

УДК 550.832.4

## ВОЗМОЖНОСТЬ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТРЕЩИННОЙ ПОРИСТОСТИ ПОРОД ПО ДАННЫМ НВСП

Ленская Е.В.

ОАО «Башнефтегеофизика», г. Уфа

Ленский В.А., Хисаева Д.А.<sup>1</sup>

ОАО НПФ «Геофизика», г. Уфа

e-mail:<sup>1</sup> hisaeva@npf-geofizika.ru

**Аннотация.** Рассматривается возможность количественной оценки трещинной пористости по материалам многолучевого непродольного вертикального сейсмического профилирования (НВСП), широко используемого для уточнения структуры околоскважинного пространства и прогноза свойств коллекторов. Дополнительное извлечение из полученных материалов информации о трещиноватости коллекторов, пусть и не настолько точной, как при специализированных исследованиях, позволяет существенно повысить геологическую информативность НВСП.

**Ключевые слова:** трещинная пористость, бурение скважин, межзерновая пористость, свойство коллектора, структура околоскважинного пространства, НВСП, непродольное вертикальное сейсмическое профилирование

Дополнительное получение информации о трещиноватости коллекторов, пусть и не настолько точной, как при специализированных исследованиях, позволит существенно повысить геологическую информативность непродольного вертикального сейсмического профилирования (НВСП), широко используемого для уточнения структуры околоскважинного пространства и прогноза свойств коллекторов с целью проектирования точек бурения новых скважин. В статье рассматривается возможность оценки структуры порового пространства сложных коллекторов по данным НВСП.

Из теории упругости известно, что скорости распространения продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн определяются плотностью  $\rho$  и упругими постоянными среды, например, коэффициентом Пуассона  $\sigma$  и объемной сжимаемостью  $\beta$ :

$$V_p = [3(1-\sigma)/\rho\beta(1+\sigma)]^{1/2}, \quad (1)$$

$$V_s = [3(1-2\sigma)/2\rho\beta(1+\sigma)]^{1/2}.$$

Объемная сжимаемость среды и коэффициент Пуассона связаны выражением

$$V_p = [3(1-\sigma)/\rho\beta(1+\sigma)]^{1/2} \quad \beta = 3(1-\sigma)/\rho V_p^2(1+\sigma), \quad (2)$$

коэффициент Пуассона определяется скоростями продольных и поперечных волн

$$\sigma = (0,5 V_p^2/V_s^2 - 1)/(V_p^2/V_s^2 - 1), \quad (3)$$

а связь объёмной сжимаемости среды со скоростями продольных и поперечных

воли определяется выражением

$$\beta = 3/\rho(3V_p^2 - 4V_s^2). \quad (4)$$

Для коллекторов сложного типа (с вторичной каверновой и трещинной пористостью) эффективная сжимаемость  $\beta_{эф}$  зависит от всех составляющих и равна [1]

$$\beta_{эф} = K_{nm} \beta_m / K_n + K_{нк} \beta_k / K_n + K_{nm} \beta_m / K_n, \quad (5)$$

где  $K_{nm}$  и  $\beta_m$  – коэффициенты межзерновой пористости и сжимаемости пористой матрицы;  $K_{нк}$  и  $\beta_k$  – коэффициенты каверновой пористости и сжимаемости каверн;  $K_{nm}$  и  $\beta_m$  – коэффициенты трещинной пористости и сжимаемости трещин;  $K_n$  – коэффициент общей пористости.

Из (5) согласно [1] для хаотически расположенных трещин коэффициент трещинной  $K_{nm}$  или каверновой  $K_{нк}$  пористости коллекторов порово-трещинного или порово-кавернозного типа определится выражением

$$K_{nm(\kappa)} = (K_n \beta_{эф} - K_{nm} \beta_m) / \beta_{m(\kappa)} \approx (\beta_{эф} - \beta_m) / \beta_{m(\kappa)}, \quad (6)$$

