

**ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЫ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЗОНДА**

К. В. Музалевский, В. Л. Миронов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, Академгородок, 50/38  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*Изложены результаты эксперимента по зондированию модельной среды нефтегазового коллектора с использованием лабораторного макета сверхширокополосного электромагнитного скважинного зонда. С этой целью был сконструирован деревянный бак, заполненный модельной средой. Модельная среда нефтегазового коллектора изготавливалась на основе смеси песка и водного раствора поваренной соли. Деревянный бак, заполненный модельной средой нефтегазового коллектора, размещался в лабораторном помещении на бетонной стяжке. Антенны скважинного зонда были размещены в полиэтиленовую водонепроницаемую трубку, на дне бака. Антенны зонда были выполнены в виде дипольных антенн с расширенной полосой пропускания. Передающая антенна подключалась к импульсному сверхширокополосному генератору, приемная антенна подключалась к стробоскопическому осциллографу. Запись напряжения на выходе антенны осуществлялась при различной толщине слоя модельной среды над антеннами и различном расстоянии между передающей и приемной антеннами. Подобная схема эксперимента позволила измерить коэффициент затухания и скорость распространения амплитуды зондирующего импульса в модельной среде нефтегазового коллектора. Показано, что теоретическая модель скважинного зонда с применением метода дискретных источников хорошо прогнозирует временную форму и время задержки зондирующего импульса. Предложен способ определения толщины слоя модельной среды нефтегазового коллектора по измеренным значениям временной задержки импульса, отраженного от границы слоя, при различных расстояниях между передающей и приемной антеннами зонда. Данный способ позволил определить расстояние до границы модельной среды нефтегазового коллектора с относительной погрешностью 2,2 % без привлечения априорной информации об электрофизических свойствах среды. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, создают научную основу для разработки и тестирования импульсных скважинных зондов, предназначенных для каротажа нефтегазовых скважин в нефтегазовом коллекторе с горизонтальным завершением. Для отработки созданных методов и технологий необходимо создание опытного образца скважинного зонда и проведение дальнейших исследований в полевых условиях.*

*Ключевые слова: нефтегазовый коллектор, скважинный радар, сверхширокополосные импульсы.*

**THICKNESS MEASURING OF MODELED OIL-SATURATED ROCK  
WITH NANOSECOND BOREHOLE ELECTROMAGNETIC LOGGING TOOL**

K. V. Muzalevskiy, V. L. Mironov

The Institute of Physics of the Academy of Sciences  
50, bld. 38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru, rsdkm@ksc.krasn.ru

*The paper presents the experimental results of sounding a wet sand-air interface using a laboratory model of a borehole GPR. For this purpose a box filled moist sand moisturized with brine was built. The box was located in a laboratory room on a concrete screed. Radar antennas were housed in a waterproof plastic pipe on the bottom of the box. Radar antennas were made in the form of dipoles with extended bandwidth. The transmitting antenna was connected to the generator, the receiving antenna to the stroboscopic oscilloscope. With variation of thickness of a sand layer over the antennas and the distance between the transmitting and receiving antennas the signals of receiving pulses were recorded. An attenuation coefficient of amplitude and propagation velocity of broadband pulse were measured. It is shown that the theoretical model borehole GPR, created by authors using the method of discrete sources, well predicts a temporary shape and time delay of the pulse reflected from the boundary layer. A method for determining the thickness of the layer of wet sand from the measured time delay of the pulse reflected from the boundary layer at different distances between the transmitting and receiving antennas radar was proposed. This*

method allows to determine the distance to the interface with a relative error of 2.2 % without the involvement of a priori information on the electro physical properties of the medium in the layer. The results of this study allow you to plan and start bench testing of prototypes borehole probes.

