Геология и геофизика, 2011, т. 52, № 2, с. 312—321

УДК 534-18+550.3

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛНЫ СТОУНЛИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЛЕЙ В ЖИДКОСТИ, НАСЫЩАЮЩЕЙ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

В.Н. Доровский, М.Ю. Подбережный, Ю.А. Нефедкин

BAKER HUGHES, Российский научный центр, 630128, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4а, Россия

Экспериментально устанавливается зависимость длины поглощения волны Стоунли от концентрации и вида солей в насыщающем поровое пространство растворе. Предполагается осмотическая причина наблюдаемого явления. Эффект приобретает значение для методик определения проницаемости пористых сред, в основе которых лежит зависимость длины поглощения волны Стоунли от проницаемости пористой среды.

Длина поглощения, волна Стоунли, концентрация солей, акустоэлектрический эффект

STONELEY ATTENUATION LENGTH AND PORE FLUID SALINITY

V.N. Dorovsky, M.Yu. Podberezhnyy, and Yu.A. Nefedkin

The dependence of Stoneley attenuation length on the concentration and composition of salt in pore fluid observed in experiments may be associated with osmosis. The salinity dependence is relevant to methods in which the permeability of porous formations is estimated from its relation ship with the Stoneley attenuation length.

Stoneley attenuation length, Stoneley wave, salinity acoustoelectric effect

ВВЕДЕНИЕ

Часто в основу технологической идеи скважинного измерения проницаемости формации ставится зависимость длины поглощения волны Стоунли от проницаемости [Cheng at el., 1981; Winkler et al., 1989]. Последний факт построен на значимой зависимости комплексной скорости волны Стоунли от величины скорости распространения продольной волны второго рода (аналог медленной волны Био) [Biot, 1956]. В то же время известно, что параметры волны Стоунли зависят от скачка давления на границе раздела скважинной жидкости и пористой среды, насыщенной электролитом. Граница раздела жидкости и пористой среды является мембраной, обеспечивающей локальное термодинамическое равновесие системы по растворителю. Равновесия по концентрации растворенного вещества система достичь не может. Последняя ситуация, связанная со скачком концентрации растворенной соли на границе, способна обеспечить дополнительный скачок давления. Возникает принципиально новый фактор, влияющий на длину поглощения волны Стоунли. Приведенные рассуждения следует принять во внимание при развитии соответствующей технологии измерения проницаемости. Неучет данного обстоятельства искажает реальное значение проницаемости и может вносить значительную систематическую ошибку в измерения. В свете сказанного, практический интерес представляют экспериментальные исследования характера зависимости длины поглощения волны Стоунли от концентрации растворенного вещества, насыщающего пористое пространство.

АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ СКВАЖИН

В качестве рабочей модели для исследования зависимости диссипативных характеристик волн Стоунли была выбрана двухслойная система, состоящая из цилиндра песчаника Береа (высота 300 мм, диаметр 300 мм) и песчано-цементного цилиндрического образца (высота 450 мм, диаметр 400 мм). Оба цилиндра имели скважины диаметром 35 мм, пробуренные вдоль главной оси цилиндрических слоев. Подготовленные цилиндры соосно склеивались гипсовым раствором так, чтобы образовалась модель с общей высотой 730 мм. Для герметизации всей модели служил цилиндрический кожух из пластика диаметром 500 мм и высотой 750 мм. Между моделью и кожухом размещался металлический цилиндр из листового железа, осуществляющий защиту от внешних электромагнитных полей. В условиях стационарной фильтрации неполярной жидкости через песчаник Береа (Berea) было определено значение проницаемости в 320 мД. В качестве коэффициента подобия можно принять геометрический фактор — отношение характерной длины в натуре к характерной длине в модели. В частности, можно взять отношение диаметра скважины в натуре $d_н$ к модельному $d_м$, в нашем случае геометрический фактор

© В.Н. Доровский, М.Ю. Подбережный, Ю.А. Нефедкин, 2011

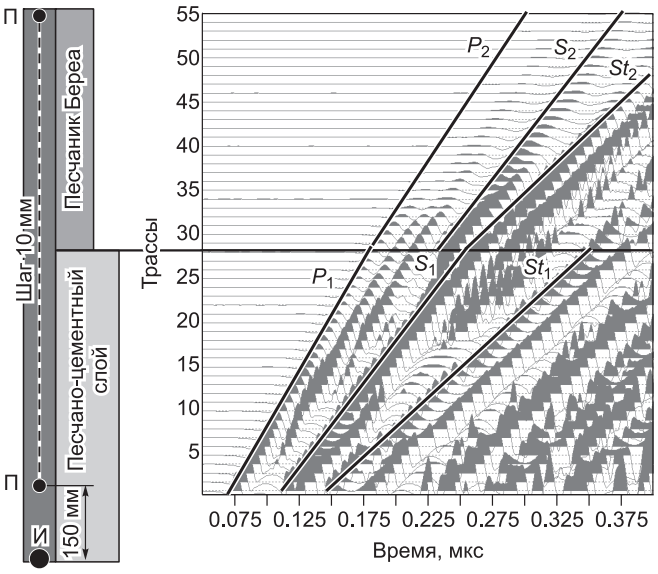

Рис. 1. Схема акустических измерений, акустическое волновое поле.

Линиями показаны годографы: *P* — продольной волны, *S* — поперечной волны, *St* — волны Стоунли. Индексы здесь и на рис. 2, 4: 1 — песчано-цементный слой, 2 — песчаник Береа.

равен $d_н/d_м \approx 6$. В соответствии с этим частоты основных типов волн, регистрируемых в модели на оси скважины, будут в 6 раз выше частот волн, регистрируемых в реальных скважинах. Волны *PPP* в модели будут формироваться в области частот 80—100, *PSP* — 60—80, *L-St* — 12—18 кГц. В этой цепочке скорость продольной волны имеет наибольшее значение, Стоунли — наименьшее. После сборки модели в пространство между цилиндрами и кожухом была залита водопроводная вода с удельным сопротивлением 30 Ом·м. Вода фильтровалась через образец, насыщая поровое пространство, и заполняла скважину. Для выделения всех типов скважинных мод использовался гидрофон AAI и сферический излучатель (диаметр 30 мм). Были выполнены профильные наблюдения при излучателе (И), закрепленном на забое скважины и приемнике (П), перемещающемся вдоль оси скважины с шагом 10 мм, первая точка регистрации находилась на расстоянии 150 мм от забоя, последняя на устье скважины (рис. 1).

