

Научные обзоры

УДК 550.834

В. Ф. Козяр, Н. В. Козяр

ВОЛНЫ ЛЭМБА И СТОУНЛИ В СКВАЖИНЕ И РЕШАЕМЫЕ С ИХ ПОМОЩЬЮ ЗАДАЧИ ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ

Дан обзор применения волн Лэмба и Стоунли для решения различных геолого-геофизических, геолого-технологических и технических задач в скважинах.

Ключевые слова: акустический каротаж, Волны Лэмба и Стоунли, проницаемость, контроль цементирования.

Противоречивость публикаций

Применение цифровой регистрации данных акустического каротажа (АК) резко подняло интерес к волнам Лэмба и Стоунли, параметры которых применяют для решения различных геологических и технических задач. Среди них выделение коллекторов с различной структурой порового пространства, прогнозирование и определение интервалов развития трещин гидроразрыва, оценка качества цементирования обсадных колонн и др.

Во времена аналоговой регистрации первичных данных АК публикации об этих волнах принадлежали преимущественно геофизикам-теоретикам. Они не особенно интересовали специалистов производственных организаций, не имевших возможности регистрировать эти волны и измерять их характеристики. Поэтому только в последние годы нарастает количество сообщений геофизиков-практиков о попытках применения характеристик этих волн для решения геолого-геофизических задач. Стало очевидным, что авторы разных публикаций (теоретики и практики), как правило, не понимают друг друга.

Основные причины создавшейся ситуации заключаются в следующем. Геофизики-теоретики, а в публикациях они занимают доминирующее положение, не затрудняют себя созданием какой-либо единой теории распространения волн Лэмба и Стоунли или хотя бы единой терминологии. Проявилось четкое разделение публикаций на две группы, впервые это отмечено в [5]. В одной группе приоритет принадлежит классической теории ультразвука, связанной с именами лорда Рэлея, Лэмба, Н. Е. Жуковского и др. [4, 24, 35]. В другой предпочтение отдается “волновой”, или “динамической” теории Френкеля–Био–Розенбаума о распространении упругих волн в скважине, пересекающей пористые среды. “Волновой” теории принадлежит преобладающее количество публикаций.

Терминология авторов публикаций не имеет ограничений. В опубликованных источниках волны Лэмба и Стоунли фигурируют под следующими названиями: гидроволны [17, 19, 30, 34]; волны псевдорэлеевские [20, 27, 46]; волны Стоунли [25–27, 44] или Лэмба–Стоунли [9, 10, 18, 19, 23, 28, 33]; трубные волны [10, 37, 42, 43]. В работе [17] определено, что при стремлении частоты колебаний к нулю фазовая скорость гидроволны становится равной скорости “так называемой волны Лэмба”, а при увеличении частоты (в идеале до бесконечности) – монотонно приближается к скорости поверхностной волны Стоунли на плоской границе жидкости и твердого тела. Этим же свойством обладает трубная волна в работе [10]. Термин “трубная волна”, активно используемый в англоязычной литературе, соответствует волне Стоунли [37, 42]. С гидроволной также нельзя смешивать водную волну [17] и прямую гидроволну [10], фазовые скорости которых равны скорости звука в безграничной жидкости.

Большинство перечисленных наименований – волны водные, гидро-, трубные, гибрид нормальной волны Лэмба и поверхностной Стоунли – неизвестны в физике ультразвука [4, 11, 12, 24, 35].

Неустоявшаяся терминология не способствует восприятию новшеств геофизиками-практиками. Еще в большей степени обескураживают противоречивые выводы о возможности применения характеристик волн Лэмба и Стоунли для решения практических задач. Вот только два примера. Определение проницаемости пород с использованием характеристик волны Стоунли разные авторы оценивают как достижимое на количественном уровне [37, 38, 48, 51], то же самое

справедливо, если проницаемость превышает 100 мД [19], что невозможно в принципе для межзерновых коллекторов [33]. Глинистая корка, как правило, не влияет на результаты определений [26, 49], ее влияние может быть учтено [48]. В работах [23, 33] исключается возможность определения проницаемости.

Подобным сомнениям подвергнуто применение характеристик волны Лэмба (в акустической цементометрии ее именуют “волной по колонне”) для оценки качества цементирования обсадных колонн. Казалось бы, почти за 70-летнюю историю развития акустической цементометрии (АКЦ) ее основные положения сознательно или интуитивно изучены. Степень заполнения затрубного пространства цементным камнем и прочность его контакта с колонной оценивают по значениям затухания или только амплитуд волны (Лэмба) по колонне в фиксированном временном интервале. Положение этого интервала определяется постоянной скоростью волны в материале колонны. Контакт цементного камня со стенкой скважины определяют по появлению в регистрируемых волновых пакетах объемных продольной и поперечной волн, распространяющихся в горных породах за колонной и цементным камнем.

Тем не менее появляются публикации о существовании в слоистой системе “обсадная колонна – цементный камень – порода” обобщенных волн [7, 8], скорость распространения которых изменяется в зависимости от соотношения толщин слоев (обсадной колонны, цементного камня, горной породы) и скоростей волн в них. Идея подхвачена из сейсмики слоистых сред [6] и ничем не подкреплена для коротких баз измерений, конкретных толщин слоев и применяемых частот. Авторы не подозревают, что этим самым они исключают АКЦ из средств измерения. В работе [27] внесено еще одно сомнение: в свободной незацементированной колонне, которую авторы публикации признают хорошим волноводом, затухание волны связано также с геометрическим коэффициентом расхождения. С этим утверждением можно было бы спорить, если бы оно не относилось к волноводу, и уже по этой причине абсурдно.

Ниже рассмотрены с учетом описанного информационного поля условия возбуждения и существования волн Лэмба и Стоунли в скважинах и возможность практического применения их характеристик для решения различных геологических и технических задач. Размеры

и частоты преобразователей скважинных приборов, конструкции скважин, упругие характеристики сред соответствуют реально наблюдаемым при акустическом каротаже и акустической цементометрии.

Используемые определения

Для упрощения дальнейшего изложения в качестве исходных позиций приняты определения физических величин, известные и неоспоримые в настоящее время в физике ультразвука [4, 11, 24, 35].

Нормальные волны распространяются в телях ограниченных размеров (волноводах) без изменения формы. Во всех волноводах на сколь угодно низких частотах распространяется с постоянной скоростью нормальная волна нулевого порядка. Для волн более высоких порядков (мод) существуют критические частоты, ниже которых они не распространяются. Для волновода в виде круглой трубы, заполненной водой или газом, значение критической частоты (ω_{kp}) определяется выражением

$$\omega_{kp} = n\pi v/r, \quad (1)$$

где n – номер моды; v – скорость волны в неограниченной среде воды или газа; r – внутренний радиус трубы. Для цилиндрической скважины диаметром 0,2 м нормальные волны высших (ненулевого) порядков не могут распространяться в газовой среде на частотах ниже 1,65 кГц, а при заполнении водой – 7,5–8 кГц.

Существование единственной (без волн высших порядков) волны нулевого порядка в твердой пластине ограничено выражением $\omega h/v_s \ll 1$ (где h – толщина пластины; v_s – скорость поперечной волны в материале пластины), а нормальной поперечной волны – $h < \lambda_s/4$ (где λ_s – длина поперечной волны в материале пластины).

Волны Лэмба распространяются в твердой пластине (слое) или стержне со свободными границами. При малой толщине пластины ($\omega h/v_s \ll 1$) в ней возможно распространение только двух волн нулевого порядка: продольной и изгибной. Продольная волна (далее будет обозначена литерой L) похожа на продольную волну P в неограниченном пространстве. В ней преобладает продольное смещение частиц, и только вследствие того, что поверхности пластины свободные, появляется небольшое смещение, которое в $v_s/\omega h$ раз меньше продольного. Фазовая скорость v_L продольной волны Лэмба меньше

скорости распространения v_p продольной волны в неограниченном массиве, не зависит от частоты и определяется по формуле

$$v_L = v_p \sqrt{\frac{1-2\nu}{(1-\nu)^2}}, \quad (2)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Изгибная волна обладает чрезвычайно выраженной дисперсией скорости распространения в зависимости от частоты колебаний и толщины пластины. Значения скорости изгибной волны всегда намного меньше v_L .

Кроме плоских пластин из однородного изотропного материала, волны Лэмба распространяются в искривленных пластинах и в пластинах с неоднородными механическими свойствами, что характерно для обсадных колонн.