**Keywords:** oil and gas reservoir, borehole radar, UWB pulses.

**Введение.** По мере развития технологий разработки нефтяных залежей все возрастающую роль начинает играть бурение горизонтальных стволов, которое обеспечивает существенное повышение эффективности извлечения углеводородного сырья [1–5]. Одной из наиболее важных проблем при проводке таких скважин является определение их местоположения относительно внешних и внутренних границ вскрываемого нефтенасыщенного коллектора. В последнее время авторами разработана новая технология сверхширокополосного импульсного скважинного каротажа нефтегазовых скважин с горизонтальным завершением [5–10], создана теоретическая модель импульсного сверхширокополосного (СШП) скважинного зонда. С целью тестирования созданной теоретической модели [11–13] скважинного зонда и экспериментального подтверждения возможности каротажа границ в слоистых средах нефтегазового коллектора с помощью СШП-импульсов, проведен эксперимент по зондированию границы слоя модельной среды нефтегазового коллектора с применением разработанного нами лабораторного макета скважинного зонда и специально созданного измерительного стенда. Исследуется затухание и скорость распространения зондирующих импульсов в модельной среде нефтегазового коллектора. В приемопередатчике радара использовались простейшие вибраторные антенны. Передающая антенна возбуждалась биполярным импульсом с длительностью 0,3 нс. Измерения проводились в специальном баке в виде прямоугольного параллелепипеда, который заполнялся влажным песком. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность такой модельной среды соответствовала петрофизическим характеристикам нефтенасыщенного слоя нефтегазового коллектора [5].

**Описание экспериментальной установки.** Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Деревянный бак размером (1,34 м × 0,6 м × 0,5 м) устанавливался на поверхности грунта и заполнялся влажным песком. Антенны передатчика  $T$  и приемника  $R$  размещались в полиэтиленовой трубке диаметром 1 см и длиной 1,5 м, расположенной на высоте 5 см от дна бака. Концы полиэтиленовой трубки выходили наружу через отверстия, сделанные в торцевых стенках бака. Пространство над приемопередатчиком заполнялось слоем песка, переменной толщины  $D$ . Верхняя граница слоя песка контактировала с воздушной средой или плоским металлическим листом размером 1,2 м × 0,5 м.

Передающая и приемная антенны представляют собой идентичные полуволновые вибраторы, изготовленные из латунной трубки с внешним диаметром 6,6 мм. Конструкции антенн аналогичны [14; 15]. Плечи вибраторной антенны имели длину 3 см, а зазор между ними был равен 4 мм (рис. 2). Передающая и приемная антенны соединялись с генератором и осциллографом

с помощью 50 Ом коаксиального кабеля (RG-58 A/U). Экран и внутренняя жила кабеля омически соединялись с плечами вибратора. Кабель пропускался через внутреннюю полость вибратора, ближайшего к генератору или усилителю, чтобы его конец оказался в зазоре между вибраторами. Для придания жесткости конструкции вибраторная антенна помещена в термоусадочную трубку. Внешний вид антенны изображен на рис. 2.

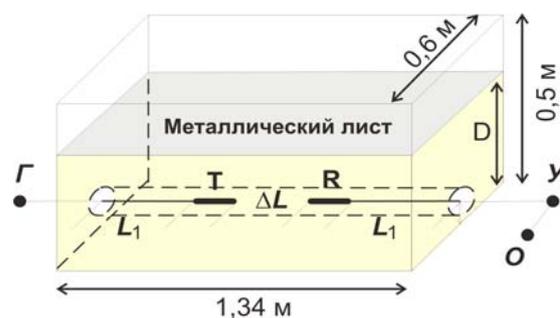


Рис. 1. Схема лабораторного радарного стенда



Рис. 2. Фотография антенны

На выходе генератора  $\Gamma$  (рис. 1) создавался видеопульс с амплитудой 30 В и длительностью 0,3 нс (генератор фирмы «Трим», ТМГ300030Р01). Стробоскопический осциллограф  $O$  (фирма «Трим», ТМР8120М) позволил проводить измерения напряжения и формы импульса в полосе частот 0–20 ГГц при уровне шума 3 мВ. Временная форма импульса на выходе генератора, ослабленного на 36 дБ, и его спектр, полученные с помощью стробоскопического осциллографа, приведены на рис. 3.

Частота спектра в точке максимума равна 2,2 ГГц, а ширина спектра  $\Delta f$  по уровню 0,5 составляет  $\Delta f_{0,5} = f_{\max} - f_{\min} = 3,63$  ГГц ( $f_{\max} = 4,39$ ,  $f_{\min} = 0,76$ ). Коэффициент широкополосности импульса на выходе генератора, определенный по формуле  $\Delta F = 2(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min})$ , равен 1,42. Данный импульс является широкополосным ( $\Delta F > 1$ ). Отношение ширины спектра импульса к его центральной частоте равно 1,65 и близко к коэффициенту широкополосности.

