

Дискуссионный клуб

В. Ф. Козяр, Н. В. Козяр
ООО «Нефтегазгеофизика»

ПРОДОЛЖЕНИЕ ДИСКУССИИ О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЦЕМЕНТОМЕТРИИ ОБСАДНЫХ КОЛОНН

Рассмотрены два подхода к пониманию процессов, возникающих при акустической цементометрии обсадных колонн. Первый основан на классической теории распространения упругих волн, второй обязан физике Френеля-Био. Отдается дань первому и сформулированы вопросы к второму, решение которых поможет его восприятию.

Ключевые слова: цементометрия, акустические исследования, теории процессов классической физики и физики Френеля-Био.

Современное состояние проблемы

Технология акустической цементометрии (АКЦ) базируется на нескольких, казалось бы, незыблемых постулатах:

1. Незацементированная (свободная) обсадная колонна диаметром 127–245 мм, окруженная внутри и снаружи жидкостью, характеризуется постоянными скоростью ϑ_k распространения ($\Delta t_k = 1/\vartheta_k = 183\text{--}185 \text{ мкс/м}$) и затуханием ($\alpha_k = 3\text{--}5 \text{ дБ/м}$) упругой волны и максимальными амплитудами A , которые регистрируются двухэлементными зондами, содержащими по одному излучателю и приемнику (ИП). На соединительных муфтах затухание волны увеличивается до 7–9 дБ/м, а амплитуды уменьшаются на 20–30%. Это продольная волна Лэмба L_k , скорость распространения которой составляет примерно 0,9 от скорости продольной волны в массиве железа. В терминологии АКЦ – волна по колонне.

2. Колонна, зацементированная нормальным цементом плотностью $1,8\text{--}1,9 \text{ г/см}^3$, в случае сплошного контакта с ней цементного камня имеет совершенно другие характеристики. Затухание волны увеличивается до $35\text{--}37 \text{ дБ/м}$, для скважинных приборов – до 30 дБ/м (так как невозможна передача по каротажному кабелю данных в большем динамическом диапазоне). Амплитуды A двухэлементных зондов, измеренные во временном промежутке, присущем волне по колонне, минимальные. Скорость распространения волны в колонне, если ее удастся зарегистрировать, остается постоянной.

3. Возможны также все промежуточные состояния, включая частичный контакт цементного камня с обсадной колонной.

4. При полном затухании волны по колонне появление устойчивых колебаний какой-то другой волны приписывается волне по породе. Более чем в 90% случаев так оно и есть. Этим самым устанавливается сплошной контакт цементного камня с горными породами, составляющими стенку скважины.

Локальные дефекты цементирования колонн, меньшие длин измерительных зондов и обусловленные отсутствием механических контактов цементного камня с обсадной колонной в ограниченном интервале глубин, наличием пустот в цементном камне, плохим контактом цементного камня со стенкой скважины, не могут быть выявлены по данным АКЦ. Их необходимо устанавливать с помощью других измерительных акустических зондов, в первую очередь акустических сканеров, работающих на отраженных волнах с более высокой частотой, чем АКЦ.

Такое идилическое восприятие проблемы установилось в производственных организациях в последние лет двадцать. Одновременно продолжались попытки усовершенствования перечисленных постулатов. Возникло два направления: одно из них, названное их авторами условно волноводной версией существующей методики, связано с выяснением физической сущности процессов, обуславливающих распространение упругой волны (продольной) в обсаженной скважине. Используются принципы классической физики. Другое направление – пересмотр существующих представлений о распространении упругих волн в многослойной системе «обсадная колонна–цементный камень–горная порода», опирающийся на теорию образования обобщенных волн в многослойной среде.

Волновая версия АКЦ

Свободная (незацементированная) обсадная колонна, окруженная с двух сторон жидкостью, служит волноводом для упругих волн. В ней, как в свернутой тонкой пластине, распространяются только нормальные волны, образованные отражениями колебаний внутри колонны от ее стенок. Количество отражений значительно растет с увеличением отношения $\omega h / \vartheta_S$, где ω – круговая частота; h – толщина пластины; ϑ_S – скорость распространения поперечной волны в веществе пластины (колонны).