Волна Стоунли – один из типов *поверхностных* волн, распространяющихся вдоль границы твердого тела с другими средами и затухающие при удалении от границы раздела. Если второй средой служит сильно разреженная газовая среда, то это будет *волна Рэлея*. Ее энергия сосредоточена в поверхностном слое твердого вещества толщиной от λ до 2λ . Фазовая скорость волны Рэлея (v_R) примерно равна $0,9 v_S$, где v_S – фазовая скорость плоской поперечной волны. Если второй средой служит жидкость, то вдоль границы распространяется волна Стоунли (или Стонли, Stoneley). Фазовая скорость v_{St} волны Стоунли меньше значений продольной и поперечной волн в обеих средах, то есть $v_{St} < v_p, v_S, v_*$, где v_* – скорость волны в жидкости.

В обеих средах волна Стоунли распространяется с затуханием, обычным для объемных волн. Энергия волны убывает экспоненциально от границы. В твердом теле она распространяется в слое толщиной $0,5 \lambda_*/\pi$ (где λ_* – длина этой волны в жидкости), а в жидкости – в слое толщиной, значительно превосходящей λ_* .

Скорость распространения и затухание волны Стоунли в пористых средах зависят также от проницаемости.

Волновод – ограниченный в одном или в двух направлениях участок среды, в котором распространяются упругие волны. Различают два типа волноводов. Первый – это слой или труба с жесткими или податливыми стенками. Примером волновода с жесткими стенками служат переговорные трубы на кораблях старой постройки и обычные водопроводные трубы. Второй – твердые пластины и стержни.

В цилиндрической трубе радиусом r , заполненной газом или жидкостью, могут существовать различные моды нормальных волн. Если частота колебаний меньше наименьшей критической, то в волноводе распространяется с постоянной скоростью v_g или v_{∞} волна нулевого порядка. Труба считается узкой для распространения нормальных волн. Критерий узкой трубы определяется выражением (1) и достигается, если $r < 0,61\lambda$ [11, 24]. Волна нулевого порядка не характерна для волноводного распространения, поэтому скорость ее распространения равна скорости v_g в массиве газа или v_{∞} в массиве жидкости.

Если радиус трубы несколько превышает $0,61\lambda$, то в трубе одновременно распространяются нулевая и первая моды колебаний. При превышении $0,82\lambda$ распространяются нулевая, первая и вторая моды и т. д., то есть при значениях радиуса трубы более $0,61\lambda$ происходит волноводное распространение нормальных волн.

В пластинах и в стержнях ограниченных размеров со свободными границами происходит совместное распространение продольных и сдвиговых колебаний (волны Лэмба и поперечные).

Изменение на порядок и более условий распространения упругих колебаний (частот колебаний, размеров сред) обуславливает появление в ограниченных средах различных типов волн – плоских продольных, сдвиговых, нормальных, поверхностных. Но в одних и тех же условиях не возникают гибриды этих волн, в том числе нормальной волны Лэмба и поверхностной волны Стоунли.

Волна в скважинной жидкости

Столб промывочной жидкости и незацементированная обсадная колонна представляют собой два потенциальных волновода в стволе скважины.

В тонком слое промывочной жидкости, который находится между скважинным прибором и стенкой скважины, нормальная волна нулевого порядка распространяется со скоростью, равной скорости в неограниченном массиве этой жидкости. Частотный спектр волны наиболее высокий по сравнению с другими типами волн (объемными продольной и поперечной, Стоунли) и близок к спектру излучателя. Волна быстро затухает вследствие непрерывного переизлучения энергии в породы. Ее можно обнаружить на фазокорреляционных

диаграммах (ФКД) в интервалах разреза, в которых по каким-то причинам затухают объемные и Стоунли волны (рис. 1).

Нормальные волны, у которых критические частоты ω_{kp} больше, чем частота возбуждения, не могут распространяться вдоль слоя. Волновые числа и фазовые скорости для них являются мнимыми величинами. Поэтому вместо бегущих волн высших порядков в волноводе образуются стоячие колебания с амплитудами, быстро уменьшающимися с увеличением расстояния.

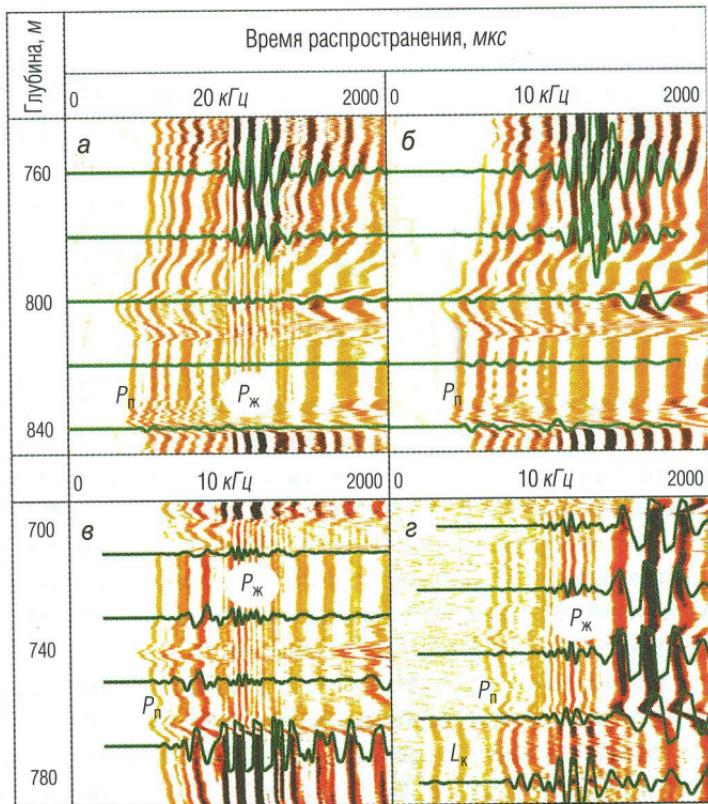


Рис. 1. Волны в скважинной жидкости:

а, б – в необсаженной скважине на частотах излучателя, равных 10 и 20 кГц соответственно; в, г – в открытом и обсаженном стволе в том же интервале на частоте 10 кГц; P_n , P_j и L_k – продольные волны в породе, скважинной жидкости и в обсадной колонне (волна Лэмба) соответственно

Волна Лэмба

Незацементированная обсадная колонна является волноводом, пусть и неидеальным. Неидеальность обусловлена тем, что в скважине колонна окружена жидкостью, поэтому ее поверхности не совсем свободные. Кроме того, целостность колонны, как волновода, нарушают муфты, соединяющие отдельные секции колонны. Тем не менее, используя колонну в качестве звукопровода, удалось передать на дневную поверхность информацию технологических датчиков, расположенных вблизи породоразрушающего инструмента, с глубины 2775 м [2, 3].

Скорость распространения волны Лэмба в колонне определяется выражением (2). В диапазоне изменений коэффициента Пуассона в твердых телах ($0,25 < \nu < 0,35$) она близка $0,9 v_p$. По данным отечественных исследователей она равна в колоннах диаметром 127–314 мм 5430 м/с (значение интервального времени $\Delta t_k = 1/v_1$ принимают равным $184\text{--}185 \text{ мкс/м}$) [16, 29]. В зарубежных источниках значение скорости составляет 5450 м/с , а $\Delta t_k = 187 \text{ мкс/м}$ [39, 47]. Столь небольшое различие может быть обусловлено составом сталей, применяемых для изготовления обсадных колонн.

Хотя в физике ультразвука постоянство скорости распространения волны Лэмба в конкретном волноводе не подлежит сомнению, покажем, что этот постулат сохраняется в скважинных условиях. Одновременно приведем доказательства, что в имеющих место соотношениях толщин обсадных колонн и цементных стаканов между ними, скоростей распространения волн Лэмба в этих средах на частотах АКЦ и коротких базах измерений в многоколонных конструкциях в каждой колонне распространяется своя волна Лэмба, вовсе не обязанная образованию обобщенной волны.