**Характеристики импульса, излучаемого в среду.** На рис. 4 и 5 представлена временная форма и спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны при расположении антенн на расстоянии 0,23 м друг от друга при толщине слоя песка 0,45 м. Этот импульс

содержит, кроме прямой волны, распространяющейся из излучающей антенны в приемную, также и волны, отраженные от дна, стенок, торцов бака и границы «воздух–песок». Так как амплитуды отраженных импульсов много меньше амплитуды импульса прямой волны, то импульс, изображенный на рис. 4, можно приблизительно принять за импульс, излучаемый в среду. Спектр этого импульса показан на рис. 5. Искажение временной формы этого импульса по сравнению с импульсом на выходе генератора (рис. 3), вызвано тем, что ширина амплитудно-частотной характеристики примененной вибраторной антенны меньше, чем ширина спектра импульса на входе в антенну. В результате фильтрации ширина спектра импульса на выходе приемной антенны уменьшилась, а его длительность, соответственно, увеличилась. На рис. 4 показана также огибающая комплексного аналитического сигнала, соответствующего данному импульсу (далее – огибающая импульса), которая была рассчитана как модуль амплитуды комплексного аналитического сигнала.

Длительность излученного в среду импульса (по уровню 0,2 от максимума огибающей импульса) равна 1,5 нс. Параметры частотного спектра импульса, излучаемого в среду, оказались следующие: частота спектра в точке максимума равна 2,7 ГГц, ширина

спектра  $\Delta f_{0,5} = 1,1$  ГГц, коэффициент широкополосности  $\Delta F = 0,4$ . Излучаемый в среду импульс является узкополосным ( $\Delta F < 1$ ). Рассмотрим далее процесс отражения зондирующего импульса от верхней границы слоя песка.

**Временные формы отраженных импульсов.**

На рис. 6 представлены временные формы импульсов напряжения на выходе приемной антенны в зависимости от расстояния между антеннами  $\Delta L$  и при толщине слоя песка, равной 0,45 м. На рис. 6 в левом и правом столбцах приведены формы отраженных импульсов в случае отсутствия и наличия металлического листа на верхней границе слоя песка. Использование металлического листа позволяет идентифицировать отраженный импульс (положение отмечено на рис. 6 вертикальной линией с индексом (с)). Импульс, имеющий время задержки порядка 4 нс (отмечен положением вертикальной линии с индексом (b)), был идентифицирован как импульс, отраженный от боковых стенок бака. Первой вертикальной линией слева на рис. 6 обозначен импульс, соответствующий прямой волне, распространяющейся от излучающей антенны в приемную антенну по наиболее короткому пути.