При малых толщинах пластины ($\omega h / \vartheta_S \ll 1$, что характерно для обсадных колонн и частот АКЦ) в ней возможно распространение только двух нормальных волн нулевого порядка: продольной и изгибной. Изгибная волна низкочастотная и низкоскоростная. Ее скорость на порядки меньше скорости распространения продольной волны. Продольная (волна Лэмба) напоминает продольную волну в неограниченном пространстве [13]. В ней преобладает продольная компонента смещения, но вследствие свободных границ пластины появляется небольшое поперечное смещение, которое в $\vartheta_S / \omega h$ раз меньше продольного. По этой причине фазовая скорость ϑ_L распространения волны Лэмба (L_K) меньше скорости продольной волны (ϑ_P) в неограниченном твердом теле и равна

$$\vartheta_L = \vartheta_P \sqrt{\frac{1-2\sigma}{(1-\sigma)^2}},$$

где σ – коэффициент Пуассона.

Значения интервального времени, измеренные геофизическими приборами в колоннах диаметром 127–245 мм, окруженными с двух сторон жидкостью, равны 183–185 мкс/м. Затухание волны в колонне – 3–5 дБ/м.

Обсадная и бурильная колонны – довольно несовершенные волноводы вследствие наличия многочисленных резьбовых соединений (муфт, переводников и пр.), соединяющих звенья колонны. Тем не менее достаточно высокие волноводные свойства колонн доказаны передачей по бурильной колонне в процессе бурения данных о зенитном угле и азимуте ствола скважины с глубины 2500 м [2]. В пределах небольших глубин, протяженностью в несколько длин обсадных труб, колонну несомненно можно считать хорошим волноводом.

Цементирование колонны увеличивает импеданс вещества в затрубном пространстве последовательно: жидкий тампонажный раствор, его схватывание и переход в твердое состояние, набор прочности цементным камнем. Соответственно перечисленным этапам ухудшаются волноводные свойства обсадной колонны. Энергия волны Лэмба перетекает из колонны в цементный камень и далее в горную породу или в следующую обсадную колонну (техническую, кондуктор, направление) [1, 6]. На материалах АКЦ это отражается увеличением затухания (α_k) волны Лэмба в колонне. Максимально, при полном наборе цементным камнем прочности и его сплошном контакте с обсадной колонной, оно достигает значения 30 дБ/м. Скорость распространения волны Лэмба в колонне остается постоянной до тех пор, пока ее еще можно измерить.

Энергия волны, ушедшая из колонны, возбуждает в породе (внешней колонне) упругие волны (P и S), которые регистрируются приборами АКЦ (рис. 1). Скорости распространения волн, возбужденных в породе

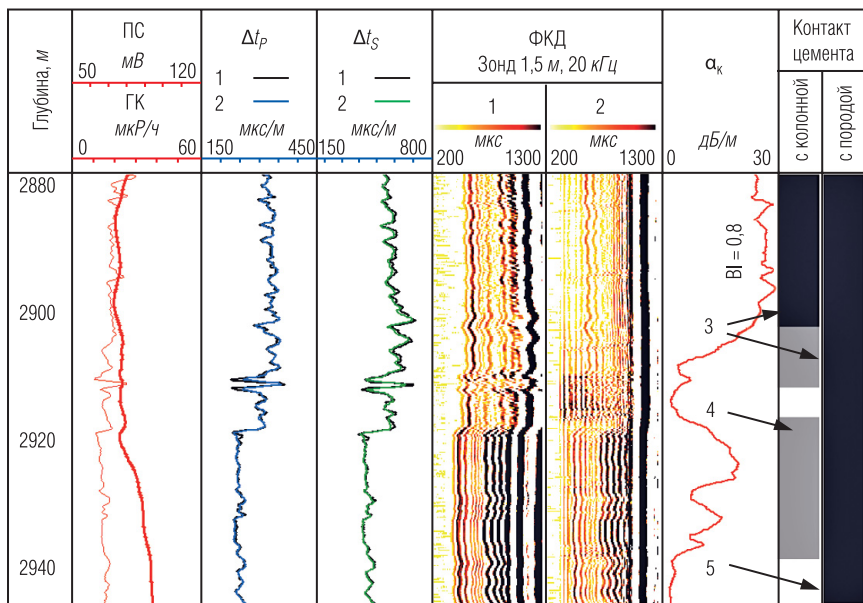


Рис. 1. Характеристики упругих волн в открытой (1) и обсаженной (2) скважине: 3–5 – контакт цемента с обсадной колонной и стенкой скважины: плотный, частичный, отсутствует