Существование в обсадной колонне независимой (необобщенной) волны Лэмба доказано построенными без вмешательства оператора гидографами волн, распространяющихся в скважине и в околоскважинном пространстве (рис. 2) [13]. Их получили с помощью скважинного прибора с изменяющимися длинами измерительных зондов [31]. В приборе, полностью воспроизводящем геометрию АК, при остановке скважинного зонда инициируется движение (в винилластовой трубе) приемника упругих колебаний, возбуждаемых двумя излучателями, разнесенными на 0,5 м. Регистрация и отображение данных произ-

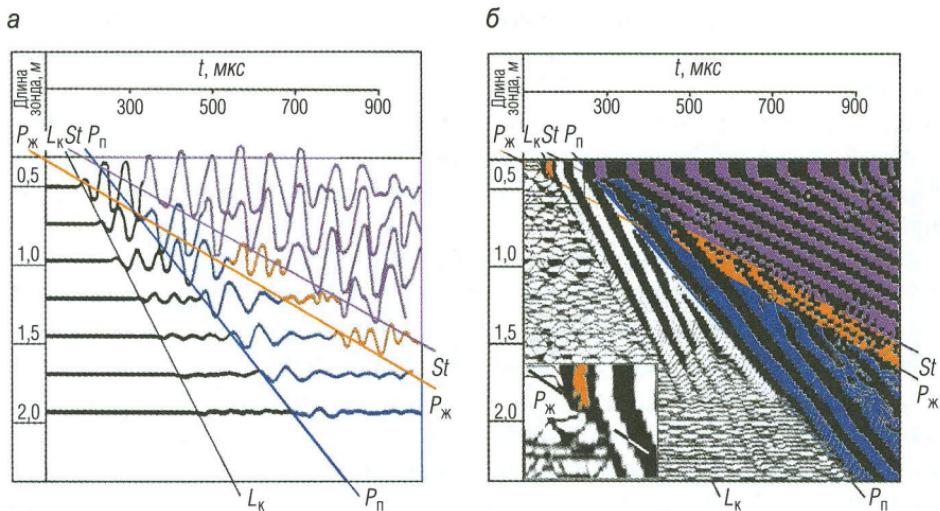


Рис. 2. Волновые пакеты (а) и годографы (б) упругих волн, полученные в обсаженной скважине прибором с изменяющимися длинами измерительных зондов [49]. Литерами обозначены волны: $P_{ж}$ – в скважинной жидкости; L_k – Лэмба в колонне; St – Стоунли; P_n – продольная в породе

водятся на дневной поверхности синхронно с движением приемника средствами каротажной лаборатории.

Минимальное расстояние между приемником и ближним излучателем составляло 0,35 м. В скважинах, обсаженных колонной диаметром 140–168 мм, минимальная длина зонда позволяет зарегистрировать в первых вступлениях волну $P_{ж}$ в скважинной жидкости (рис. 2, б, увеличение в левом нижнем углу), так как эта длина зонда еще недостаточна для образования волны в колонне.

Волновые пакеты и годографы содержат информацию о четырех типах волн, начиная с момента их образования. Три из них распространяются в разных средах: в скважинной жидкости ($P_{ж}$), обсадной колонне (L_k) и в горной породе (продольная головная волна P_n). Колебания поперечной волны (P_s) отсутствуют, так как соотношение $v_s/v_{ж}$ неблагоприятно для ее образования. Самой медленной волной, интенсивные колебания которой прослеживаются в волновых пакетах и на годографах, является низкочастотная поверхность волна Стоунли (St). Ее свойства будут описаны ниже.

Годографы перечисленных волн представляют собой относительно прямые линии, характеризующие не совсем однородные породы, и не представляют каких-либо доказательств объединения колебаний в единую обобщенную волну. В условиях безупречно зацементированной обсадной колонны колебания волны Лэмба быстро затухают. При длине зонда, превышающей 1,3 м, годографы этой волны не наблюдаются.

Тот же вывод об отсутствии обобщенной волны, по крайней мере на коротких базах измерений, получают с помощью стандартных приборов АКЦ в условиях неполного цементирования обсадных колонн [16]. Действующие нормативные документы определяют его как “частичные контакты цементного камня с колонной”. В этих условиях каждое измерение АКЦ в кондукторе, технической и эксплуатационной колоннах фиксирует в своих материалах (фазокорреляционные диаграммы ФКД, кривые Δt_k , α_k) положения соединяющих муфт (рис. 3). На последней ФКД, зарегистрированной в эксплуатационной колонне, заметны следы муфт технической колонны и кондуктора. В работе [16] сделаны два важных для интерпретации вывода:

- в каждой колонне может распространяться только ей присущая волна Лэмба, время распространения которой от излучателя к приемнику может быть заранее рассчитано для ФКД исходя из постоянного значения Δt_k , диаметров колонны и преобразователей и скорости волны в скважинной жидкости;
- при высоком качестве цементирования внутренней колонны (эксплуатационной, технической) возможна достоверная оценка цементирования следующей внешней колонны (технической, кондуктора).

Затухание (α_k) волны Лэмба (L_k) в “свободной (незацементированной)” обсадной колонне, погруженной в промывочную жидкость, зависит от ее диаметра и толщины стенки. Они измерены в разные годы на частотах 20–25 кГц и изменяются от 3,8 дБ/м в колоннах диаметром 127 мм до 0,5 дБ/м для колонн диаметром 327 мм [29, 32, 39]. С уменьшением основной частоты излучателя до 16 кГц значения α_k увеличиваются по данным различных источников на 20–50% [8, 32]. Дополнительное затухание на муфтах колонны оценивается в 5–7 дБ/м [16, 32].

Затухание (эффективное) α_k увеличивается на порядок по мере замены в затрубном пространстве промывочной жидкости на цемен-

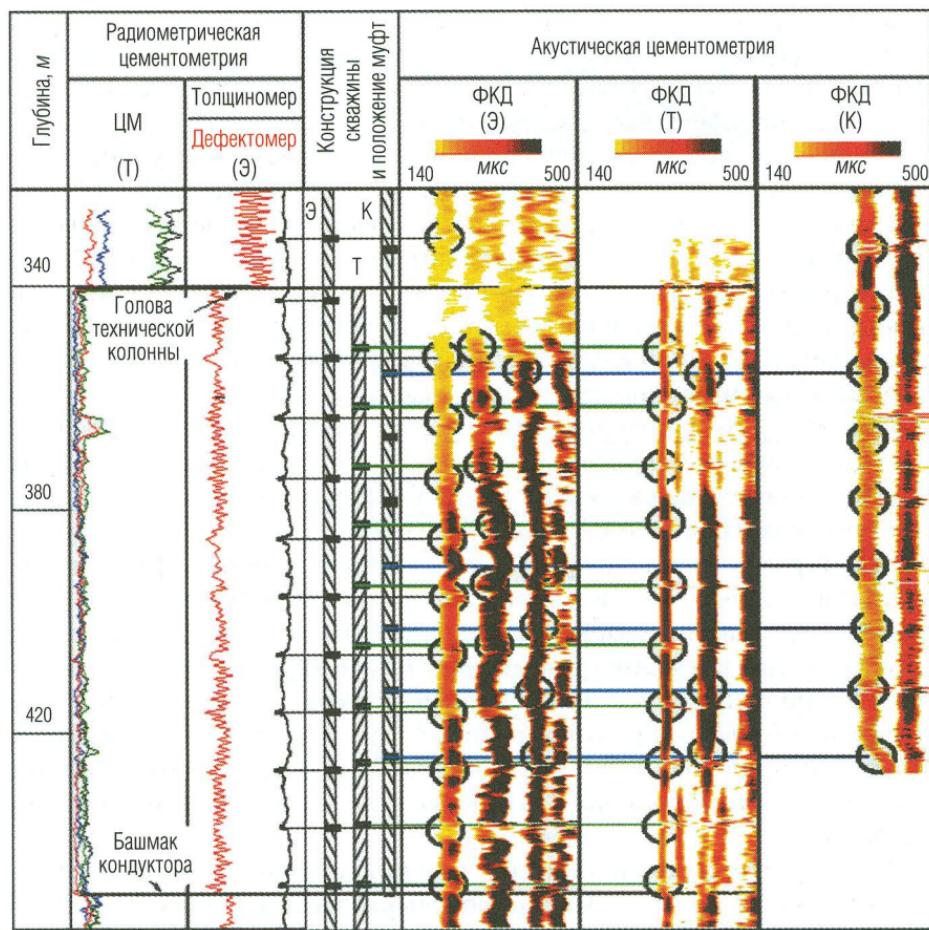


Рис. 3. Фиксация муфт кондуктора (К), технической (Т) и эксплуатационной (Э) колонн на фазокорреляционных диаграммах: в условиях частичных контактов цементного камня с обсадными колоннами. На ФКД эксплуатационной колонны хотя бы частично отражаются муфты технической колонны и кондуктора

тирующий раствор, его превращения в цементный камень и набора последним механической прочности. Причиной этому служит потеря обсадной колонной волноводных свойств по мере увеличения импеданса среды за колонной и его сближения с импедансом самой колонны. Энергия волны перетекает из колонны в цементный камень

и далее в горные породы, формируя в них объемные продольную и поперечную волны. Увеличение α_k является инструментом оценки контактов цементного камня с обсадной колонной и степени заполнения цементным камнем затрубного пространства.

