. С. 70-74.
4. Ерофеев В.И., Землянухин А.И., Катсон В.М. Нелинейные продольные магнитоупругие волны в стержне // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 7. С. 533-540.
5. Лукьянов Э.Е. Интерпретация данных ГТИ. Новосибирск.: Издательский Дом «Историческое наследие Сибири», 2011. 944 с.
6. Уайт Дж. Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. 261 с.
7. Geertsma J. and Smit D.C. Some aspects of elastic wave propagation in fluid-saturated porous solids. Geophysics, 26, 1961, P.169-181.
8. Губатенко В.П., Светов Б.С., Московский И.Г. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. II. Расчеты в горизонтально-слоистых средах // Физика Земли. 2002. № 2. С. 34-50.
9. Подповерхностная радиолокация / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин; Под ред. М.И. Финкельштейна / М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
10. Губатенко В.П., Бердичевский М.Н., Светов Б.С. Магнитотеллурическое зондирование вертикально-трещиноватых сред // Физика Земли. 1992. № 11. С. 3-17.