где  $\beta_{m(\kappa)}$  – коэффициент сжимаемости трещин или каверн. Коэффициент сжимаемости пористой матрицы  $\beta_m$  может быть определен по справочным физическим свойствам коллекторов [2], по керну с помощью зависимости (4) или экспериментально по данным ГИС и ВСП в интервале коллекторов только с межзерновой пористостью. Коэффициент сжимаемости трещин  $\beta_m$  может быть определен по коэффициентам продуктивности  $\eta_1$  и  $\eta_2$  при двух давлениях, отличающихся на величину  $\Delta P$  [1]:

$$\beta_m = (\eta_1^{1/3} - \eta_2^{1/3}) / \eta_1^{1/3} \Delta P. \quad (7)$$

Величину  $\beta_m$  можно определить также путем интерполяции по дифференциальному давлению (разнице между горным и пластовым давлениями) экспериментально найденных значений  $\beta_m$  для данного типа коллектора на других участках. Коэффициент сжимаемости каверн  $\beta_k$  не зависит от дифференциального давления, что упрощает его определение по экспериментальным данным.

Для хаотически расположенных узких трещин, длина которых во много раз превышает их раскрытость, эффективная сжимаемость равна [1]:

$$\beta_{эф} = \beta_{нк} [1 + 2 K_{nm} / 3a(1 - 2\sigma)], \quad (8)$$

откуда

$$K_{nm} = 3a(1 - 2\sigma_{нк})(\beta_{эф} / \beta_{нк} - 1) / 2, \quad (9)$$

где  $\beta_{нк}$  и  $\sigma_{нк}$  – коэффициент сжимаемости и коэффициент Пуассона порово-кавернозной части;  $a$  – аспектное отношение (среднее отношение раскрытости трещин к их длине). Из (8) следует, что упругие свойства трещиноватых пород зависят от отношения  $K_{nm}/a$ , разделить влияние трещинной пористости и аспектного отношения невозможно. Точность определения коэффициента трещинной пористости по (9) определяется точностью определения аспектного отношения. Хаотическая микротрещиноватость ( $a < 0,1$ ) влияет на упругие свойства сильнее, чем макротрещи-

новатость, поэтому влияние микротрещиноватости обнаруживается при меньшей трещинной пористости, чем макротрещиноватости.

Оценка аспектного отношения вызывает определенные трудности. В работе [3] в качестве оценки аспектного отношения для трещиноватых плотных пород предлагается выбрать предельное (минимальное) его значение  $a_{np}$ , при котором трещины еще не закрываются. Закрывание трещин происходит при превышении горного давления над критическим  $P_{кр}$ :

$$P_{кр} = E_a + P_{nl}, \quad (10)$$

здесь  $E$  – модуль Юнга;  $P_{nl}$  – пластовое давление. Различают вертикальное  $P_z$  и горизонтальное (или боковое)  $P_h$  горное давление; величина горизонтального давления определяется выражением

$$P_h = P_z \sigma / (1 - \sigma) = K_{бр} P_z, \quad (11)$$

параметр  $K_{бр}$  называется коэффициентом бокового распора. Поскольку  $K_{бр}$  меньше единицы и для большинства горных пород изменяется в пределах 0,3-0,55 [3], на больших глубинах обычно преобладают вертикальные трещины. В соответствии с (11) для раскрытых вертикальных трещин аспектное отношение не может быть меньше некоторого предельного значения  $a_{np}$ :

$$a_{np} = (K_{бр} P_z - P_{nl}) / E. \quad (12)$$

При использовании (12) определенное значение трещинной пористости является кажущимся, так как не учитывает влияние насыщающей жидкости, текстурных особенностей и ряда других факторов, однако их влияние мало по сравнению с влиянием трещиноватости [3]. Гораздо большее влияние может оказать несовпадение среднего значения аспектного отношения с предельным значением.

В случае ориентированной трещиноватости эффективный (экспериментально определяемый) коэффициент Пуассона  $\sigma_{эф}$  будет зависеть от угла  $\varphi$  между направлением трещин и направлением распространения волны. В связи с большим удалением источника по сравнению с длиной волны, в ВСП фронт волны в точке приема можно считать плоским. Для плоской волны [1]:

$$\sigma_{эф} = \sigma_m / (1 + 2 K_{nm} \sin 2\varphi / a). \quad (13)$$

где  $\sigma_m$  – коэффициент Пуассона для пористой матрицы. Выражение (13) позволяет определить коэффициент трещинной пористости непосредственно по коэффициенту Пуассона

$$K_{nm} = a (\sigma_m / \sigma_{эф} - 1) / 2 \sin 2\varphi. \quad (14)$$

Исходя из приведенных теоретических положений, могут быть предложены следующие методические приемы оценки структуры порового пространства сложных коллекторов по данным ВСП.