(внешней колонне), равны скоростям, измеренным в необсаженной скважине (или внешней колонне) с погрешностью приборов измерения. Последнее служит доказательством сплошного контакта цементного камня со стенкой скважины. Физическое объяснение этого заключается в следующем. В обсаженной скважине упругая волна, возбужденная излучателем в жидкости, достигает (после нескольких преломлений) стенок скважины и распространяется в породе или вдоль внешней колонны. Затем после тех же преломлений волна достигает приемника скважинного прибора, обеспечивая информацию о сплошности контактов на границах цементного камня с колонной и стенкой скважины либо об их отсутствии (разрывах сплошности контактов, включениях пузырьков жидкости или газа в цементе и др.).

В многоколонных конструкциях скважин при благоприятных обстоятельствах (все контакты цементного камня с колоннами частичные и сплошные) удастся зафиксировать муфты, как экстремальные включения в колонну, одновременно от нескольких колонн (рис. 2). Этот факт служит одним из доказательств, что на коротких базах измерений, свойственных АКЦ, в многоколонных конструкциях не образуется какая-то обобщенная волна. Другим доказательством служит редко наблюдающаяся регистрация упругой волны, распространяющейся в слое цемента между обсадной колонной и стенкой скважины. Считается, что такой тонкий слой, расположенный среди более высокоскоростных сред, служит транзитом энергии от одной среды к другой либо участвует в образовании обобщенной волны. На практике ее удалось зарегистрировать зондами длиной 1,0–1,8 м в интервале каверны против глинистых отложений (рис. 3). На фазокорреляционных диаграммах (ФКД) более длинных зондов она не проявляется вследствие затухания в пористом цементном камне.

Другие доказательства отсутствия обобщенной волны на коротких базах измерений приведены в комментариях к рис. 5.

Следовательно, два постулата, а именно постоянство скорости распространения волны Лэмба в колонне и ее независимое распространение в отдельных колоннах многоколонных конструкций, создают благоприятные условия для оценки качества их цементирования. Для этого необходимо сравнить фактически измеренные значения времени прихода t_k волны к приемнику для любого двухэлементного зонда с расчетными значениями. Они будут разными для колонн различного назначения (кондуктор, технические и эксплуатационная колонны), так как включают двойные времена распространения волны от акус-