Результаты акустического анализа представлены в табл. 1. Песчаник Береа характеризуется пониженными (относительно песчано-цементного образца) значениями скоростей акустических волн.

С целью более четкого выделения волны Стоунли применялся низкочастотный цилиндрический излучатель. Акустический сигнал регистрировался гидрофоном AAI. Для регистрации электрического поля применялся точечный электрод в скважине и электрод сравнения, присоединенный к заземленному экрану, который опоясывал скважину по ее внешнему диаметру и контактировал со скважинной жидкостью. На рис. 2 показаны схема и результаты акустических/акустоэлектрических измерений.

Затухание акустической волны Стоунли в песчано-цементном цилиндре и песчанике Береа с высокой точностью аппроксимируются экспонентой (без учета трех крайних точек). Затухание волны Стоунли в песчано-цементном цилиндре и песчанике Береа аппроксимируются экспонентой в степени β. Величина длины поглощение (L_{St}) волны Стоунли обратно пропорциональна показателю экспоненты (коэффициенту затухания) — $L_{St} = 1/\beta$. Таким образом, длина поглощения — это расстояние, при прохождении которого амплитуда акустической волны уменьшается в *e* раз. Значение длин поглощения для песчано-цементного слоя и песчаника Береа составили 40 и 10 см соответственно (рис. 3). Амплитуда акустоэлектрического потенциала в песчано-цементном образце характеризуется бóльшими отклонениями значений от экспоненциальной кривой в силу малости величины акустоэлектрической конверсии (см. рис. 2, 3).

Амплитудный анализ (см. рис. 3) показал целесообразность выбора в качестве рабочего слоя песчаник Береа. Используя алгоритм косвенного измерения проницаемости с использованием характеристик волны Стоунли и электроакустического отношения *E*/*P* (*E* — амплитуда электрического поля, *P* — давление в волне Стоунли, обусловливающей это поле) [Доровский и др., 2010], были рассчитаны значения проницаемости, скорости распространения продольной волны второго рода и электроакустической константы (табл. 2).

Для расчетов использовалась теория двухскоростного континуума. Данный континуум описывается тремя скоростями распространения упругих волн: двумя продольными и одной поперечной [Blokhin, Dorovsky, 1995]. Во всех двухскоростных теориях вводится понятие продольной волны второго рода. Л.Д. Ландау в теории сверхтекучего гелия II вводит термин «вторая скорость звука», М. Био для своей теории вводит термин «медленная продольная волна». Скорость распространения продольной волны II рода является параметром, трудноизмеримым в скважинных условиях. Однако, используя разра-

Таблица 1. **Скоростные характеристики двухслойной модели скважины**

Слой	V_P	V_S	V_{St}
	м/с		
Песчано-цементный	2650 ± 50	1650 ± 50	1320 ± 50
Песчаник Береа	2100 ± 50	1400 ± 50	1050 ± 50

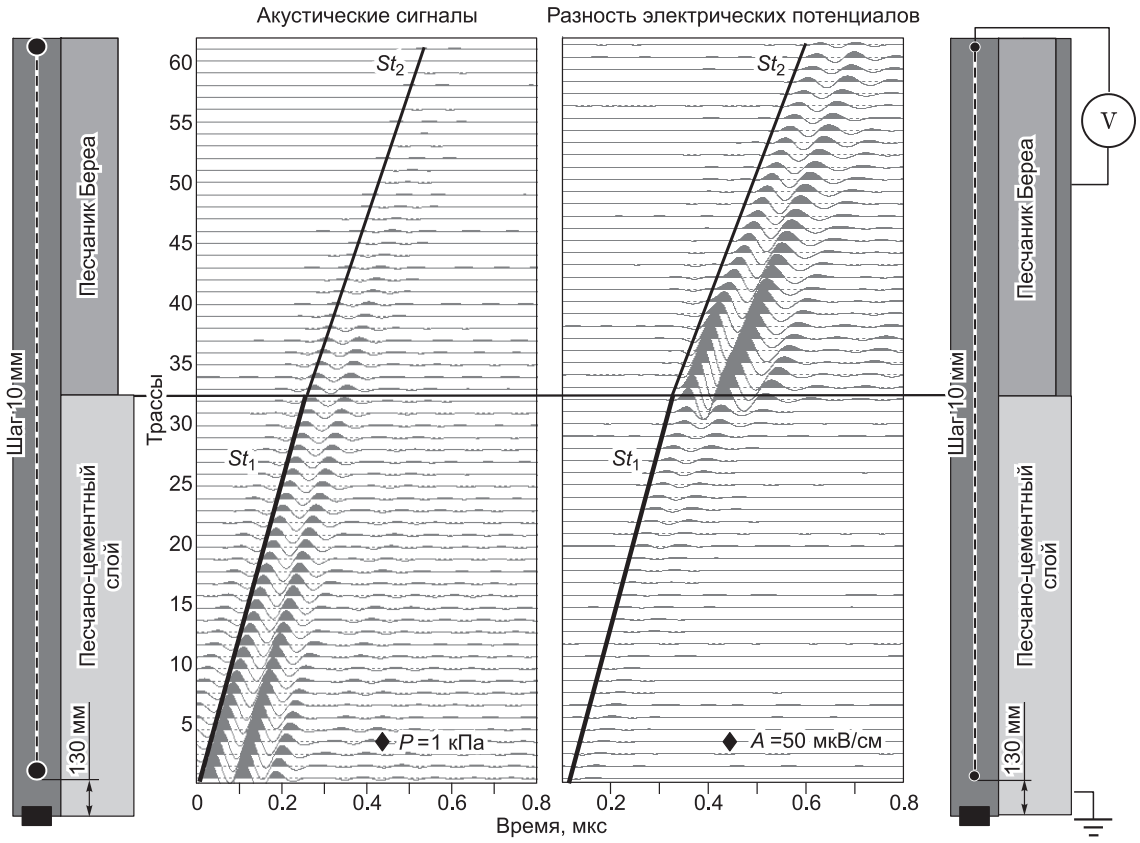

Рис. 2. Схема акустических и акустоэлектрических измерений, акустическое и акустоэлектрическое волновые поля.

Линиями показаны годографы волны Стоунли (*St*).

ботанную авторами теорию, можно рассчитать ее значение. Величина второй продольной скорости меньше скоростей первой продольной и поперечной волн, что согласуется с известными экспериментальными наблюдениями [Plona, 1980].