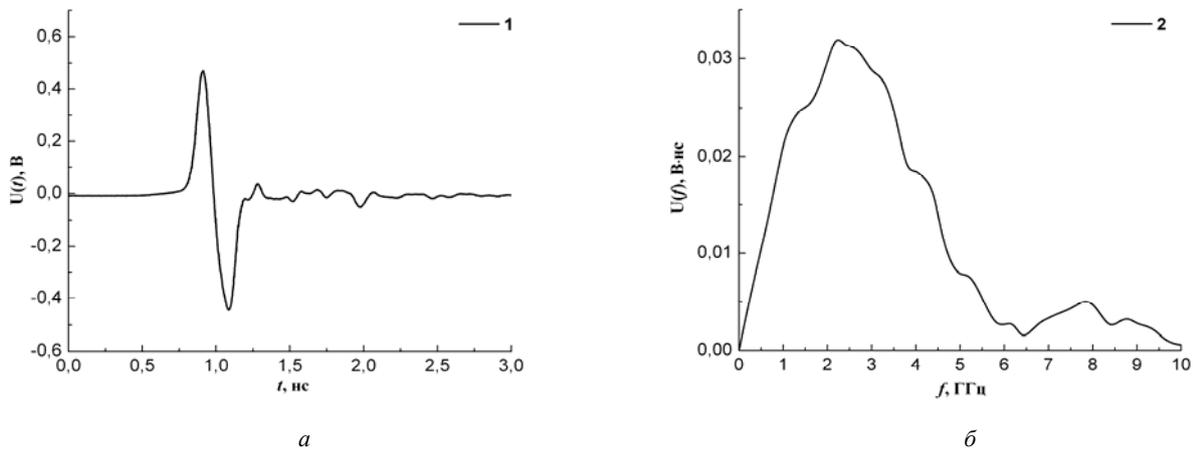


Рис. 3. Импульс напряжения (а) и спектр (б) выходного сигнала генератора

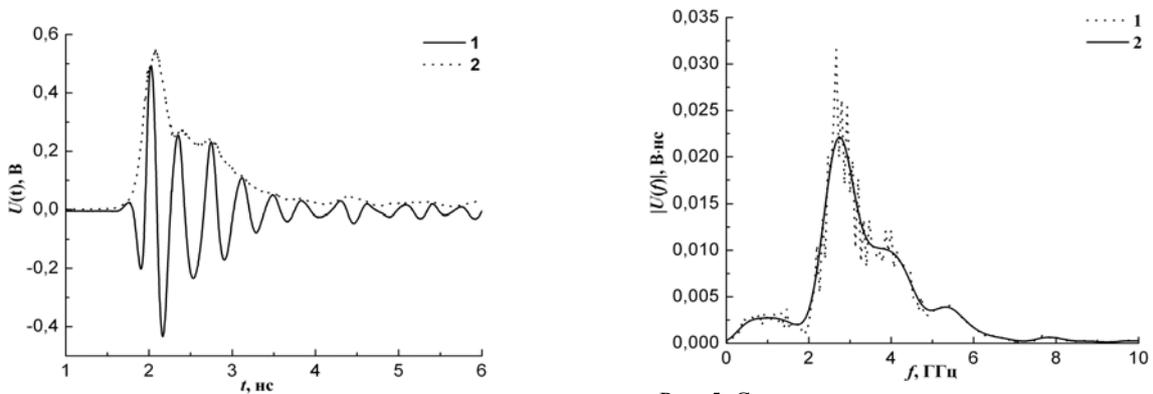


Рис. 4. Импульс напряжения на выходе приемной антенны (1) и его огибающая (2)

Рис. 5. Спектр импульса напряжения на выходе приемной антенны: 1 – первичные экспериментальные данные, 2 – результат сглаживания первичных данных

Далее рассмотрим отражение импульсов от верхней границы слоя песка, накрытого металлическим листом. Временные формы импульсов на выходе приёмной антенны и соответствующие им огибающие при разnose антенн на расстояние  $\Delta L = 23, 43$  и  $63$  см показаны на рис 7. Как видно из временных зависимостей, приведенных на рис. 7, при увеличении расстояния  $\Delta L$  между антеннами амплитуда прямого импульса, прошедшего в приемную антенну без отражений, существенно уменьшается, а запаздывание максимума огибающей импульса, отраженного от верхней границы слоя песка, увеличивается, так как эффективное расстояние

$$l_{\text{эф}} = \sqrt{4D^2 + \Delta L^2}, \quad (1)$$

пройденное этим импульсом, возрастает.

На рис. 7 также видно, что при распространении на большие расстояния амплитуда максимума огибающей отраженного импульса уменьшается за счет поглощения в среде и расходимости сферической волны, излучаемой антенной. Если принять приближение геометрической оптики для определения эффективной длины трассы (см. формулу (1)), пройденной импульсом, то можно определить скорость распространения импульсов, измеряя время задержки. Кроме того, можно определить коэффициент затухания импульсов, распространяющихся во влажном песке, измеряя амплитуды огибающей импульсов, отраженных от верхней границы слоя песка.

