

На обоих планшетах свободной колонне соответствует голубой цвет, плотному контакту – коричневый. Интервалы дефектов цементированья, полученные по данным приборов, соответствуют друг другу, а различное пространственное расположение объясняется вращением приборов во время проведения каротажа.

Проведенные скважинные испытания сканера доказывают возможности его применения в скважинах глубиной свыше 4000 м. Особо следует отметить способность определения дефектов колонны на внутренней или наружной стенке, поскольку имеется возможность точного измерения внутренних радиусов и толщины.

2. Результаты скважинных исследований не противоречат априорным данным. В частности, определенные значения внешних диаметров обсадных колонн не выходят за пределы отклонений от номинальных значений, предписанных ГОСТ.
3. Методика исследований, скважинный прибор, регистратор и программные средства обработки данных достаточно просты в использовании. Полевые работы и обработка данных были успешно проведены без участия разработчиков технологии. Авторы провели проверку и анализ результатов с точки зрения реализации метода и поиска путей его совершенствования. Основываясь на результатах проведенных опытно-методических работ, можно заключить, что отечественная технология акустического сканирования пригодна для использования в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новохатский М. И. Опыт применения высокочастотного акустического дефектомера в условиях подземных хранилищ газа // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2007. Вып. 9 (162). С. 117–121.
2. Терехов О. В. Применение метода отраженных волн при оценке технического состояния скважин // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2007. Вып. 8 (161). С. 56–59.
3. Терехов О. В., Стрелков В. И. Физическое моделирование по определению области применения акустического телевизора // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 7 (172). С. 65–70.
4. Broding R. A. Application of the Sonic Volumetric Scan Log to Cement Evaluation // SPWLA 25th Annual Logging Symposium Transactions, 1984. Paper JJ.
5. Cathignat D., Sapozhnicov, and Theillere, Y. Comparison of Acoustic Fields Radiated from Piezoceramic and Piezocomposite Focused Radiators // JASA 105 (5). May 1999. P. 2612–2617.

6. Catala G., Stowe I., and Henry D. Method for Evaluation the Quality of Cement Surrounding the Casing of a Borehole. Патент США № 4 703 427. 1987.
7. Strozetski B. B., Hilliker D. J., and Oliver D. W. Theoretical and Experimental Development of the Ultrasonic Diplog System // SPWLA 30th Annual Logging Symposium Transactions, 1989. Paper I.
8. Havira R. M. Ultrasonic Cement Bond Evaluation // SPWLA 23^d Annual Logging Symposium Transactions, 1982. Paper N.
9. Tello L. N., Molder S. D., and Holland R. M. The Fourier Transform Applied to Cased-hole Ultrasonic Scanner Measurements // SPWLA 49th Annual Logging Symposium Transactions, 2008. Paper OO.

*Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО "Нефтегазгеофизика" и рекомендована к публикации*

УДК 550.832

*В. Ф. Козяр, Н. В. Козяр
ООО "Нефтегазгеофизика"*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАВЕРНОВОЙ ЕМКОСТИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Выполнены оценки минимальной каверновой емкости, размеров каверн и их количеств, базирующиеся на дифракционных явлениях. Показано, что термин "каверновая емкость" различным образом трактуется в геологии и в акустике, хотя они близки друг к другу.

Ключевые слова: акустический каротаж, каверновая емкость.

Современное состояние вопроса

Общепризнано, что при равных значениях емкости кавернозных пород и пород с межзерновым типом пор скорость распространения (v) продольной упругой волны в первых существенно выше (интервальное время $\Delta t = 1/v$ ниже), чем во вторых. Разность скоростей обусловлена дифракцией волны: огибанием волной каверн по более высокоскоростному минеральному скелету породы вместо ее движения сквозь емкость, заполненную низкоскоростной жидкостью.