В разрабатываемой авторами теории двухскоростного континуума с учетом электроакустики, электроакустический эффект определяется введением константы α в диссипативное соотношение, выражающее плотность электрического тока $\mathbf{j}$ через электрическое поле $\mathbf{E}$ и разность скоростей $(\mathbf{u} - \mathbf{v})$ движения жидкости и вмещающей ее матрицы: $\mathbf{j} = \alpha\rho_{0,l}(\mathbf{u} - \mathbf{v}) + \sigma\mathbf{E}$, где σ — электропроводность среды, $\rho_{0,l}$ — парциальная плотность жидкости в пористой матрице (см. Заключение). Следует обратить внимание на хорошее совпадение акустической проницаемости пористой насыщенной электролитом среды со значением стационарно измеренной проницаемости по неполярной жидкости.

Все расчеты и измерения были проведены в модели скважины, наполненной пресной водой. Задачей последующих исследований являлась качественная оценка влияния минерализации флюида на измеряемые параметры акустических и акустоэлектрических сигналов.

Таблица 2. **Расчет физических параметров песчаника Береа**

Входной параметр	Обозначение, ед. измерения	Значение
Частота	f, кГц	12
Скорость распространения волны Стоунли	V_{St_2}, м/с	1050
Длина поглощения волны Стоунли	L_{St_2}, м	0.1
Электроакустическое отношение	E/P, мВ/Па	$2\cdot10^5$
Рассчитанный параметр		
Скорость распространения P-волны второго рода	c_{P_2}, м/с	160
Проницаемость	k, мД	325
Электроакустическая константа	α, $\frac{\text{см}}{\text{Гс}\cdot\text{с}^2}$	$2.5\cdot10^3$

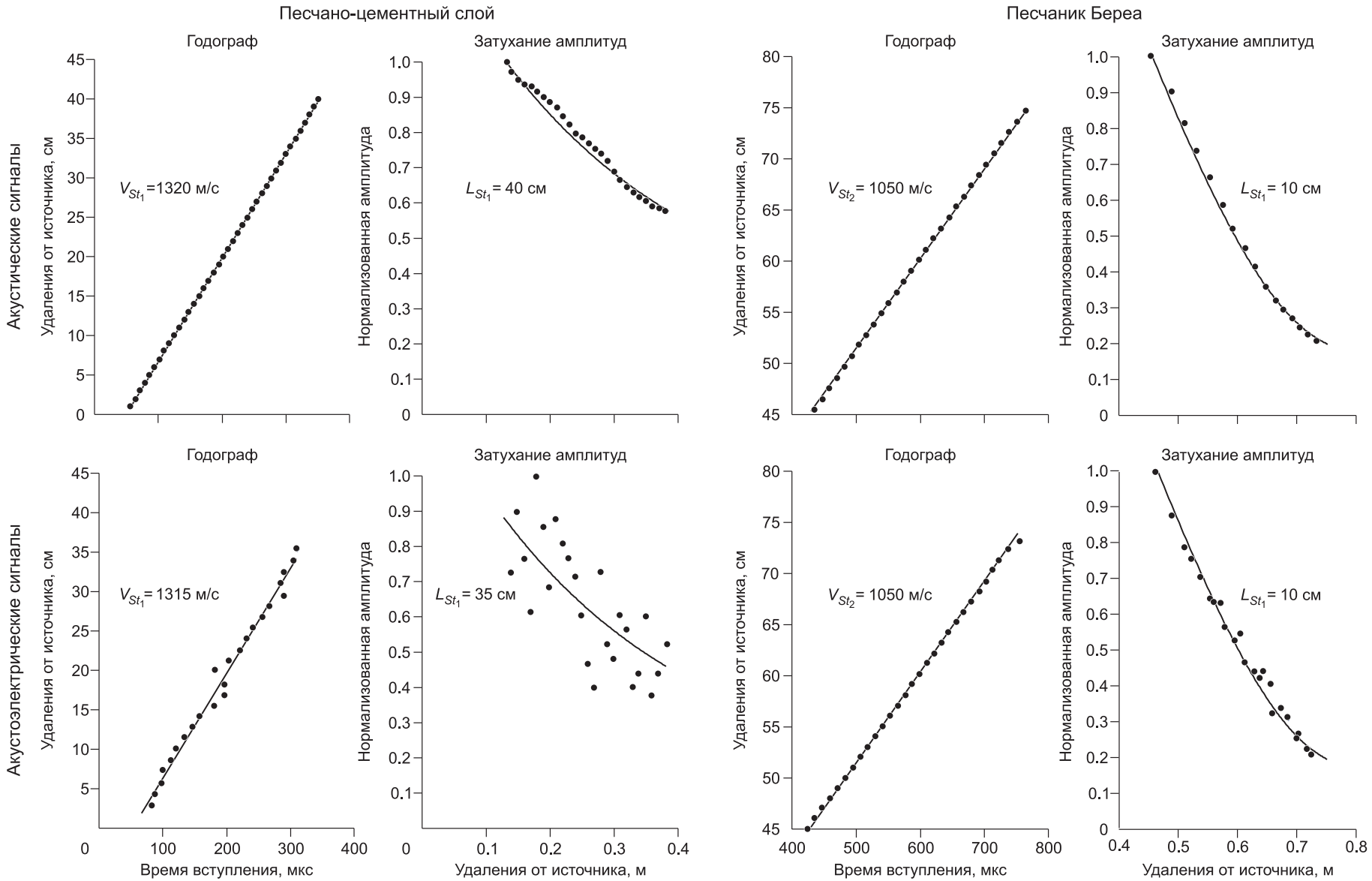

Рис. 3. Годографы и затухание амплитуд волн Стоунли, распространяющихся в двухслойной модели скважины.

Точки — экспериментальные данные, линии — линии тренда.

МИНЕРАЛИЗОВАННЫЙ ФЛЮИД — РАСТВОР NaCl

Влияние минерализации флюида на затухание волны Стоунли исследовалось на песчанике Береа при его последовательном насыщении пресной водой и водными растворами NaCl с концентрациями 10 и 20 г/л. Методика измерений параметров волн Стоунли повторяла методику, описанную выше. На рис. 4 представлены волновые поля акустических сигналов при насыщении модели скважины флюидами различной солености.

При обработке волновых полей получены графики изменения амплитуд волны Стоунли, распространяющейся в песчанике Береа. На рис. 5 представлена зависимость длины поглощения сигнала вдоль оси скважины для различных значений минерализации насыщающего раствора.