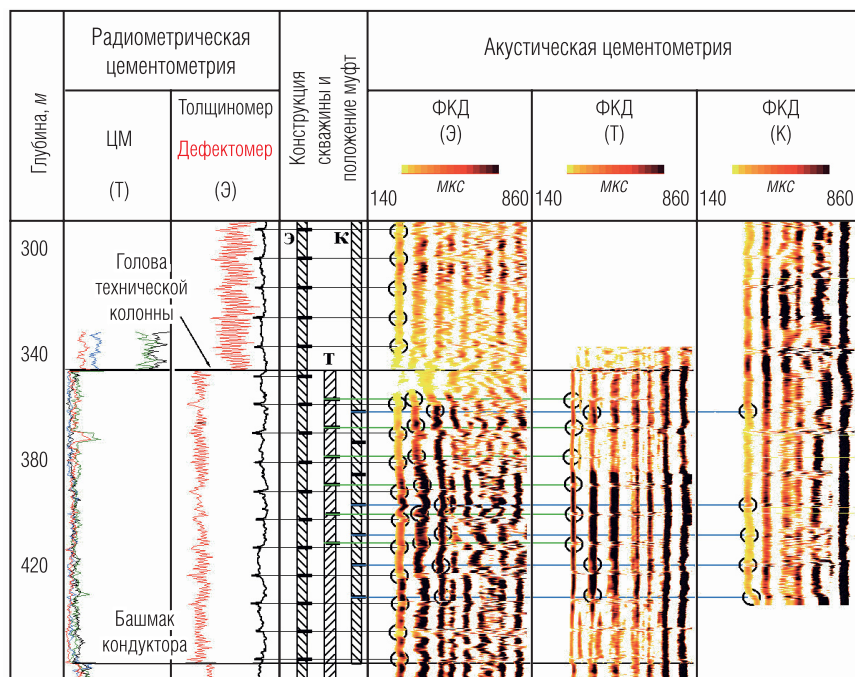


Рис. 2. Фиксация муфт кондуктора (К), технической (Т) и эксплуатационной (Э) колонн на фазокорреляционных диаграммах, зарегистрированных по мере строительства скважины [6]: в условиях частичных контактов цементного камня с обсадными колоннами на ФКД эксплуатационной и технической колонн хотя бы частично отражаются муфты ранее спущенных колонн

тического преобразователя к колонне и обратно в скважинах разных диаметров. Наглядно эта операция выполняется с использованием ФКД (рис. 4). Ее следовало бы ввести в алгоритм полуавтоматической интерпретации данных АКЦ.

Отсутствие сигналов между расчетными значениями для двух колонн свидетельствует о целиком заполненном межтрубном пространстве и сплошных контактах цементного камня со всеми внутренними колоннами. Количественная оценка качества цементирования выполняется по стандартной методике с тем лишь отличием, что началом временных диапазонов измерения затухания волны служат расчетные времена.

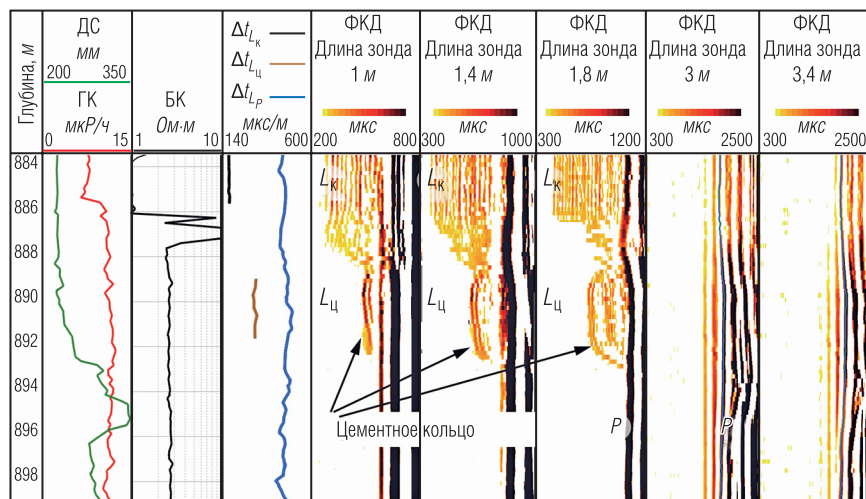


Рис. 3. Регистрация упругой волны, распространяющейся в цементном кольце между обсадной колонной и стенкой скважины: L_k , L_c – волны Лэмба в обсадной колонне и в цементном камне; P – продольная волна в породе

Теория обобщенных волн

Основным мотивом ее сторонников служит существование обобщенной волны, которая возникает в многослойной среде «обсадная колонна–цементный камень–горная порода». Первая доступная информация об этой волне появилась в книге, ставшей настольной для геофизиков, занимающихся исследованиями скважин [4], хотя не столь публичные данные были известны значительно раньше [7]. Экспериментальными данными установлено образование обобщенной волны [4, рис. 55]. В низкоскоростном разрезе ($\vartheta_n = 2600$ м/с) скорость ее распространения изменяется в зависимости от скорости волны в породе, если волновая толщина цементного камня не превышает $0,1 h/\lambda$ (где h – толщина цементного камня, λ – длина волны), до скорости в камне ($\vartheta_{cl} = 3100$ м/с) при h/λ больше 5. Для акустического каротажа превалирующая частота сигналов в породах близка к 15 кГц, если частота колебаний излучателей скважинных приборов составляет 20–25 кГц. Для такой частоты волновая толщина слоя цементного камня составит более 1 м ($\lambda = 0,2$ м; $h > 5\lambda$; $h > 1,0$ м), то есть такой слой должен рассматриваться как массив, под которым обычно понимают породы.