Полная потеря колонной волноводных качеств наступает, если затрубное пространство полностью заполнено цементным камнем и последний контактирует с обсадной колонной по всей ее поверхности (рис. 4). В этом случае амплитуды колебаний волны Лэмба соизмеримы с амплитудами шумов (акустических и электронных) и в первых вступлениях волнового пакета регистрируются колебания объемной продольной волны, распространяющиеся в горных породах в околоскважинном пространстве. Появление этой волны и равенство скоростей v_p (или интервального времени Δt_p) ее распространения значению, зарегистрированному в открытом стволе скважины, служит доказательством надежных (сплошных) контактов цементного камня со стенкой скважины и с обсадной колонной (рис. 4).

В интервалах одиночной эксплуатационной колонны эффективное затухание волны Лэмба в колонне, вызванное перетеканием энергии в цементный камень и горные породы, достигает своего достижимого максимума регистрации, равного 30 дБ/м. Коэффициент BI (bondex index) заполнения затрубного пространства превышает граничное значение 0,8. Фазокорреляционные диаграммы фиксируют колебания объемной продольной волны в породах. Считается, что в данном случае контакты цементного камня с колоннами и горными породами сплошные.

В интервале двухколонной конструкции, представленной эксплуатационной и технической колоннами, энергия волны Лэмба перетекает из эксплуатационной колонны в техническую. Если за последней находится сплошной цементный камень, то энергия волны перетекает в горные породы или в следующую обсадную колонну (кондуктор). Во временном интервале между временами распространения t_k волны Лэмба в обеих колоннах колебания упругих волн отсутствуют. Исключения составляют тонкие прослои карбонатизированных песчаников, в которых $\Delta t_p > \Delta t_k$, а также интервалы межтрубного и затрубного пространств с дефектами цементирования. По данным радиометрической цементометрии (толщиномер ТМ и дефектометр ДФ) в таком интервале фиксируется открытый канал в цементном камне, по-видимому, за технической колонной.

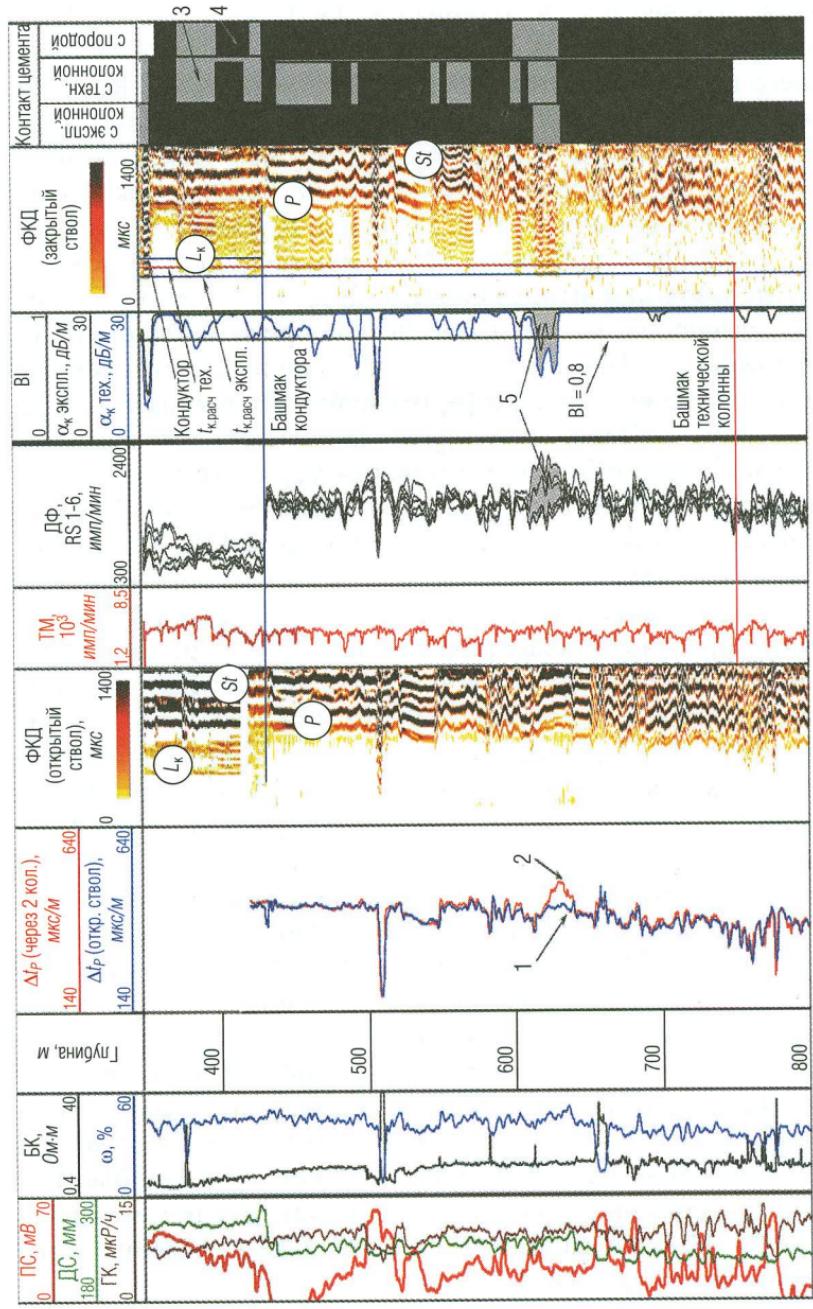


Рис. 4. Определение качества цементирования эксплуатационной и технической колонны, кондуктора по материалам исследований, выполненных в эксплуатационной колонне:

1, 2 – значения Δt_p , измеренные в открытой и обсаженной двумя колоннами скважине; 3, 4 – частичный и сплошной контакт цементного камня с обсадными колоннами; 5 – канал в цементном камне

Этот канал отмечается на материалах АКЦ увеличением Δt_p и уменьшением α_k . Значения ВИ становятся меньше граничного, соответствующего полному заполнению затрубного пространства.

Однозначная интерпретация первичных данных АКЦ, полученных стандартными приборами, осложняется, если цементный камень содержит различные дефекты: кольцевые микрозазоры между камнем и обсадной колонной, неполное заполнение цементным камнем каверн, включения невытесненной промывочной жидкости в верхней части интервала цементирования и т. п. Для их идентификации разработаны разнообразные технологические приемы. Основные из них – исследования АКЦ, выполненные на различных частотах волн, возбуждаемых в обсадной колонне [8, 16], или на постоянной частоте, но при различном внутреннем давлении на колонну. Как правило, эти исследования выполняют при открытом устье скважины и при создании на устье избыточного давления, которое “раздувает” колонну, увеличивая ее диаметр на десятки микрометров [22, 23, 45, 50].

Покажем нетривиальность результатов таких исследований. В скважине, пробуренной на одном из месторождений Западной Сибири в 1995 г., зафиксировано неудовлетворительное цементирование верхней части технической колонны (рис. 5). Материалы исследования эксплуатационной колонны, перекрывшей этот интервал глубин, еще более неубедительны. Следующее исследование интервала выполнено в 2007 г. Результаты исследований двух колонн, технической и эксплуатационной, на частоте 20 кГц, стандартной для АКЦ, повторяют предыдущие: за исключением небольших интервалов, тампонаж колонны неудовлетворительный. Однако одновременно выполненное исследование на частоте 4 кГц раскрывает причину неудовлетворительных результатов АКЦ. Между цементным камнем в затрубном и межтрубном пространствах и обсадными колоннами существуют микрозазоры, раскрытость которых не превышает 100 мкм. Эта оценка сделана по давлению опрессовки колонны. Такая раскрытость достаточна для того, чтобы исключить отток энергии из колонны на частоте 20 кГц. Но для более низкой частоты эти зазоры прозрачные [8, 16]. По всему низкоскоростному разрезу фиксируется объемная волна в породе. Движение флюидов в таких каналах при перепаде давлений до 25 МПа по данным математического и физического моделирования ничтожно [1].