При хаотической трещиноватости:

1. Выделяются интервалы коллекторов по понижению скоростей  $V_p$ ,  $V_s$  и отношения  $V_p/V_s$ . В выделенных интервалах с использованием выражения (4) определяется эффективное значение коэффициента сжимаемости  $\beta_{эф}$ . Каверны

существенно меньше влияют на скорости  $V_p$  и  $V_s$  из-за низкой сжимаемости, поэтому трещиноватые коллектора даже при небольшой трещиноватости выделяются повышенными значениями сжимаемости  $\beta_{эф}$ .

Одним из критериев выделения порово-кавернозных коллекторов (не содержащих трещиноватости) может служить значительное превышение скорости  $V_p$ , определенной по данным ВСП, над рассчитанной по уравнению среднего времени с использованием коэффициента пористости, определенного по НГК или ГГК [2].

Наоборот, в случае порово-трещинных коллекторов может наблюдаться значительное понижение скорости  $V_p$ , определенной по данным ВСП, относительно рассчитанной по уравнению среднего времени с использованием коэффициента пористости, определенного по НГК или ГГК.

2. С использованием выражения (6) определяется коэффициент трещинной  $K_{тн}$  или каверновой  $K_{кв}$  пористости коллекторов порово-трещинного или порово-кавернозного типа. Коэффициент общей пористости  $K_n$  определяется по данным (НГК или ГГК)

Оценка трещинной пористости коллекторов порово-трещинного или порово-кавернозно-трещинного типа может быть выполнена с использованием выражения (9). Для повышения точности результата аспектное отношение предлагается определить из зависимости (9) по экспериментальным данным в близких условиях на участках с известной трещинной пористостью.

При ориентированной трещиноватости:

1. Выделяются трещиноватые интервалы по расщеплению поперечной волны на быструю и медленную, понижению скоростей  $V_p$  и  $V_s$ , понижению отношения скоростей  $V_p/V_s$  и появлению зависимости этого отношения от азимута удаления источника, по повышению сжимаемости  $\beta_{эф}$ . В выделенных интервалах определяется преобладающее направление субвертикальной трещиноватости.

2. По данным продольного ВСП или НВСП (выбирается источник, удаленный в направлении, близком к азимуту направления трещиноватости) определяются скорости продольной волны  $V_p$  и быстрой поперечной волны  $V_{s\parallel}$ . С использованием найденных скоростей и данных плотностного каротажа по выражениям (3) и (4) рассчитываются коэффициент Пуассона  $\sigma_m$  и коэффициент эффективной сжимаемости  $\beta_{эф}$ . Поскольку в выбранной системе наблюдений скорости  $V_p$  и  $V_{s\parallel}$  практически не зависят от трещиноватости, эффективная сжимаемость определяется сжимаемостью пористой матрицы  $\beta_m$  и сжимаемостью каверн  $\beta_k$  (5). Это позволяет определить каверновую пористость с использованием выражения (6). Если кавернозность отсутствует, найденный коэффициент эффективной сжимаемости  $\beta_{эф}$  соответствует сжимаемости пористой матрицы  $\beta_m$ .

3. По данным НВСП определяются скорости продольной волны  $V_p$ , быстрой и медленной поперечных волн  $V_{s\parallel}$  и  $V_{s\perp}$  и угол  $\varphi$  между направлением

трещин и направлением распространения волн. По зависимости (3) рассчитываются эффективные коэффициенты Пуассона  $\sigma_{эф}$ . По найденным значениям  $\sigma_m$ ,  $\varphi$  и  $\sigma_{эф}$  с использованием выражения (14) определяется коэффициент трещинной пористости  $K_{nm}$ . Поскольку реальный характер индикатрис скоростей поперечных волн существенно отличается от эллиптического [2], целесообразно использовать не менее трех источников НВСП и путем аппроксимации (с учетом данных продольного ВСП) определить минимальное значение скоростей продольных и поперечных волн (при котором  $V_{s\parallel} = V_{s\perp}$ ). При использовании минимальных значений скоростей  $\varphi$  в выражения (14) принимается равным  $90^\circ$ .