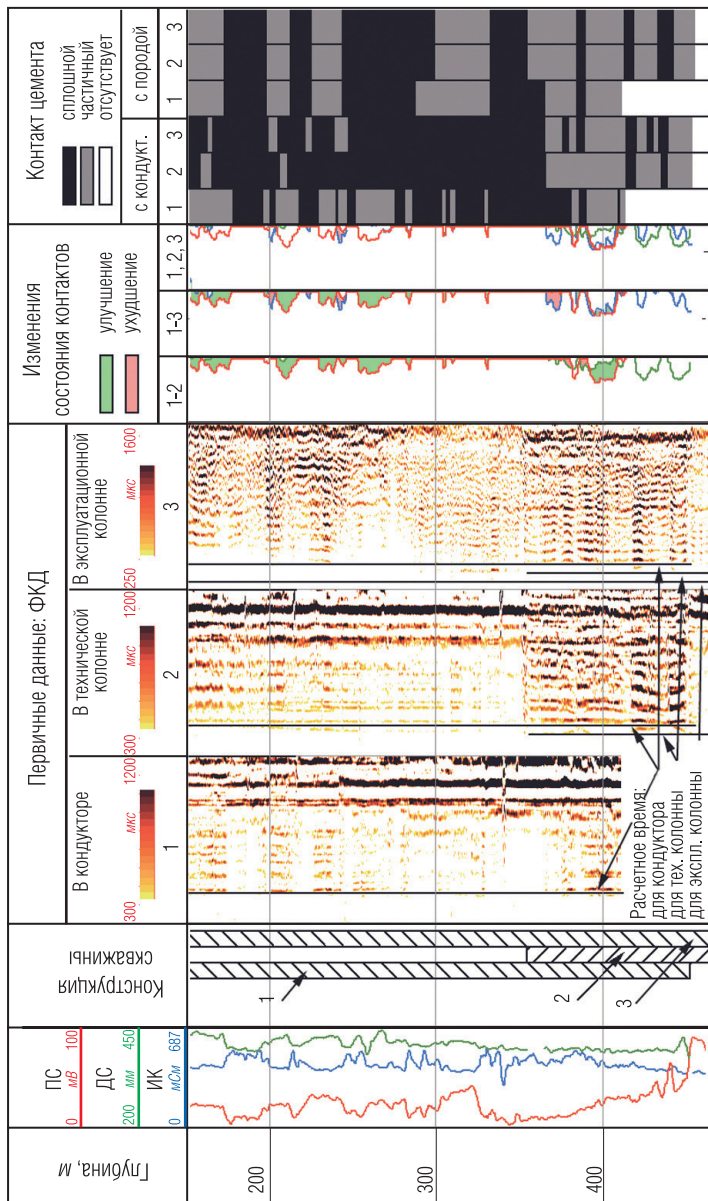


Рис. 4. Определение качества цементирования кондуктора на разных этапах строительства скважины (месторождение Каламкас) [6]: измерения выполнены через сутки после цементирования кондуктора (1), после спуска и цементирования (через 5 суток) хвостовика технической колонны (2) и после спуска и цементирования (через 34 дня) эксплуатационной колонны (3). Следует отметить, что качество крепления кондуктора улучшается со временем

Общепринятым стало утверждение, что в обсаженной скважине имеет место дисперсия скорости головных волн: по мере роста частоты (соответственно и отношения h/λ) скорость головных волн изменяется от скорости в породе до скорости «в обсадке» [3, с. 153; 4]. В зависимости от состояния контактов на границах цементного камня с колонной и породами образуются обобщенные волны, охватывающие все три составляющие «обсадная колонна–цементный камень–горная порода» или, если существуют жидкостные зазоры рядом с колонной либо стенкой скважины, пары составляющих «цементный камень–порода» и «колонна–цементный камень» соответственно.

На частотах ниже 15 кГц в случае жесткого и скользящего (наличие тонкого кольца жидкости) контакта цементного камня с колонной и жесткого с породами влияние камня на распространение обобщенных продольной и поперечной волн исчезающе мало [3, 4]. Скорости распространения и коэффициенты затухания обеих волн с погрешностью менее 1% соответствуют значениям, измеренным в открытом стволе [4]. В других работах уточняется, что это справедливо только для достаточно длинных зондов [10]. Частично это утверждение основано на убеждении, что при жестких контактах камня с колонной и с горной породой в обсадной колонне в диапазоне частот 0,5–50 кГц нормальная волна не распространяется, а в первых вступлениях регистрируется обобщенная волна [4, 10].