На рис. 6 представлены амплитуды первого максимума волны Стоунли, выделенные из акустических и акустоэлектрических сигналов и зарегистрированные при удалении приемника на 30 мм от источника упругих колебаний. Выделенные амплитуды акустических и акустоэлектрических волн Стоунли нормированы на соответствующее значение амплитуд, зарегистрированных в случае насыщении модели пресной водой. На данном расстоянии амплитуды акустической волны Стоунли изменились на 15—20 % в зависимости от минерализации, а акустоэлектрической на 1—2 порядка. Уменьшение амплитуды акустоэлектрических сигналов при увеличении электропроводности среды согласуется с данными [Пархоменко, 1968]. Изменения амплитуд акустоэлектрических сигналов волны Стоунли вдоль профиля проявляют характер, аналогичный акустическим сигналам.

Важно подчеркнуть, что минерализация, указанная на приведенных зависимостях, соответствует флюиду, находящемуся в скважине. Истинная концентрация NaCl в пористой среде в настоящей статье не обсуждается. На рис. 7, 8 представлена концентрационная зависимость длины поглощения волны Стоунли для песчано-цементного образца. Картина концентрационной зависимости качественно повторяет соответствующие зависимости по песчанику (Береа). Неточность в акустических измерениях обусловлена неоднородностью искусственно созданного образца. Неточность в измерениях электрического сигнала наряду с неоднородностью образца также связана с малостью электрического сигнала. В заключение параграфа можно сделать следующие выводы.

1. При изменении концентрации насыщающего раствора (для песчаника Береа) в пределах от 0—20 г/л не наблюдалось заметного изменения фазовой скорости волны Стоунли.

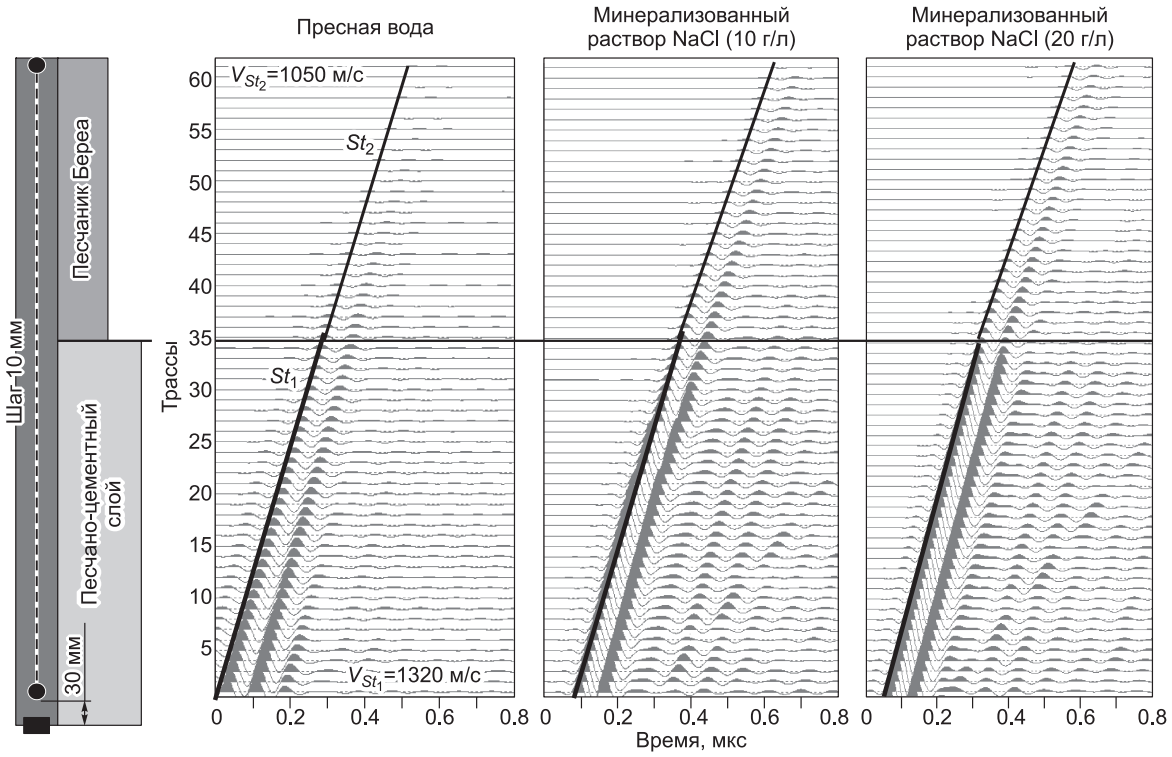

Рис. 4. Акустические волновые поля в двухслойной модели скважины в зависимости от минерализации насыщающего флюида.

Линиями показаны годографы волны Стоунли (*St*).

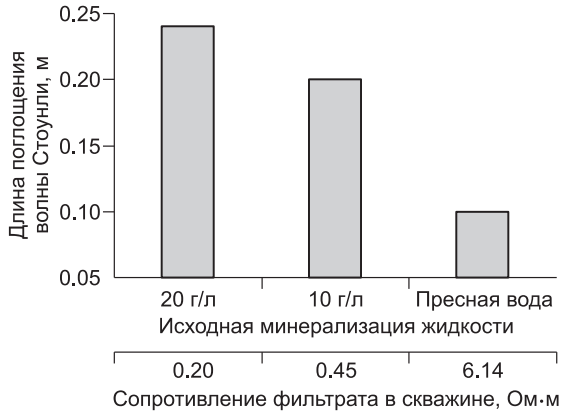

Рис. 5. Зависимость длин поглощения волн Стоунли для песчаника Береа, насыщенного водными растворами NaCl различной минерализации.

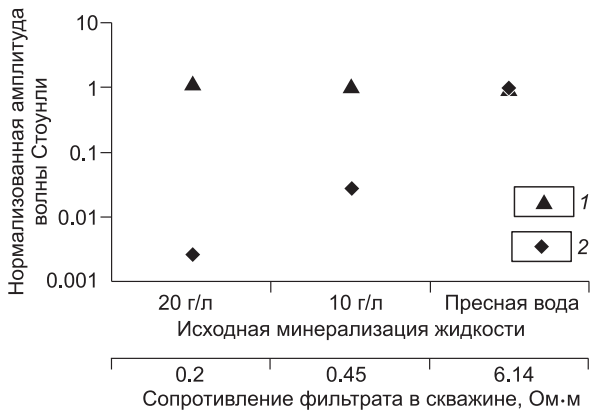

Рис. 6. Зависимость амплитуды акустической и акустоэлектрической волны Стоунли для песчаника Береа, насыщенного водными растворами NaCl различной минерализации.