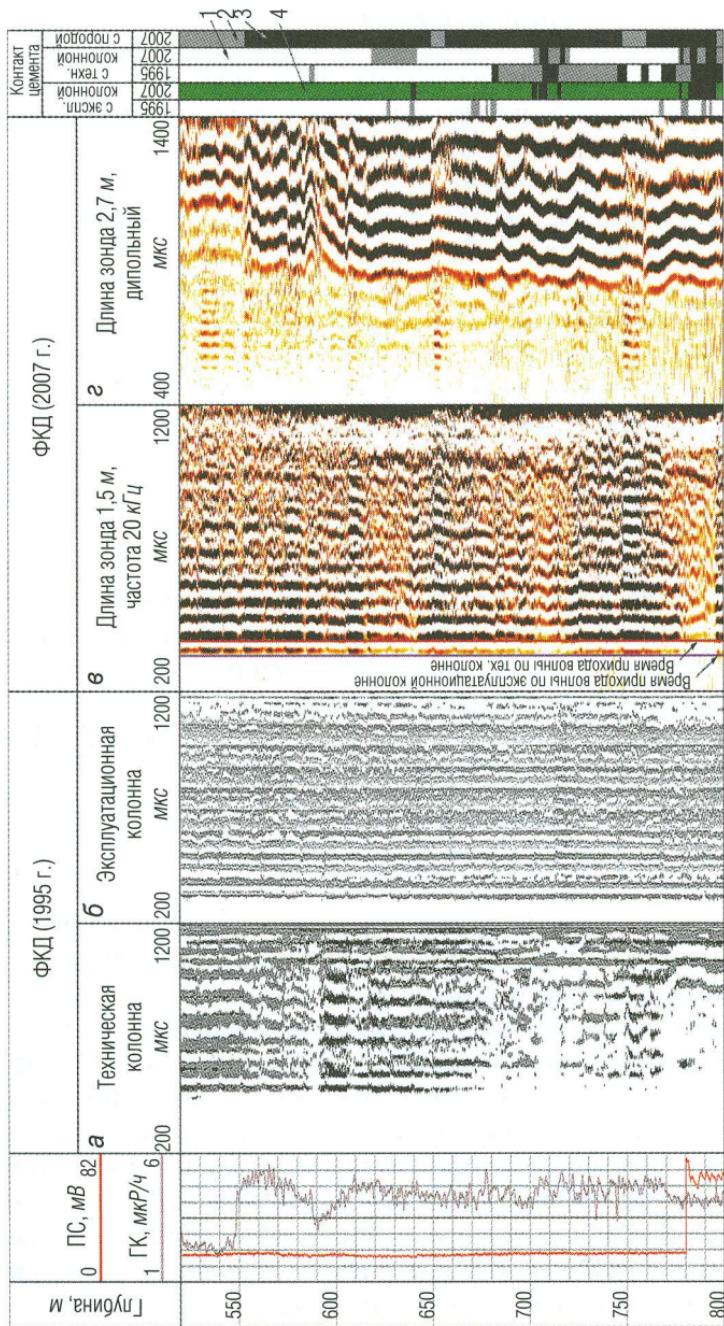


Рис. 5. Определение контактов цементного камня с обсадными колоннами и горными породами на разных частотах.

a, b – исследования технической и эксплуатационной колонн в ходе строительства скважины (1995 г.) стандартной цементометрией (20 кг/ц), некачественное цементирование; *c* – исследование стандартной цементометрией в 2007 г., некачественное цементирование; *d* – исследование на частоте 4 кГц (2007 г.), межтрубное и затрубное пространства заполнены цементным цементом, между камнем и колоннами существуют микрозазоры; *1, 2, 3* – отсутствующий (или неопределен), частичный контакт с обсадными колоннами или горными породами; *4* – канал в цементном камне и сплошной контакт с цементом камня с обсадными колоннами или горными породами.

Волна Стоунли

Две сугубо практические задачи связаны с идентификацией волны Стоунли в волновом пакете и измерениями ее характеристик – скорости v_{St} (интервального времени Δt_{St}), амплитуд A_{St} и затухания α_{St} . Первая обязана возможности *расчета скорости распространения поперечной волны* в породах, в которых $v_s < v_*$, либо измерения v_s , превышающие v_* , затруднены сильным затуханием поперечной волны. Решением этой задачи заинтересованы специалисты сейсморазведки и добывающих организаций, выполняющих расчет параметров гидроразрывов пластов на малых глубинах. Вторая задача традиционно принадлежит ГИС – это *выделение проницаемых пород*, являющихся потенциальными коллекторами нефти и газа.

Взаимосвязь между скоростями распространения волны Стоунли v_{St} в цилиндрической скважине и поперечной волны с вертикальной поляризацией (*SV*) в массиве пород впервые установлена в работах [17, 36, 41, 53]. Позже к ним добавились другие авторы [11, 33]. Решение получено для источника волны сжатия, расположенного в скважинной жидкости. Условия распространения упругих волн в ограниченной среде заключались в непрерывности на границе жидкости и твердого тела нормальных к границе напряжений и смещений, равенства нулю касательных напряжений. Для частот, стремящихся к нулю, найдено

$$v_{St} = \frac{v_*}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_* v_*^2}{\sigma v_s^2}}}, \quad (3)$$

где v_{St} и v_* – скорости волн Стоунли и в жидкости, заполняющей скважину; v_s – скорость поперечной волны в твердом теле; σ_* и σ – плотности жидкости и твердого тела.

Несколько позже было показано, что уравнение (3) справедливо также для поперечных волн с горизонтальной поляризацией (*SH*) [40, 44].

Уравнение (3) обладает свойствами некоторой периодической функции, что определяется применением для его вывода функций Бесселя. Фазовая и групповая скорости волны Стоунли являются функциями частоты колебаний, соотношений плотностей жидкости и твердого тела, радиуса скважины и длины волны. Различают два случая: $v_s > v_*$ и $v_s < v_*$ [11, 41, 42]. В первом случае при достаточно высоких частотах, когда длина волны намного меньше радиуса сква-

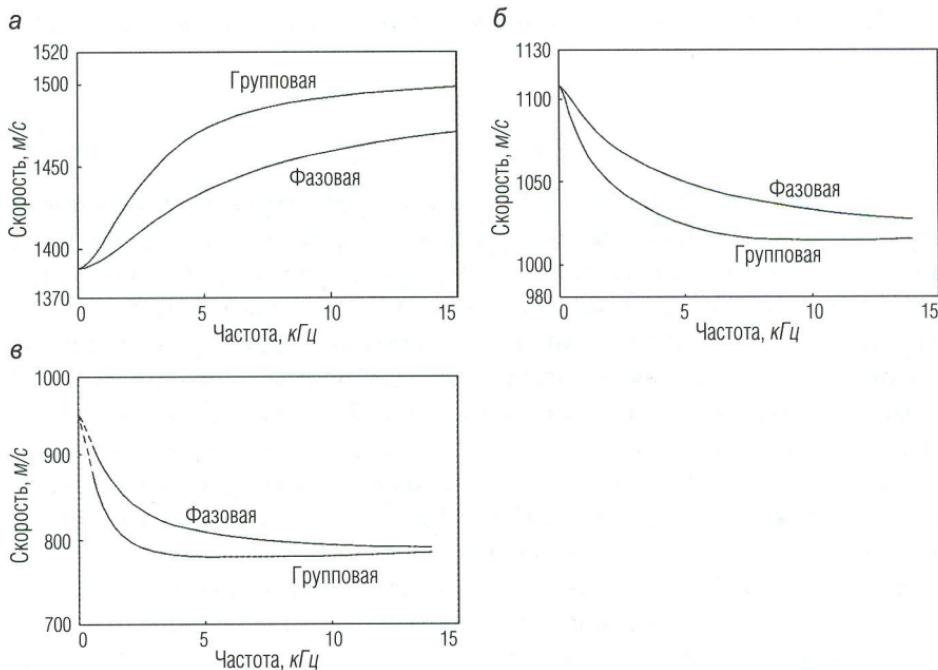


Рис. 6. Фазовые и групповые скорости v_{St} волны Стоунли для осадочных пород при условиях $v_S > v_*$ (а), $v_S < v_*$ (б), и $v_{St} > v_S$ (в): радиус скважины 0,1 м; значение v_P равно 4510, 2700 и 2400 м/с соответственно; значение v_S равно 2410, 1200 и 910 м/с соответственно; значение σ равно 2,3 и 2,1 г/см³ (заимствовано из [25])

жины, поверхность волна распространяется вдоль стенки скважины со скоростью, близкой к скорости волны Стоунли вдоль плоской границы. Наблюдается небольшая дисперсия фазовой и групповой скоростей; с увеличением частоты значения скоростей возрастают (рис. 6, а). В пределе они стремятся к асимптотическому значению, которое всегда меньше v_* .