Натурный эксперимент, выполненный в скважине, скорее подтверждает волноводную версию АКЦ, чем теорию образования обобщенных волн. В приборе, выполненном на основе стандартного прибора АКЦ, в нижней его части закреплена винипластовая труба, в которой приемник упругих колебаний совершает поступательное перемещение вниз–вверх [12]. Расстояние между излучателями прибора АК – 0,5 м; минимальное расстояние приемника от ближнего излучателя – 0,35 м.

Инициирование движения приемника осуществляется при остановке скважинного прибора. Итог исследования – годографы волн, приходящих к непрерывно движущемуся приемнику (рис. 5). В низкоскоростном разрезе (в данном примере скорость распространения ϑ_p продольной волны равна 3300 м/с) на годографах выделяется 4 типа волн [5, 6]. В первых вступлениях это волна Лэмба L_k в обсадной колонне. Вопреки [4, 10], на коротких базах измерений эта

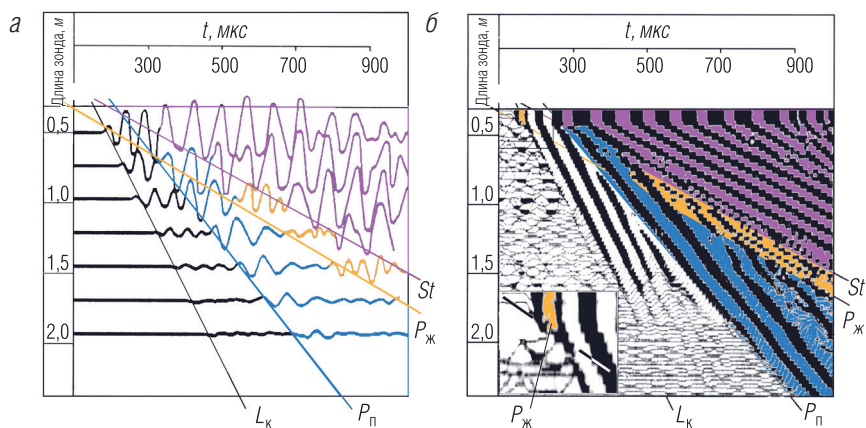


Рис. 5. Волновые картины (а) и годографы (б) упругих волн, полученные в обсаженной скважине прибором с изменяющимися длинами измерительных зондов [5]

волна возбуждается и распространяется. Интервальное время Δt_k равно 184 мкс/м. С увеличением длины зонда ИП интенсивность колебаний этой волны уменьшается вследствие перетоков ее энергии в цементный камень и далее в горные породы. Волна вырождается на удалении от излучателя, равном 1,7–1,9 м. На таком же расстоянии исчезает волна Лэмба в цементном камне (рис. 3).

Второй по времени прихода является продольная (головная) волна P_n , распространяющаяся в породе. Амплитуды ее первых вступлений заметно уменьшаются для зондов длиной более 1,75 м; регистрируемые скорости распространения также будут уменьшаться (Δt_p увеличивается). Причиной этого служит отфильтровывание наиболее высокочастотных составляющих, но вовсе не обобщение с другой, более низкоскоростной, к тому же отсутствующей в данном примере волной. Волна Лэмба L_k в колонне является более высокоскоростной.

На фоне затухающих колебаний волны P_n присутствуют колебания волны P_j , распространяющейся в жидкости. Они наиболее высокочастотные в волновом пакете (согласно [3] наоборот). Волновой фронт волны плоский и совпадает с поперечным сечением кольцевого зазора между стенкой скважины и прибора. Фазовая скорость волны P_j не зависит от частоты и равна ее скорости ϑ_j в неограниченном объеме. Следует обратить внимание на равенство значений ϑ_j , измеренных

при малой длине зонда, которая недостаточна для образования какой-либо отраженной волны (рис. 5, б, выноска в левом нижнем углу), и зондом длиной 1,5 м. Волна нулевого порядка не характерна для волноводного распространения и быстро затухает с расстоянием.