Поиск зависимостей v или Δt продольной волны от каверновой емкости длился долгие годы. Были использованы возможности физического [1, 3] и математического [7, 8] моделирования на двух- и трехмерных моделях и так называемые “теоретические” представления, базирующиеся на простейших гипотетических предположениях [2]. Физические модели представляли собой двухмерные листы с разнообразными по форме отверстиями (круглые, треугольные и т. п.), изготовленные из материалов (алюминий, органическое стекло), импеданс которых близок к импедансу горных пород. Математические модели предусматривали расположение в двухмерном пространстве прямоугольных или круглых пустот (каверн) в произвольном порядке. Особняком стоит расположение каверн в [2], где в двухмерном пространстве они размещены в виде цепочек на небольшом расстоянии друг от друга. Авторские зависимости и их графические отображения приведены в таблице и на рис. 1. Для сравнения там же показаны чаще всего применяемые эмпирические уравнения между Δt и k_n для пород с межзерновой пористостью; $\Delta t_{ск}$ – интервальное время в скелете породы.

Решения, полученные в цитируемых работах, основаны на неадекватных моделях, представляющих собой упорядоченные построения емкостей (каверн) одинакового размера и чуждого для описания дифракции математического аппарата геометрической акустики.

Таблица

Аналитические зависимости, предложенные для определения емкости межзерновых [7, 9, 10] и кавернозных пород [1–3, 7, 8]

№ на рис. 1	Авторы	Зависимость
1	Wyllie M. R. J. et al.	$\Delta t = \Delta t_{ск}(1 - k_n) + \Delta t_{ж}k_n$
2	Raymer L. L. et al.	$v = v_{ск}(1 - k_n)^2 + v_{ж}k_n$
3	Юматов А. Ю. и др.	Графическое выражение
4	Юматов А. Ю. и др.	Графическое выражение
5	Гильберштейн П. Г., Гурвич И. И.	$\Delta t = \Delta t_{ск}/(1 - \gamma k_{п,к})$ $\gamma = 0,700-0,775$
6	Mackenzie J.	$\Delta t = \Delta t_{ск}/(1 - 0,768k_{п,к})$
7	Дзевань И. П.	$\Delta t = \Delta t_{ск}(1 + 0,726k_{п,к})$
8	Юматов А. Ю.	$\Delta t \geq \Delta t_{ск}(1 + 0,5k_{п,к})$
9	Ивакин Б. Н.	Графическое выражение

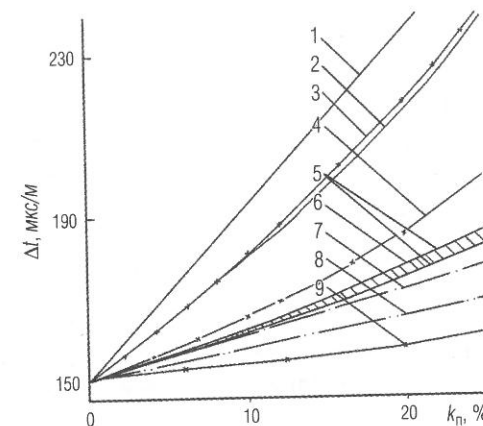


Рис. 1. Аналитические зависимости, предложенные для определения емкости межзерновых (1–3) и кавернозных (4–9) пород: цифры у кривых соответствуют порядковым номерам в таблице

Анализ литературных источников

Несоответствие установленных аналитических зависимостей свойствам кавернозной среды объясняется допущением двух общих для всех исследователей методологических ошибок. Первая – попытки применения простых аналитических зависимостей для среды, каверны в которых расположены стохастически. Легко проверить, что при расположении каверн в виде цепочек вдоль направления распространения волны (рис. 2, а) они не будут влиять на скорость волны. Наоборот, их расположение, нормальное к направлению распространения (рис. 2, б), обуславливает изменения скорости волны такие же, как для межзерновой среды с равной емкостью. Математические модели обеих сред (каверновой и межзерновой) в этом случае одинаковые. Естественно, возможны любые другие варианты, промежуточные двум описанным.