Расстояние источник—приемник 30 мм. Сигналы: *1* — акустический, *2* — акустоэлектрический.

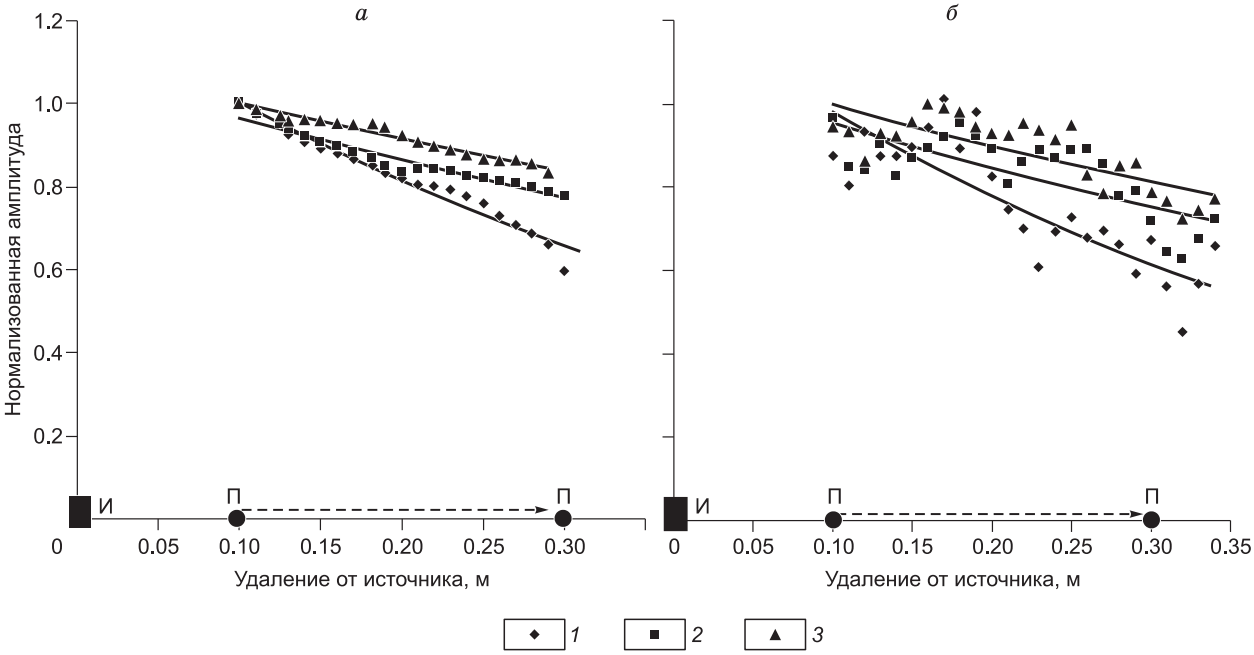

Рис. 7. Затухание амплитуд акустической (*а*) и акустоэлектрической (*б*) волн Стоунли, распространяющихся в песчано-цементном слое, насыщенном растворами различной минерализации.

Значки — экспериментальные данные, линии — линии экспоненциального тренда. *1* — пресная вода, *2* – 10 г/л, *3* — 20 г/л.

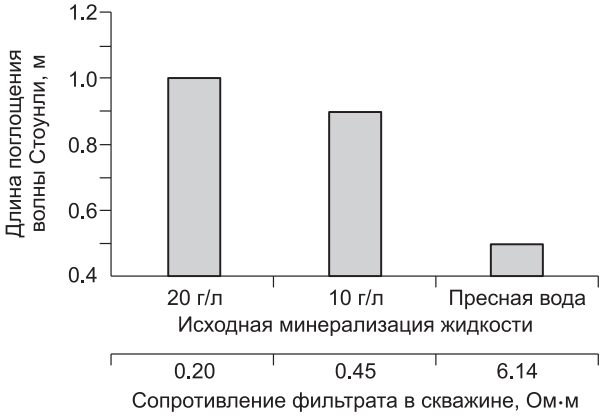

Рис. 8. Зависимость длин поглощения волн Стоунли для песчано-цементного слоя, насыщенного водными растворами NaCl различной минерализации.

2. Для исследовавшегося образца песчаника Береа при насыщении пресной водой длина поглощения волны Стоунли равна 10 см. При концентрации поваренной соли 10 г/л воды длина поглощения увеличивается до 20 см. Последующее увеличение концентрации соли (до 20 г/л) увеличивает длину поглощения незначительно, до 23 см.

3. Если игнорировать концентрационную зависимость длины поглощения и пересчитать (по описанному выше алгоритму) проницаемость, то изменение проницаемости может существенно отличаться от реального значения. Значимость настоящих исследований приобретает очевидную актуальность.

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛНЫ СТОУНЛИ ОТ РАСТВОРИМОГО ВЕЩЕСТВА

Для оценки влияния вида растворенных в поровом флюиде солей на длину поглощения волны Стоунли проводилась регистрация акустических, акустоэлектрических полей в цилиндрической модели скважины. Модель была сделана на базе речного песка и портландцемента. Состав раствора для изготовления модели брался из расчета 1 части объема цемента на 8 объемных частей песка и 2 частей воды. Изготовленный цилиндр имел диаметр порядка 450 мм и высоту 430 мм, вдоль оси цилиндра располагалась скважина диаметром 17 мм. Проницаемость полученного образца, измеренная по низковязкой неполярной жидкости, оставила 150 мД при пористости порядка 22 %. Модель устанавливалась внутрь цилиндрического кожуха из пластика диаметром 500 мм и высотой 500 мм. После сборки модели в пространство между образцом и кожухом была залита водопроводная вода с удельным сопротивлением 30 Ом·м. Вода фильтровалась через образец, заполняя скважину. Скорость фильтрации составляла 50 см^3/ч.

Для повышения точности определения длины поглощения волны Стоунли проводилась десятикратная регистрация сигнала в одной точке с последующим осреднением. Ошибка определения длины поглощения волны Стоунли составила ±2.5 %. Следует отметить, что в связи с уменьшением диаметра скважины в 2 раза по сравнению с предыдущей моделью, частоты всех мод колебаний в скважине пропорционально увеличились.