Если $v_s < v_*$, то при непременном условии, что $v_{St} < v_S$, уравнение (3) не имеет реального решения. С учетом ограничений, высказанных выше, его необходимо переписать в следующем виде [11, 42]:

$$\left(\frac{v_s}{v_{St}} \right)^2 = \frac{\sigma_*}{\sigma} + \frac{v_s^2}{v_*^2}. \quad (4)$$

Незатухающие колебания при условии, что $v_{St} > v_s$, имеют место, если

$$\frac{\sigma_{\text{ж}}}{\sigma} + \frac{v_s^2}{v_{\text{ж}}^2} > 1. \quad (5)$$

С учетом того что для большинства даже слабо уплотненных пород $\sigma_{\text{ж}}/\sigma \approx 1/2$, незатухающая волна Стоунли может распространяться в низкочастотном пределе, если $v_s \geq 0,7v_{\text{ж}}$. Фазовая и групповая скорости волны меньше $v_{\text{ж}}$ и немного уменьшаются с частотой (рис. 6, б). Последнее соотношение определяет верхнюю границу значений v_s , которые доступны для их расчета по измеренным значениям v_{St} . В работе [4] она указана примерно равной 2000 м/с. Таким образом, диапазон возможных определений скорости распространения поперечной волны по измеренным значениям скорости волны Стоунли оказывается довольно небольшим: 1100–2000 м/с при пресных водах и 1200–2000 м, если скважина заполнена высокоминерализованной водой. В случае более высоких значений v_s ее расчет нецелесообразен вследствие резкого увеличения погрешности определений.

Применение параметров волны Стоунли (Δt_{St} , A_{St} , α_{St}) для выделения проницаемых пород, практически не признаваемое производственными организациями РФ, не менее обоснованно, чем применение для этих целей данных ЯМК или керна. Покажем это на примере двух скважин, вскрывших карбонатный и терригенный разрезы и богато освещенных керном и другими материалами ГИС. Теоретические аспекты определений, хотя они очевидны, не будут затронуты, так как не все тонкости выяснены окончательно.

Одна из скважин в Восточной Сибири исследована полным комплексом ГИС, в ней выполнен практически полный отбор керна (рис. 7). Карбонатные коллекторы, суммарные толщины которых достигают полуторы метров, сложены порово-каверново-трещиноватыми доломитами. Доломиты сопровождаются отложениями галитов и ангидритов в поровом пространстве. Признаками и количественными критериями коллекторов служат значения эффективной пористости ($k_{\text{п.эф}}$) и проницаемости ($k_{\text{пр}}$) пород, установленные по материалам ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) в сильном магнитном поле и данным АК. Коллекторы оттенены более интенсивной закраской на кривых ГИС.

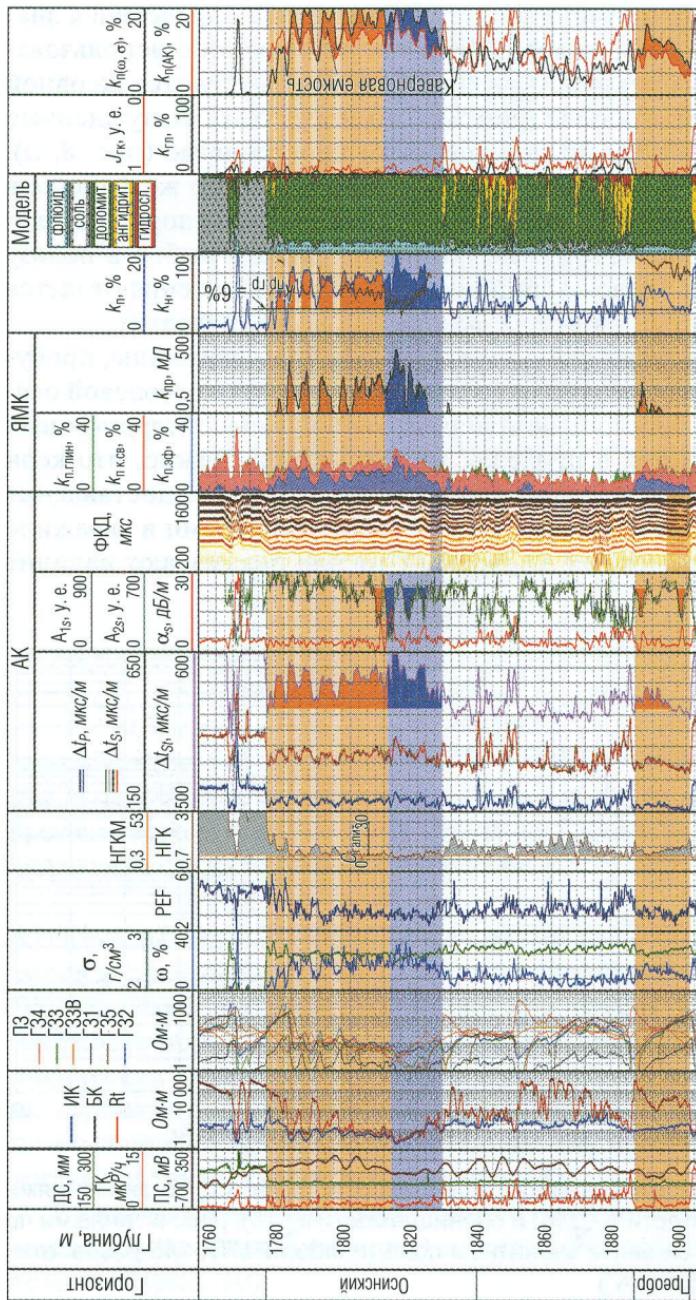


Рис. 7. Выделение и количественная оценка коллекторов по материалам методов, отражающих пористость и литотипию пород. Месторождение в Восточной Сибири. Предполагаемые (до результатов испытаний) коллекторы обладают эффективной пористостью ($k_{\text{n,ф}}$) и проницаемостью по данным ЯМК в сильном магнитном поле, им присуще увеличение Δt_{S_1} , а в трещиноватых интервалах – уменьшение амплитуд (A_s) поперечной волн; каверновая пористость определена как разность значений, рассчитанных по данным ГГК-П-НК и АК. Нефть (коричневый цвет) и водонасыщенность (голубой цвет) определены по данным электрометрических видов ГИС

Результаты этого примера свидетельствуют, что определения значений $k_{\text{п.эф}}$, $k_{\text{пр}}$ по материалам ЯМК и тех же величин с использованием интервальных времен Δt_{S_t} волны Стоунли базируются на одной и той же физической основе (рис. 8). Это могут быть вынужденные колебания флюида в суммарном поровом пространстве (рис. 8, а), то есть динамическая пористость, либо движения того же флюида в каналах, обеспечивающих проницаемость пород. Бесспорное сходство графиков на рис. 8, а и б не позволяет сделать выбор в пользу одной из версий. В англоязычной литературе предпочтение отдается зависимости Δt_{S_t} от $k_{\text{пр}}$, а вторая версия не рассматривается.

Второй пример также выполнен по материалам скважины, пробуренной в Восточной Сибири. Скважина вскрыла весь подсолевой осадочный комплекс. Единичные толщины карбонатных и терригенных коллекторов находятся в пределах десяти метров. Важно, что керн из этой скважины исследован в лаборатории. Прямые сопоставления проницаемости пород на образцах керна с измеренными в скважине интервальными временами Δt_{S_t} волны Стоунли показывают наличие

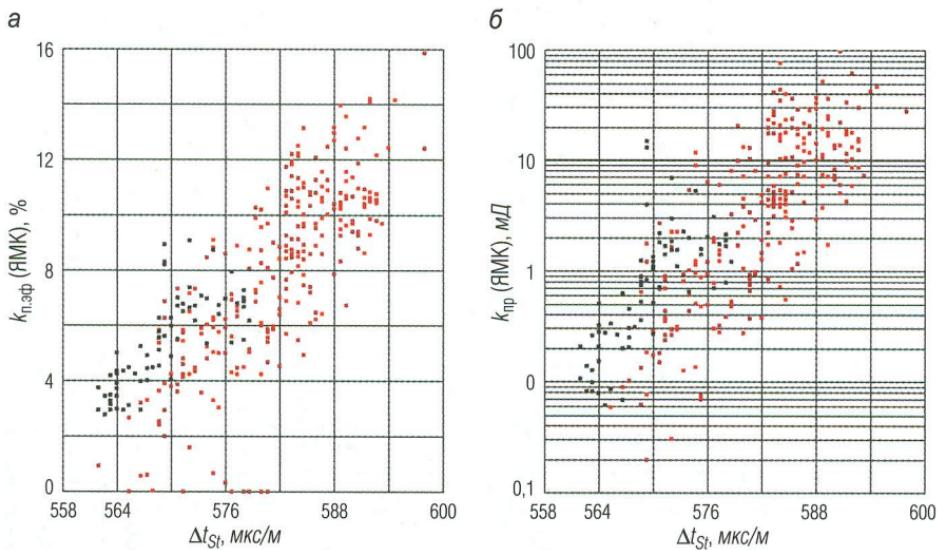


Рис. 8. Графики сопоставления интервальных времен Δt_{S_t} со значениями эффективной пористости $k_{\text{п.эф}}$ (а) и проницаемости $k_{\text{пр}}$ (б), рассчитанными по материалам ЯМК в сильном магнитном поле (прибор ЯМТК-145 разработки ООО “Нефтегазгеофизика”)