Вторая ошибка заключается в использовании геометрической акустики для описания дифракционных явлений. Четко, в авторском варианте, это изложено в [2]. Никаким образом не учитываются условия (требования) применения лучевого приближения. А они состоят в следующем: размеры источника упругой волны и препятствий (каверн)

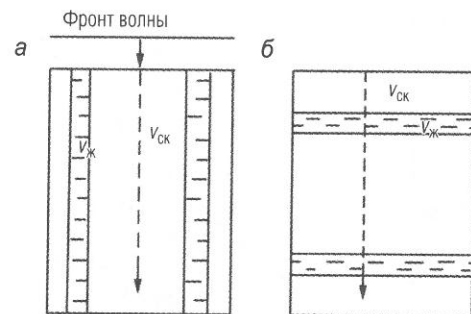


Рис. 2. Схема идеализированного расположения (математическая модель) каверн в виде цепочек соосных (а) и нормальных (б) направлению распространения волны

должны превышать длину волны, а точка наблюдения располагаться на удалении нескольких длин волн от источника и препятствия [6]. Далее в тексте [2] присутствует никем не замеченная оговорка, что применение лучевого приближения не позволяет получить ту же аналитическую формулу для редко расположенных в цепочке каверн, то есть при максимальном проявлении дифракционных явлений. Эта оговорка справедлива и для стохастически распределенных каверн.

Неадекватное применение геометрической акустики имеет своим следствием абсурдное заключение, что “скорость распространения волн в кавернозной среде не зависит от диаметра каверн” [2]. Но именно соотношение поперечного сечения препятствия и длины волны служит определяющим обстоятельством для проявления дифракции [4, 6]. Очевидно, необходим поиск объяснения эффекта кавернозности без привлечения лучевого метода, а также хотя бы приблизительная оценка символической границы между кавернами и межзерновыми порами, оказывающими различное влияние на скорость упругих волн.

Каверны в теории дифракции упругих волн

Если рассматривать минеральный скелет породы как сплошную среду, то любая полость в этой среде, заполненная низкоскоростными жидкостью либо газом, будет представлять собой пору или каверну. В тонко- и среднезернистых и среднепоровых породах каверны представлены редко расположенными крупными полостями.

Существует более десятка геологических классификаций, критериями которых служат геометрические размеры пор и каверн. Они нашли обобщение в методическом руководстве [5]. Каверны считаются мелкими, если их преобладающий размер находится в диапазоне 1–10 мм. В диапазоне размеров 10–100 мм они крупные, а при превышении 100 мм – пещеристые. Никогда не рассматривалась применимость такой классификации для описания дифракции упругой волны на каверне. Также неизвестны соотношения размеров этих полостей и длин упругой волны, определяющие их хотя бы условное отнесение к порам или кавернам.

Известно [6] условие отсутствия акустической тени на расстоянии l от дефекта (поры, каверны), на который падает плоская волна:

$$l \gg d^2/\lambda, \quad (1)$$

где d – поперечный размер (диаметр, в частности) дефекта по фронту волны, λ – длина волны.

Если условно принять, что искомая длина тени равна l , то можно найти поперечный размер полости, идеально соответствующий каверне с точки зрения акустики. То есть на расстоянии, большем l , полностью восстанавливается фронт падающей волны, а каверна никоим образом не будет влиять на скорость распространения фронта волны в массиве породы. Ее максимальный размер должен соответствовать неравенству $d \ll \sqrt{l/\lambda}$. Каверны меньшего размера, отдельно расположенные в массиве породы, тем более не будут сказываться на значении скорости упругой волны. Но если они будут встречаться чаще, что возможно в условиях высокой порово-каверновой емкости породы, то частично или полностью станут равноценными элементами массива межзерновых пор. В этом заключается двойственная (с точки зрения геологии) реакция АК на каверны, размеры которых меньше d .

Зависимость (1) представляет собой параболу, поэтому ее поведение лучше всего отображает полулогарифмический масштаб (рис. 3). Левая часть рисунка (от значений диаметров, меньших 100–150 мм) вполне тривиальна. Препятствия (в том числе каверны), размеры которых много меньше длины волны, не являются источником дифракции. Они рассеивают падающую волну во всех направлениях с явно выраженным преимуществом вперед по направлению движения волны [4, 6].