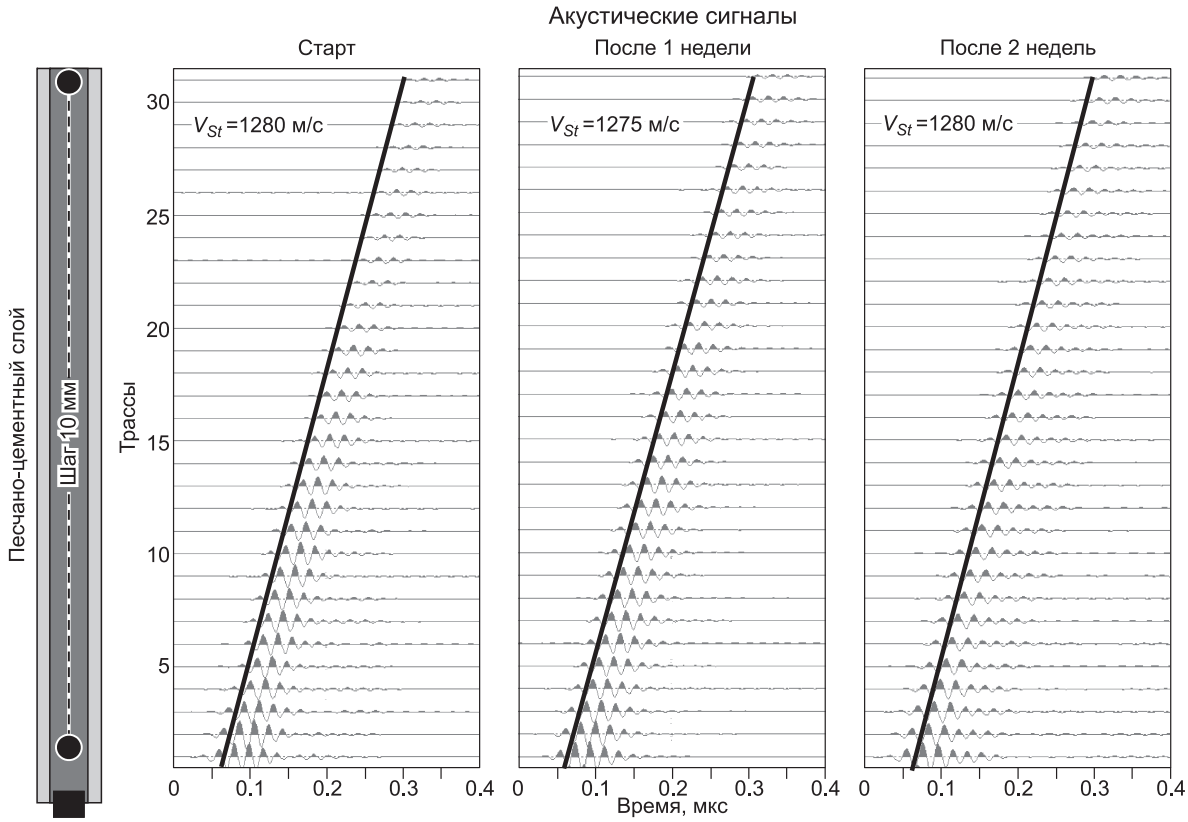

Рис. 9. Волновые поля, зарегистрированные в однослойной песчано-цементной модели скважины в течение двух недель промывки.

Линиями показаны годографы волны Стоунли (*St*).

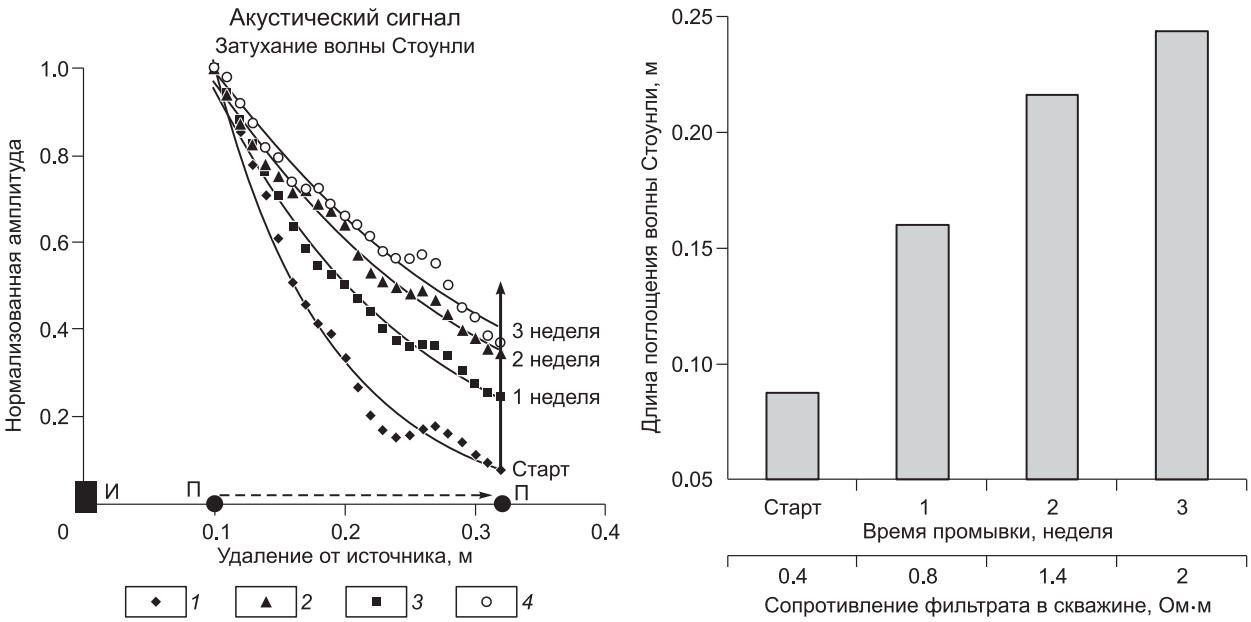

Рис. 10. Зависимость длин поглощения волн Стоунли для однослойной песчано-цементной модели скважины от длительности промывки.

Значки — экспериментальные данные, линии — линии экспоненциального тренда. *1* — старт, *2* — после двух недель, *3* — после одной недели, *4* — после трех недель.