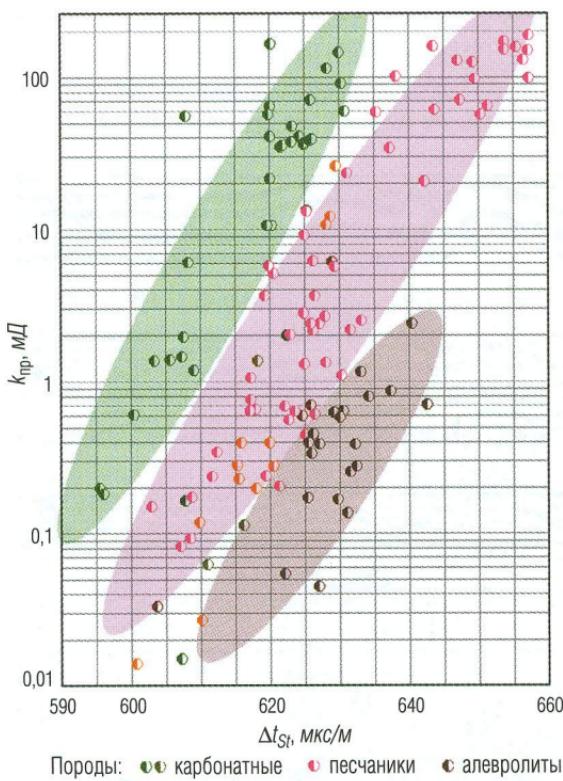


Рис. 9. Сопоставление измеренных в скважине значений Δt_{St} с абсолютной проницаемостью пород по керну (описание и измерения на образцах керна проницаемости выполнены в лаборатории ТО “СургутНИПИнефть”)

выраженных взаимосвязей между этими величинами для основных типов коллекторов: карбонатных, песчаников и алевролитов (рис. 9). Наличие трех зависимостей не должно удивлять, если учесть, что плотность пород (а она существенно различна для названных литологических разностей) входит в формулу (3) определения Δt_{St} . К тому же карбонатные коллекторы разбурены на высокоминерализованной промывочной жидкости, а терригенные – на опресненной. Плотность жидкости также входит в выражение (3).

Важным преимуществом волны Стоунли служит возможность выделения проницаемых пород в скважинах, обсаженных стальной колонной (рис. 10).

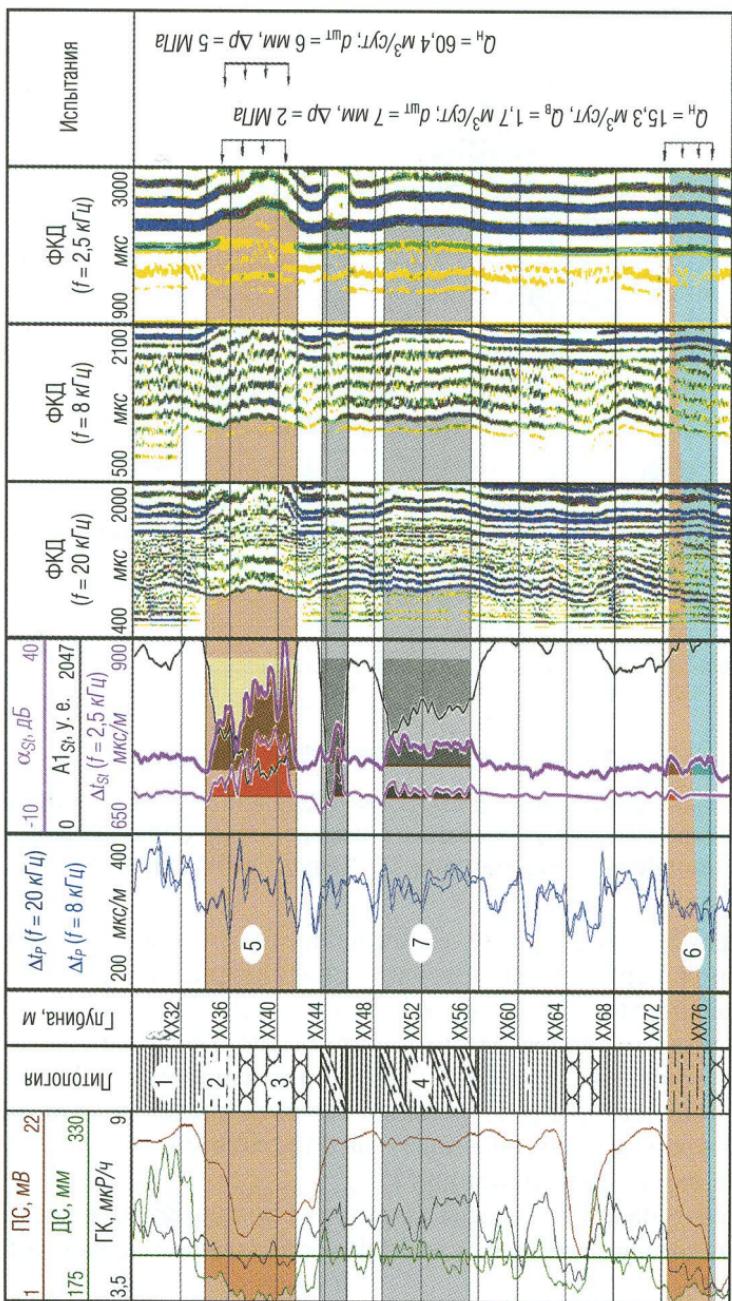


Рис. 10. Выделение в обсаженной скважине перфорированных продуктивных интервалов и интервалов предположительно проницаемых пород с использованием параметров волнны Стоунли:
1 – аргиллит; 2 – алевролит; 3 – песчаник; 4 – переслойивание алевролитов и аргиллитов; 5, 6 – нефтеводонасыщенные породы; 7 – породы, обладающие признаками коллекторов, но не испытаны. Верхний перфорированный интервал сложен нефтенасыщенными песчаниками и алевролитами, нижний – нефтеводонасыщенными алевролитами. Для них характерно увеличение Δt_{Si} , α_{Si} и уменьшение A_{Si} .

Эта возможность обеспечивается некоторыми обстоятельствами. Во-первых, толщина прискважинного слоя пород, в котором волна Стоунли распространяется как в твердом теле, многократно превышает толщину обсадной колонны. Поэтому свойства (характеристики) волны формируются породами в заколонном пространстве, а не стальной колонной. Нельзя исключить, что колонна все же нивелирует эти свойства по сравнению с их значениями в открытом стволе скважины. Во-вторых, влияние эффективной пористости или проницаемости пород на параметры волны Стоунли заложена уже в формировании свойств этой волны в исследуемом объеме пород. Она вовсе не зависит от “поршневого эффекта”, который по публикациям его адептов формирует зависимость Δt_{S_I} от проницаемости пород. Вполне очевидно, что этот эффект усиливает исходную зависимость, но только не в обсаженной скважине или в присутствии глинистой корки в интервалах коллекторов.

Выводы

1. Волны Лэмба и Стоунли, регистрируемые в скважине широкополосными приборами акустического каротажа, принадлежат, согласно физике волновых процессов, к разным типам волн. В первом случае это нормальная волна, распространяющаяся в стальной трубе как в волноводе, во втором – это поверхностная волна, которая распространяется по границе жидкости и породы, затрагивая в каждой среде объем, примерно равный половине длины волны. Частоты колебаний и скорости распространения этих волн различаются, по крайней мере, в 4 раза, что не позволяет объединять их в одну волну Лэмба–Стоунли.
На частотах АК в скважинной жидкости распространяется только волна нулевого порядка с постоянной скоростью, равной скорости в массиве жидкости. Она наиболее высокочастотная и не может служить компонентом волны Лэмба–Стоунли.
2. Затухание волны Лэмба, которую в акустической цементометрии именуют “волной по колонне”, определяется сохранением волноводных свойств обсадной колонны и служит мерилом качества ее цементирования.
3. Волна Стоунли регистрируется в открытом и в обсаженном стволях скважины. Несомненными ее преимуществами служит возможность