Последние фазовые линии на рис. 5, а, б принадлежат интенсивным колебаниям низкочастотной волны Стоунли, распространяющейся вдоль границы жидкости с твердой средой (обсадной колонной или горными породами в необсаженной скважине) в пределах одной длины волны в каждой среде. Если одна из них представлена жидкостью, а вторая – твердой средой, то $\vartheta_{Sl} < \vartheta_{ж}, \vartheta_S, \vartheta_P$. Скорость распространения, амплитуды и затухание этой волны определяются характеристиками смежных сред, в том числе в горных породах – их проницаемостью. Это ни в коем случае не связано с наличием гидродинамической связи пород с флюидом в стволе скважины. Математическим моделированием доказано, что любые динамические изменения в околоскважинном пространстве, глубина которых достигает длины волны, способствуют образованию радиальной компоненты пластового давления и перераспределению флюида в прискважинном пространстве [11].

Заключение

Современная идеология акустической цементометрии, основанная на постулатах классической физики, позволяет объяснить без издержек поведение упругих волн в условно свободной (окруженной жидкостью) обсадной колонне. Она затрагивает также заполнение затрубного пространства цементной смесью, ее схватывание и набор прочности. Волноводная версия, полностью принадлежащая классической физике, служит деталью, позволяющей понять физику протекающих процессов.

Современная теория обобщенных волн базируется на физике Френеля-Био. Все ее элементы доказательств выполнены с помощью математического моделирования и подтверждаются результатами других авторов, полученными также математическим моделированием. Они не проверялись в реальных условиях. Возможно со временем она (теория) заменит классическую теорию возбуждения и распространения упругих волн. Но для этого необходимо получить убедительные доказательства принадлежности волны Стоунли и бесконечного количества «псевдорелеевских» волн к нормальным

волнам [9], изменений коэффициента расхождения волны (наверное, Лэмба) в колонне как в волноводе [8] и в породах в зависимости от длины зонда [10], существовании неуловимой продольной волны второго рода в коллекторах [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю. Н. и др. Теория методов ГИС: Учебник / Под ред. Д. А. Кожевникова. М.: ИЦ РГУНГ им. И. М. Губкина, 2015. С. 618.
2. Беляков Н. В. Интегрированные геофизические исследования бурящихся скважин. М.: Физматкнига, 2008. 208 с.
3. Горбачев Ю. И. Геофизические исследования скважин: Учебник для вузов / Под ред. Е. В. Каруса. М.: Недра, 1990. 398 с.
4. Ивакин Б. Н., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. Акустический метод исследования скважин. М.: Недра, 1978. 320 с.
5. Козяр В. Ф., Белоконь Д. В., Козяр Н. В. Успехи и недостатки применения акустического каротажа. Направления развития теории и практики на ближайшее время // Сб. трудов XI сессии Рос. акуст. общ. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 155–158.
6. Конисов А. К., Козяр Н. В. Акустическая цементометрия обсадных колонн приборами с цифровой регистрацией данных. Алматы, 2009. 192 с.
7. Кузнецов О. Л. Предпосылки применения акустических методов при решении некоторых задач нефтепромысловой геологии: Дисс. ... на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М.: ИГИРГИ, 1967. 222 с.
8. Маркова И. А., Казаков А. М., Лохматов В. М. О геометрическом коэффициенте расхождения зондов акустического каротажа // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 4 (169). С. 136–144.
9. Маркова И. А., Казаков А. М., Лохматов В. М. Синтетические волновые картины акустического каротажа для скважины, содержащей горизонтальную систему микротрещин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2008. Вып. 4 (169). С. 125–136.
10. Маркова И. А., Садовничий С. Н. Фактор геометрического расхождения головных волн в обсаженных и необсаженных скважинах // Физика Земли. 2011. № 9. С. 83–90.
11. Разработка методического и петрофизического обеспечения волнового акустического каротажа: Заключит. отчет ИГ при РГУ им. И. М. Губкина по договору № 99-31-356.
12. Рафиков В. Г., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф. Аппаратура акустического каротажа с изменяющейся длиной зонда // Геофизическая аппаратура. 1974. Вып. 56. С. 84–89.
13. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.

Рецензент канд. техн. наук В. Н. Даниленко