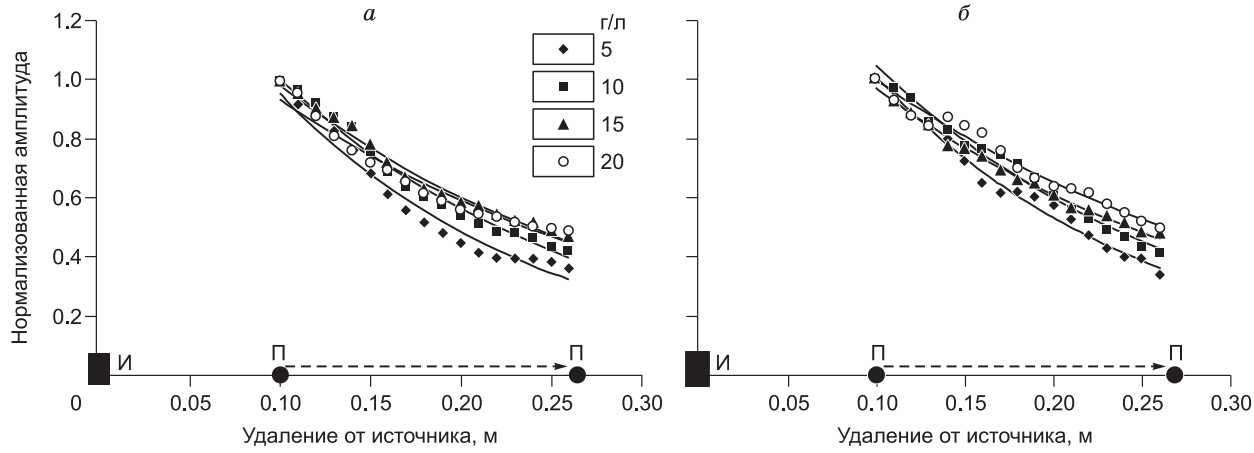

Рис. 11. Затухание амплитуд акустической (*а*) и акустоэлектрической (*б*) волн Стоунли, распространяющихся в однослойной песчано-цементной модели скважины, насыщенной водными растворами NaCl различной минерализации.

Значки — экспериментальные данные, линии — линии экспоненциального тренда.

В процессе фильтрации через модель слабоминерализованной воды с удельным сопротивлением 30 Ом·м в скважине образовывался щелочной раствор. Удельное сопротивление данного раствора изменялось от 0.4 Ом·м на начальной стадии до 2 Ом·м, когда по прошествию трех недель эксперимент был прерван. Причиной образования щелочного раствора явилось взаимодействие с водой трехкальциевого силиката, входящего в состав цемента. В результате данной реакции образовывался гидроксид кальция $Ca(OH)_2$, который выносился в скважину водным фильтратом, характеризующимся щелочным водородным показателем (pH > 12). Резонно предположить, что подобный состав раствора находится в поровом пространстве, непосредственно примыкающем к скважине.

В течение всего периода «промывки» проводились регулярные измерения в скважине акустических и акустоэлектрических полей по методике, описанной выше. В качестве примера на рис. 9 представ-

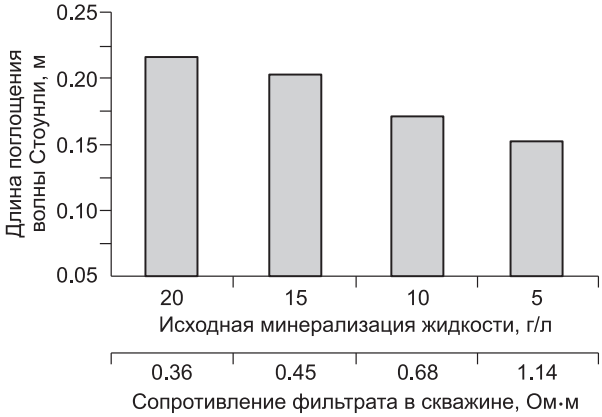

Рис. 12. Зависимость длин поглощения волн Стоунли для однослойной песчано-цементной модели скважины, насыщенной водными растворами NaCl различной минерализации.

лены акустические поля волны Стоунли, зарегистрированные в течение двухнедельной «промывки» модели.

В конечном итоге, при промывке модели пресной водой в течение трех недель удельное электрическое сопротивление скважинной жидкости увеличилось, как указывалось выше, от 0.4 до 2 Ом·м, что можно связать с уменьшением содержания $Ca(OH)_2$ в поровой жидкости. Отмечено, что скорости распространения волн Стоунли в образце фактически не изменяются в процессе промывки. При этом длина поглощения акустических волн Стоунли возросла от 0.09 до 0.24 м (рис. 10). Следует отметить, что концентрация щелочи не контролировалась в процессе промывки. Контролировалось лишь электрическое сопротивление раствора в скважине, при этом с внешней стороны цилиндрической поверхности образца находилась водопроводная вода с удельным сопротивлением 30 Ом·м.

После трехнедельной промывки песчано-цементной модели пресной водой были проведены эксперименты по регистрации акустических и акустоэлектрических полей при последовательном насыщении модели водными растворами NaCl различной концентрации: 5, 10, 15, 20 г/л. При этом фильтрат жидкости в скважине имел кислотный водородный показатель (pH 5—6), а удельное сопротивление уменьшалось от 1.14 до 0.36 Ом·м при увеличении концентрации соли в растворе, который заливался с внешней стороны цилиндрической поверхности образца.

Аналогично предыдущим экспериментам скорости волн Стоунли практически не изменялись, а длина поглощения увеличилась с 15 до 22 см при увеличении концентрации соли от 5 до 20 г/л (рис. 11, 12). Характер зависимости длины поглощения волны Стоунли от концентрации согласуется с аналогичной зависимостью, полученной в экспериментах с песчаником Береа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты экспериментов с насыщением сред водными растворами различной минерализации позволяют констатировать: в песчано-цементном образце и в песчанике Береа увеличение концентрации NaCl в скважинном фильтрате (следует полагать и в прискважинном пространстве) соответствует увеличению длины поглощения волны Стоунли (см. рис. 8, 12). Результаты экспериментов с промывкой песчано-цементого образца водопроводной водой демонстрируют уменьшение длины поглощения волны Стоунли (см. рис. 10) при увеличении в скважинном фильтрате концентрации гидроксида кальция $Ca(OH)_2$.