Разумеется, практическое использование этих приемов зависит от точности и детальности определения скоростных характеристик по данным ВСП и НВСП. Опробование рассмотренной методики выполнено на материалах НВСП, полученных в 10 скважинах на нефтяных месторождениях Западной Сибири. Ниже иллюстрируются результаты, полученные в двух скважинах с отличающимся характером трещиноватости.

Хаотическая трещиноватость по данным НВСП была выявлена в скважине № 1 в интервале 2720 - 2780 м в отложениях верхней юры. Анализ поляризации поперечных волн показал, что азимутальная анизотропия упругих свойств в области скважины отсутствует, все достаточно интенсивные поперечные волны поляризованы в лучевой плоскости. Кавернозность также отсутствует. В табл. 1 представлены результаты определения интервальной скорости Р- и S-волн, отношения скоростей  $V_s/V_p$  и поглощения волн по данным НВСП из четырех пунктов возбуждения (ПВ), удаленных в различных азимутах. Определения выполнены в интервале 2350 - 2720 м, включающем коллектора нижнемеловых отложений, и в интервале 2720 - 2780 м, включающем пласт ЮС1 в отложениях верхней юры. В обоих интервалах закономерное изменение скоростей Р- и S-волн и их поглощения не происходит, разброс параметров носит хаотический характер и вызван ошибками расчетов, а также различием удалений источников. Это еще раз подтверждает отсутствие азимутальной анизотропии упругих свойств. Однако, низкие для данной части разреза значения скоростей и отношения  $V_s/V_p$  (по сравнению с другими скважинами) и резкое повышение затухания как поперечных, так и продольных волн указывают на наличие хаотической трещиноватости в продуктивных отложениях верхней юры.

Для оценки трещинной пористости принято среднее значение  $V_s$  и  $V_p$  в слое 2720 - 2780 м для всех удалений источника. Значение объемной сжимаемости поровой матрицы определено по аналогичным данным в вышележащих слабо трещиноватых отложениях. Аспектное отношение принято равным 0,003 (микротрещиноватость). При принятых параметрах трещинная пористость, рассчитанная по зависимости (9), равна  $K_{nm} = 0,09\%$ .

Таблица 1. Скорости и поглощение P и S волн в скважине № 1

Интервал определений и азимут источника	$V_p$ м/с	$V_s$ м/с	$V_s/V_p$	$\alpha_p$ дБ/м	$\alpha_s$ дБ/м
2350 - 2720м					
ПВ2 (158°)	3721	1973	0,530	0,007	0,009
ПВ3 (118°)	3706	1967	0,531	0,009	0,007
ПВ5 (78°)	3704	1974	0,533	0,006	0,010
ПВ4 (7°)	3680	2026	0,550	0,007	0,005
2720- 2780м					
ПВ2 (158°)	3172	1729	0,545	<b>0,025</b>	<b>0,047</b>
ПВ3 (118°)	3236	1732	0,535	<b>0,037</b>	<b>0,048</b>
ПВ5 (78°)	3139	1717	0,547	<b>0,028</b>	<b>0,060</b>
ПВ4 (7°)	3210	1728	0,538	<b>0,021</b>	<b>0,059</b>

Ориентированная трещиноватость по данным НВСП была выявлена в скважине № 2 в интервале 2900 - 2980 м также в отложениях верхней юры, включающих продуктивный пласт Ю1. По результатам исследования поляризации волн поперечного типа определен азимут трещиноватости 325°. Результаты интерпретации материалов НВСП подтверждаются керном, отобранном в интервалах 2830 - 2837,4 м и 2954,8 - 2952,8 м, в трещиноватом по данным НВСП интервале керн раздроблен, видны вертикальные трещины. Кавернозность отсутствует. Результаты определения интервальной скорости P- и S-волн, отношения скоростей  $V_s/V_p$  и поглощения волн представлены в табл. 2. Определения выполнены в покрывающих породах в интервале 2590 - 2900 м и в анизотропном интервале 2900 - 2980 м. В покрывающих отложениях скорости P- и S-волн и их поглощение практически не зависят от азимута пункта возбуждения. В анизотропном интервале в направлении, ортогональном трещиноватости (ПВ3, ПВ4), скорости поперечной волны и отношение скоростей  $V_s/V_p$  существенно ниже, а поглощение как продольных, так и поперечных волн существенно выше.