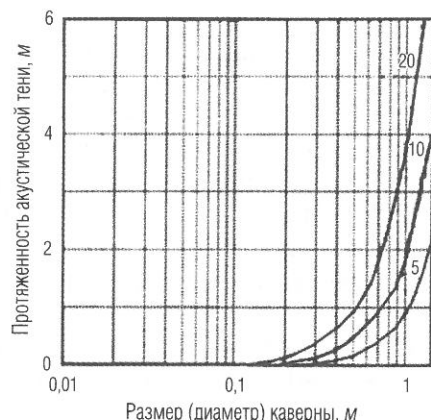


Рис. 3. Зависимость протяженности акустической тени от размеров препятствия для частот излучения 5, 10 и 20 кГц

При увеличении размеров препятствия (диаметра каверн) отчетливо проявляется дифракция волны на препятствии. Начиная где-то после размеров препятствия, больших 0,1 м, она резко увеличивается для частот 5–20 кГц, когда размеры препятствия превышают 0,15 м. Длина акустической тени увеличивается с ростом размеров препятствия от десятых метра до нескольких метров.

Для оценки размеров каверн и их возможного количества в объеме породы в наиболее интересном диапазоне размеров каверн до 150 мм воспользуемся номограммами, полученными А. Ю. Юматовым при математическом моделировании распространения упругой волны в модели пустотного пространства методом конечных элементов (рис. 4). Ориентируясь на заданное в работе отношение λ/d (где λ – длина волны, d – поперечный размер каверн), нетрудно определить, что при минимальном отношении λ/d , равном 8, каверны размером 0,05 м почти не оказывают влияния на измеряемое интервальное время Δt . Для расчета принята преобладающая частота волны в карбонатном разрезе, близкая к 15 кГц (длина волны 0,43 м), скорость волны в пористой породе – 6400 м/с, в жидкости – 1500 м/с, плотность матрицы – 2,71 г/см³. С уменьшением диаметра пустот их размеры уменьшаются от 0,05 до 0,003 м. Казалось бы, что при столь больших размерах пустот (0,05 м) их количество в породе незначительно. Но

это не так. Емкость в 20% составляют 1280 каверн, а при диаметре каверн 0,027 м их количество превышает 10^4 , увеличиваясь далее до 10^6 – 10^7 .

Существенное уменьшение Δt , по сравнению с породами с межзерновой пористостью, наступает при размерах (диаметре) пустот 0,013 м; его абсолютные значения увеличиваются с ростом размеров пустот. При размерах более 0,05 м пустоты практически полностью обходятся волной. Пустоты (поры) размером 0,003 м и менее воспринимаются по данным акустического каротажа как межзерновые.

Важным для АК свойством дифракции волны служит рассеяние ее энергии на препятствии (каверне). Интенсивность волны в направлении распространения уменьшается в разы; уменьшение возрастает с увеличением частоты излучения или, что то же, увеличением размеров препятствия. При очень высокой частоте волновой процесс может отсутствовать далеко за границами самого препятствия. В противовес этому в породах с межзерновой пористостью рассеяние энергии волны происходит преимущественно вперед, поэтому коэффициенты затухания близки к таковым для плотных малопористых пород.

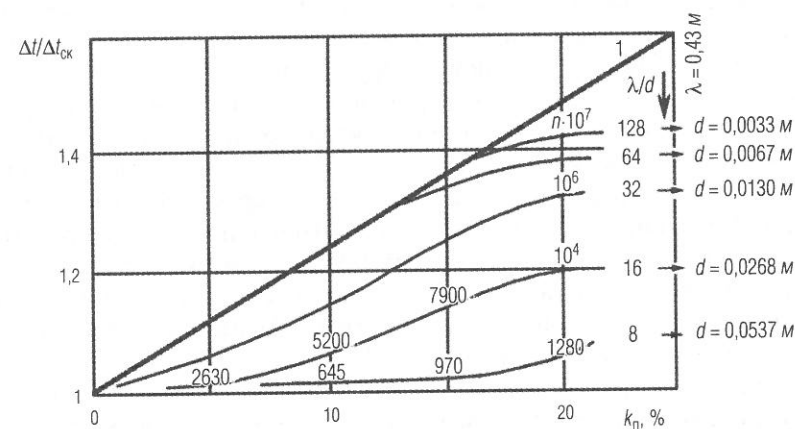


Рис. 4. Зависимость приращений интервального времени $\Delta t/\Delta t_{св}$ от коэффициентов k_n емкости и количества пустот. Шифр кривых – отношение λ/d , где λ – длина волны, d – поперечный размер кривых; над кривыми показаны количества пустот для выбранных значений емкости; цифрой 1 обозначен график уравнения среднего времени для пород с межзерновой пористостью