расчета скорости поперечной волны в диапазоне 1100–2000 м/с, а также выделение интервалов пород, обладающих динамической пористостью и проницаемостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аширафьян М. О. Оценка пропускной способности канала (щели) между обсадной колонной и цементным камнем, возникающего при опрессовке колонны // Нефтяное хозяйство. 2009. № 12. С. 77–79.
2. Беляков Н. В. Интегрированные геофизические исследования бурящихся скважин. М.: Физматкнига, 2008. 208 с.
3. Беляков Н. В., Коданев В. П., Сизов И. И. Акустические каналы связи забойных телеметрических систем – особенности построения и результаты скважинных испытаний // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 76. С. 92–99.
4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
5. Владов М. Л. Сейсмоакустические многоволновые исследования в водонаполненных скважинах с помощью электроискрового источника упругих волн: Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2003.
6. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1996. 168 с.
7. Горбачев Ю. И. Геофизические исследования скважин. М.: Недра, 1990. 398 с.
8. Гуторов Ю. А. Акустический метод каротажа для контроля технического состояния обсаженных скважин нефтяных и газовых месторождений: Докторская диссертация. Октябрьский: ВНИИГИС, 1994. 273 с.
9. Еникеев В. Н., Рафиков В. Г., Куликов В. В. Использование метода ВАК для оценки фильтрационно-емкостных свойств нижнемеловых и юрских отложений Когалымской группы месторождений нефти // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 77. С. 109–117.
10. Иванкин Б. Н., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. Акустический метод исследования скважин. М: Недра, 1978. 320 с.
11. Кауфман А. А., Левшин А. Л. Введение в теорию геофизических методов. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2006. Ч. 5. 663 с.
12. Кауфман А. А., Левшин А. Л., Ларнер К. Л. Введение в теорию геофизических методов. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2003. Ч. 4. 661 с.
13. 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 Российской акустической общества. Секция “Геоакустика”. М.: ГЕОС, 2001. С. 155–158.
14. Козяр В. Ф., Глебочева Н. К., Медведев Н. Я. Выделение принциаемых пород-коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных

испытаний): Международная конференция и выставка по геофизическим исследованиям скважин 8–11.09.1998.

15. Козяр В. Ф., Глебочева Н. К., Медведев Н. Я. Выделение проницаемых пород-коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных испытаний) // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 1999. Вып. 56. С. 52–59.
16. Конысов А. К., Козяр Н. В. Акустическая цементометрия обсадных колонн приборами с цифровой регистрацией данных. Алматы, 2009. 192 с.
17. Крауклис П. В., Крауклис Л. А. Волновое поле точечного источника в скважине: Сб. “Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн”. Л.: Наука, 1976. Вып. 16. С. 41–53.
18. Крауклис П. В., Рабинович Г. А. Перельман А. Л. Замечания к обзору “Акустические исследования в нефтегазовых скважинах: состояние и перспективы” // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 73. С. 16–27.
19. Крутин В. Н., Марков М. Г. Волновой акустический каротаж и проницаемость. Теоретические результаты // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 1999. Вып. 57. С. 16–22.
20. Крутин В. Н., Марков М. Г., Юматов А. Ю. Волна Лэмба–Стоунли в кольцевом зазоре между каротажным прибором и проницаемой стенкой скважины. Новосибирск: СО АН СССР; Изд. “Наука”, 1988. № 9. С. 96–101.
21. Крылов Д. А., Кузнецов О. Л. Определение дефектов в цементном камне и напряженности его контактов. М.: ВНИИОЭНТ, 1973. Вып. 3. С. 18–21.
22. Крылов Д. А., Шишин К. А., Кузнецов О. Л. Временное руководство по исследованию качества цементирования скважин акустическим методом при изменяющемся давлении в обсадной колонне на месторождениях Мангышлака. Шевченко: ОНТИ “Мангышлакнефть”, 1974. 63 с.
23. Курьянов Ю. А. Исследование естественной и техногенной трещиноватости нефтегазовых пластов на основе сейсмоакустической информации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ГНЦ РФ ВНИИгесистем, 2001. 24 с.
24. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
25. Марков М. Г. Некоторые проблемы обработки данных акустического каротажа с использованием волны Стоунли // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 72. С. 102–113.
26. Марков М. Г. О выборе моделей при решении прямых и обратных задач теории АК в пористых проницаемых средах // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2000. Вып. 77. С. 27–36.
27. 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.
28. 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.

29. Методическое руководство по компьютерной технологии контроля технического состояния и качества цементирования обсадных колонн нефтегазовых скважин / М. А. Сулейманов, В. Н. Служаев, Е. В. Семенов и др. // Уфа: АО НПФ "Геофизика", 1997. 173 с.
30. Ошкун А. Н. Изучение распространения упругих волн в средах с цилиндрической симметрией методами лабораторного моделирования: Автoref. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2009.
31. Рафиков В. Г., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф. Аппаратура акустического каротажа с изменяющейся длиной зонда // Геофизическая аппаратура. 1974. Вып. 56. С. 84–89.
32. Служаев В. Н. Разработка технико-методического обеспечения акустического контроля качества цементирования применительно к многоколонным конструкциям скважин месторождения Тенгиз: Реф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1990. 154 с.
33. Смирнов Н. А. Обоснование параметров и разработка основных узлов аппаратуры акустического каротажа для раздельного возбуждения и регистрации продольной, поперечной и Лэмба–Стонули волн: Автoref. дис. ... канд. техн. наук. Тверь: АООТ НПП "ГЕРС", 1996. 25 с.
34. Теоретические и экспериментальные исследования низкочастотных гидроволн в скважинах / А. В. Калинин, Б. Л. Пивоваров, М. Л. Владов и др. // Скважинная геоакустика при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых. М.: ВНИИГеоинформсистем, 1987. С. 13–20.
35. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
36. Biot M. A. Propagation of Elastic Waves in Cylindrical Bore Containing a Fluid // Appl. Physics. 1952. V. 23. № 9. P. 997–1005.
37. Burns D. R., Cheng C. H. Determination of in-situ Permeability from Tube Wave Velocity and Attenuation // Trans. SPWLA 27th Annual Logging Symposium. 1986. Paper KK.
38. Castagna J. P., Zucker S. M., Shoberg T. G. Permeability Indication with Conventional Sonic Waveforms // Trans. SPWLA 28th Annual Logging Symposium. 1987. Paper MM.
39. Cement Evaluation Quidelines // Western Atlas International. Houston. Texas. 1990. 155 p.
40. Chen S. T., Willen D. E. Shear Wave Logging in Slow Formations Shear Wave Logging in Slow Formation // Trans. SPWLA 25th Annual Logging Symposium. 1984. Paper DD.
41. Cheng C. H., Toksöz M. N. Elastic Wave Propagation in a Fluid-filled Borehole and Synthetic Acoustic Logs // Geophysics. 1981. V. 46. P. 1042–1053.
42. Cheng H. C., Toksöz M. N. Generation, Propagation and Analysis Tube Waves // Trans. SPWLA 23th Annual Logging Symposium. 1982. Paper P.

43. *Hsui A. T., Jinzhong Z., Cheng C. H., Toksöz M. N.* Tube Wave Attenuation and In-situ Permeability // Trans. SPWLA 26th Annual Logging Symposium. 1985. Paper CC.
44. *Liu O. Y.* Stonely Wave-derived Δt Shear Log // Trans. SPWLA 25th Annual Logging Symposium. 1984. Paper ZZ.
45. *McNeely W. A.* A Statistical of the Cement Bond Log // Trans. SPWLA 14th Annual Logging Symposium. 1973. Paper BB.
46. *Minear J. W., Petcher C. R.* Full-wave Acoustic Logging // Trans. SPWLA 24th Annual Logging Symposium. 1983. Paper EE.
47. *Pickett G. R.* Prediction of Interzone Fluid Communication behind Casing by Use of the Cement Bond Log // Trans. SPWLA 7th Annual Logging Symposium. 1996. Paper J.
48. *Saxena V.* Permeability Quantification from Borehole Stonely Waves // Trans. SPWLA 35th Annual Logging Symposium. 1994. Paper T.
49. *Tang X. M., Altunbay M., Storey D.* Joint Interpretation of Formation Permeability from Wireline Acoustic, NMR and Image Log Date // Trans. SPWLA 39th Annual Logging Symposium. 1998. Paper KK.
50. *Upp J. E.* The use of the Cement Bond Log in Well Rehabilitation // Trans. SPWLA 7th Annual Logging Symposium. 1966. Paper X.
51. *Willians D. M., Zemanek J., Angona F. A. et al.* The Long Spaced Acoustic Logging Tool // Trans. SPWLA 25th Annual Logging Symposium. 1984. Paper T.
52. *Winkler K. W., Liu H. L., Johnson D. L.* Permeability and Borehole Stonely Waves: Comparsion between Experiment and Theory // Geophysics. 1989. V. 54. № 1. P. 66–75.
53. *White J. E.* Seismic Waves, Radiation, Transmission and Attenuation. Ch. 4. McGraw-Hill, New York. 1965.