Таблица 2 Скорости и поглощение P и S волн в скважине № 2

Интервал определений и азимут источника	$V_p$ м/с	$V_s$ м/с	$V_s/V_p$	$\alpha_p$ дБ/м	$\alpha_s$ дБ/м
2590-2900м					
ПВ2 (155°)	4000	2284	0,571	0,003	0,007
ПВ3 (230°)	3975	2261	0,569	0,003	0,008
ПВ4 (35°)	3971	2278	0,573	0,002	0,008
2900-2980м					
ПВ2 (155°)	3435	<b>1933</b>	<b>0,563</b>	0,018	0,056
ПВ3 (230°)	3446	1852	0,537	<b>0,032</b>	<b>0,082</b>
ПВ4 (35°)	3377	1834	0,543	<b>0,033</b>	<b>0,07</b>

Для оценки трещинной пористости принято среднее значение  $V_s$  и  $V_p$  в слое 2900 - 2980 м для ПВ3 и ПВ4, удаленных почти ортогонально к направлению трещиноватости. Коэффициент Пуассона поровой матрицы определен по аналогичным данным в вышележащих нетрещиноватых отложениях. Аспектное отношение принято равным 0,003. При принятых параметрах трещинная пористость, определенная по зависимости (14), равна  $K_{nm} = 0,06 \%$ .

Полученные результаты показывают, что по материалам многолучевого НВСП с привлечением данных ГИС вполне возможна оценка структуры порового пространства и средней трещинной пористости в выделенном трещиноватом слое. Конечно, точность оценки трещинной пористости не высока, определенные значения следует считать кажущимися, но при большом объеме исследований НВСП в пределах одного месторождения могут быть найдены способы повышения точности до приемлемого уровня.

### Литература

1. Дзедбань И.П. Акустический метод выделения коллекторов с вторичной пористостью. М.: Недра, 1981. 160 с.
2. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М., Недра, 1970. 150 с.
3. Сидорчук А.И., Рыскаль О.Е. Прогнозирование и оценка трещинной пористости по комплексу новых методов ГИС // НТВ «Каротажник». 2003. Вып. 113. С. 141 - 151.

**THE OPPORTUNITY OF THE QUANTITATIVE  
FRACTURE FORMATION POROSITY ESTIMATION  
ACCORDING TO THE OFFSET VERTICAL SEISMIC PROFILING DATA**

E.V. Lenskaya

*OAO "Bashneftegeofizika", Ufa, Russia*

V.A. Lenskiy, D.A. Khisaeva

*OAO NPF "Geofizika", Ufa, Russia*

**Abstract.** *The opportunity of the quantitative fracture formation porosity estimation is regarded, according to the multi-beam offset vertical profiling, widely used for the borehole environment structure elaboration and the reservoir performance prediction. The additional retrieval from the received formation fracturing data, let it be not so accurate as during the specialized research, enables to increase significantly the geological information content of the offset vertical profiling.*

**Keywords:** *fracture porosity, well drilling, intergranular porosity, reservoir properties, near-wellbore structure, offset vertical profiling*

**References**

1. Dzeban' I.P. Akusticheskii metod vydeleniya kollektorov s vtorichnoi poristost'yu (An acoustic method for selection reservoirs with secondary porosity). Moscow, Nedra, 1981. 160 p.
2. Dobrynin V.M. Deformatsii i izmeneniya fizicheskikh svoistv kollektorov nefi i gaza (Deformation and changes of physical properties of oil and gas). Moscow, Nedra, 1970. 150 p.
3. Sidorchuk A.I., Ryskal' O.E. Prognozirovaniye i otsenka treshchinnoi poristosti po kompleksu novykh metodov GIS (Forecasting and assessment of fracture porosity with use the complex new geophysical well logging methods), *Karotaznik*, 2003, Issue 113, pp. 141 - 151.