Уменьшение интенсивности (по факту измерений – амплитуд) упругой волны в направлении ее распространения служит индикатором кавернозных пород. Значимость признака многократно усиливается трещиноватостью пород, которая обычно сопровождает кавернозность. Во многих случаях каверны образуются как пустоты выщелачивания вдоль трещин, служащих путями движения пластовых флюидов. Изолированные каверны представляют собой уникальные объекты. Их удалось наблюдать в керне задонско-елецких карбонатных пород Припятской впадины. На свежем изломе керна, пролежавшего в хранилище один-два года, появлялись выпоты нефти, пузырьки газа. Нефтегазопроявления обязаны изолированным кавернам, которые также видны на сколах.

Обсуждение результатов

В геологической литературе под кавернами подразумевают все пустоты, размеры которых превышают 1 мм. По данным АК нижняя граница каверновой емкости несколько выше – 3 мм. Реакция АК на пустоты меньшего размера соответствует межзерновым порам.

Мелкие каверны размером от 3 до 7 мм только частично обходятся волной. Они обуславливают уменьшение интервального времени на 1/5 по сравнению с межзерновой структурой.

Максимальное влияние кавернозности на интервальное время Δt наблюдается для каверн, размеры которых превышают 7 мм. По геологической классификации это крупная кавернозность. Начиная с этих каверн и, наверное, до 500 мм (когда поперечный размер каверн становится равным акустической тени) отношение $\Delta t/\Delta t_{\text{ск}}$ стремится к 1. Оно достигает своего значения 0,9 уже при размерах каверны 50 мм. Поэтому при таком уменьшении Δt следует принимать для рассчитанных значений кавернозности коэффициенты нефтенасыщенности и нефтеотдачи, близкие к 1.

Оценить пещерную кавернозность и палеокарст по данным АК затруднительно или вовсе невозможно. Расположение в скважинном зонде излучателей и приемников акустических сигналов неблагоприятно для регистрации сигналов, отраженных от стенки скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гильберштейн Л. Г., Гурвич И. И. Скорости упругих волн в дырчатых материалах для сейсмического моделирования // Изв. вузов. Сер. "Геол. и разведка". 1962. № 5. С. 116–131.
2. Дзедзевский И. П. Акустический метод выделения коллекторов с вторичной пористостью. М.: Недра (ВНИИЯГГ), 1981. 160 с.
3. Ивакин Б. Н. Методы управления плотностью и упругостью среды при двухмерном моделировании сейсмических волн // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 8. С. 1149–1167.
4. Лепендин А. Ф. Акустика. М.: Высш. школа, 1978. 448 с.
5. Тугарова М. А. Породы-коллекторы: свойства, петрофизические признаки, классификации (учебно-методическое пособие). Санкт-Петербургский университет, 2004. 36 с.
6. Ультразвук. Малая энциклопедия / Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
7. Юматов А. Ю., Черенюк Н. П., Козяр Н. В. Связь кинематических параметров продольных и поперечных волн с пористостью в осадочных горных породах сложного литологического состава / В сб. "Совершенствование технологии интерпретации и петрофизического обеспечения геофизических исследований нефтегазоразведочных скважин". Тверь: НПО "ГЕРС", ВНИГИК, 1992. С. 84–88.
8. Mackenzie J. The Elastic Constants of Solid Containing Spherical Holes // Proc. Phys. Soc. 1950. Sec. B.V. 63. P. 2–11.
9. Raymer L. L., Hunt E. R., Gardner J. S. An Improved Sonic Transit Time-to-Porosity Transform // Trans. SPWLA 21st Annual Logging Symposium. 1980. Paper P.
10. Willie M. R. J., Gardner G. H., Gregory B. R. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media // J. Geophys. Res. 1956. V. 21. № 1. P. 41–70.

Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО "Нефтегазгеофизика" и рекомендована к публикации