Касаясь вопроса о физическом механизме, определяющем обнаруженные эффекты, уместно сделать предположение об их осмотической природе. Что мы понимаем под осмотическими явлениями? При наличии растворенной соли в жидкости, насыщающей пористую матрицу, уравнения двухскоростной акустики [Blokhin, Dorovsky, 1995] принимают вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_{0,s}\,\mathrm{div}\,\mathbf{u} + \rho_{0,l}\,\mathrm{div}\,\mathbf{v} = 0,\quad \frac{\partial s}{\partial t} = 0,$$

$$\frac{\partial g_{ik}}{\partial t} + \partial_i u_k + \partial_k u_i = 0,$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\rho_{0,l}}{\rho_0} L_{12}\mathrm{div}(\mathbf{u}-\mathbf{v}) - \frac{\alpha_{22}}{\rho_0}\Delta\frac{Z}{\rho} = 0\,,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial_i p}{\rho_0} + \frac{\partial_k h_{ik}}{\rho_{0,s}} - \frac{\rho_{0,l}}{\rho_{0,s}}\alpha_{11}(u_i - v_i) - \frac{\rho_{0,l}}{\rho_{0,s}}\frac{\alpha_{12}}{T}\partial_i\frac{Z}{\rho} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\nabla p}{\rho_0} + \alpha_{11}(\mathbf{u}-\mathbf{v}) + \frac{\alpha_{12}}{T}\nabla\frac{Z}{\rho} = 0\,,$$

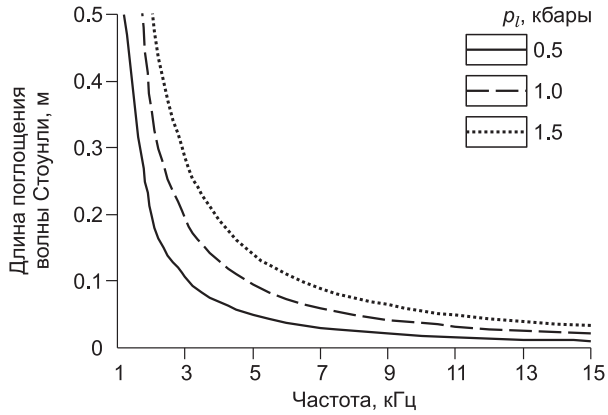

Рис. 13. Теоретическая частотная зависимость длин поглощения волн Стоунли от скачка давления на границе скважина—пористая среда.

с выражением для дифференциала внутренней энергии единицы объема $dE_0 = TdS + \mu d\rho + \frac{h_{ik}}{2} dg_{ik} + Zdc$, ($p = -E_0 + TS + \mu\rho$).

Задание функции $E_0 = E_0(S, \rho, g_{ik}, c)$ определяет термодинамические потенциалы $\mu = \mu(S, \rho, g_{ik}, c)$, $h_{ik} = h_{ik}(S, \rho, g_{ik}, c)$, $Z = Z(S, \rho, g_{ik}, c)$. В приведенных уравнениях c — массовая концентрация соли в растворе; s — энтропия единицы массы; **u**, **v** — скорости движения матрицы и жидкости в акустической волне; ρ — плотность среды ($\rho = \rho + \delta\rho$); ρ_0, $\rho_{0,l}$, $\rho_{0,s}$ — плотности «невозмущенного фона»: плотность пористой среды, парциальные плотности матрицы и жидкости в ней ($\rho_0 = \rho_{0,l} + \rho_{0,s}$); $\delta\rho$ — изменение плотности среды при распространении акустических волн; g_{ik} — метрический тензор деформаций; p — давление в пористой среде. Симметричная матрица α_{ik} кинетических коэффициентов определяет коэффициент диффузии (посредством α_{22}), проницаемость (посредством α_{11}). Косой элемент матрицы α_{12} вводит осмотические эффекты.

На границе раздела скважинной жидкости и пористой матрицы выполняется условие $p_l = \rho_l(p + \alpha_{12}Z/T)/\rho$, как это следует из последнего уравнения системы, где p_l — давление в скважинной жидкости у границы раздела с пористой средой. Таким образом, помимо термодинамической поправки к давлению $p = \rho^2 \partial\left(E_0/\rho\right)/\partial\rho$ в пористой среде, обусловленной концентрационной зависимостью плотности энергии, получаем дополнительный $\alpha_{12}Z/T$ — осмотический вклад на границе к давлению.

На рис. 13 показана частотная зависимость длины поглощения волны Стоунли для сред, ненасыщенных солями, но с введенным коэффициентом k_b в граничное условие непрерывности парциальных давлений $p_l/\rho_{0,l} = k_b \cdot p/\rho_0$. Коэффициент k_b характеризует скачок давления на границе скважинной жидкости и пористой матрицы. Математические расчеты были проведены для диаметра скважины 20 см, волна Стоунли, распространяющаяся в скважине данного диаметра, имеет частотный диапазон 2—4 кГц, значения k_b были взяты равными 0.5, 1, 1.5.

Рисунок иллюстрирует факт высокой чувствительности длины поглощения волны Стоунли к скачку давления на границе скважины. В то же время расчеты показывают чрезвычайно слабую зависимость скорости волны Стоунли от скачка давления. Результаты расчетов качественно согласуются с результатами экспериментов, что может дополнительно свидетельствовать об осмотической природе концентрационной зависимости длины поглощения волны Стоунли.

Авторы благодарят Ю.В. Перепечко за предоставленный график частотной зависимости коэффициента поглощения волны Стоунли (см. рис. 13).

ЛИТЕРАТУРА

Доровский В.Н., Нефедкин Ю.А., Федоров А.И., Подбережный М.Ю. Скважинный метод измерения проницаемости, скорости распространения продольной волны II рода и электроакустической константы пористых сред, насыщенных электролитами // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (12), с. 1652—1663.

Пархоменко Э.И. Явления поляризации в горных породах. М., Наука, 1968, 255 с.

Biot M. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range // J. Acoustical. Soc. Amer., 1956, v. 28, № 2, p. 168—178.

Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modeling in the theory of multivelocity continuum. New York, Nova Science Publishers Inc., 1995, 192 p.

Cheng C., Jinzhong Zh., Burns D. Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs // Geophysics, 1981, v. 52, № 9, p. 1279—1289.

Plona T.J. Observation of second bulk compressional wave in porous medium at ultrasonic frequencies // Appl. Phys. Lett., 1980, № 36, p. 259—261.

Winkler K., Liu H., Johnson D. Permeability and borehole Stoneley waves: comparison between experiment and theory // Geophysics, 1989, v. 54, № 1, p. 66—75.

Рекомендована к печати 25 декабря 2009 г.
М.И. Эповым

Поступила в редакцию
1 сентября 2009 г.