**Затухание и скорость распространения импульсов.** В результате обработки данных эксперимента,

подобных приведенным на рис. 7, были измерены амплитуды огибающих  $U_{ma}$ , и времена прихода  $T_{ma}$ , отраженных импульсов в зависимости от эффективной длины трассы распространения, которая изменялась при разnose антенн (см. формулу (1)). Зависимости величины  $U_{ma}$  в децибельной шкале от эффективного расстояния, проходимого отраженными импульсами, изображена на рис. 8. Значения напряжений были нормированы на напряжение импульса, соответствующее разnosу антенн  $\Delta L = 0,53$  м. Эффективное расстояние  $l_{\text{эф}}$ , соответствующее этому разnosу антенн, равно  $1,04$  м. Кроме того, при вычислении нормированной величины напряжения импульса по формуле

$$P_a(l_{\text{эф}}) = 10 \lg \frac{U_{ma}(l_{\text{эф}}) \cdot l_{\text{эф}}}{U_{ma}(l_{\text{эф}} = 1,04) \cdot 1,04} \quad (2)$$

было скомпенсировано уменьшение амплитуды импульсной волны за счет сферической расходимости. Как видно из рис. 8, в полулогарифмической шкале амплитуда импульсной волны убывает с расстоянием по линейному закону, что соответствует экспоненциальному закону ослабления с постоянным коэффициентом затухания.

Линейная регрессия, описывающая затухание амплитуды огибающей импульса напряжения в зависимости от пройденного импульсом эффективного расстояния  $l_{\text{эф}}$ , имеет вид

$$P_{ma}(l_{\text{эф}}) = 21,28 - 25,30 l_{\text{эф}}, \quad 1,04 \text{ м} < l_{\text{эф}} < 1,19 \text{ м}. \quad (3)$$

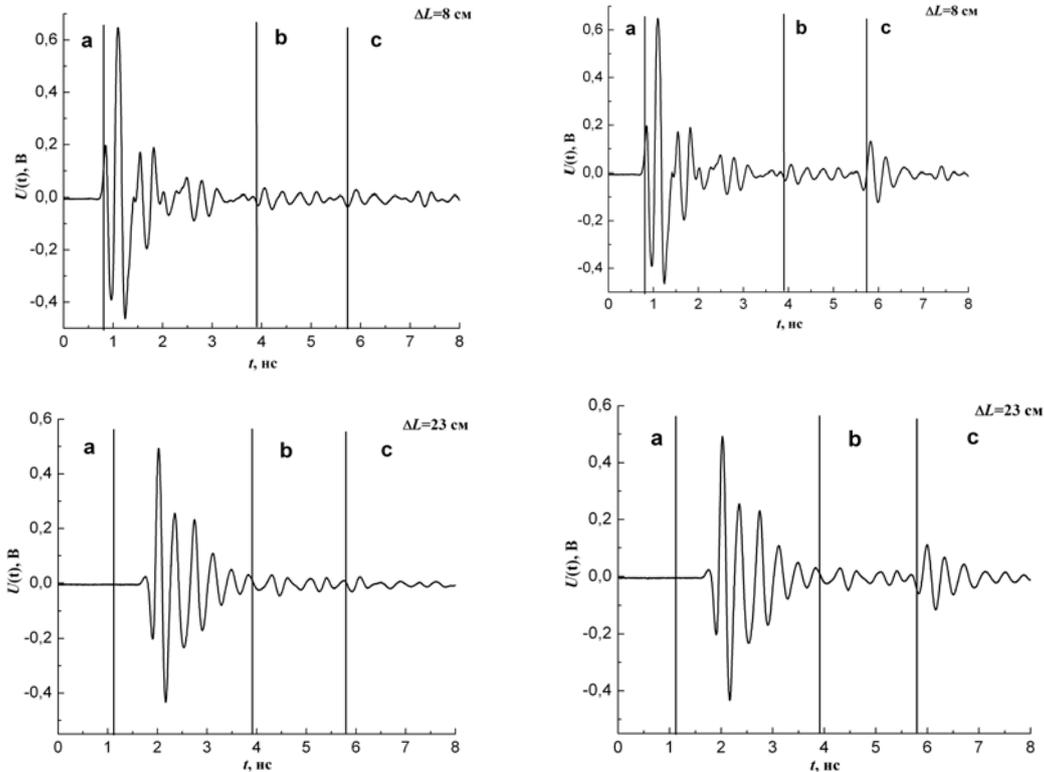


Рис. 6. Импульсы напряжения на выходе приемной антенны, соответствующие прямой волне (a) и волнам, отраженным от верхней границы слоя песка (c) и стенок бака (b)

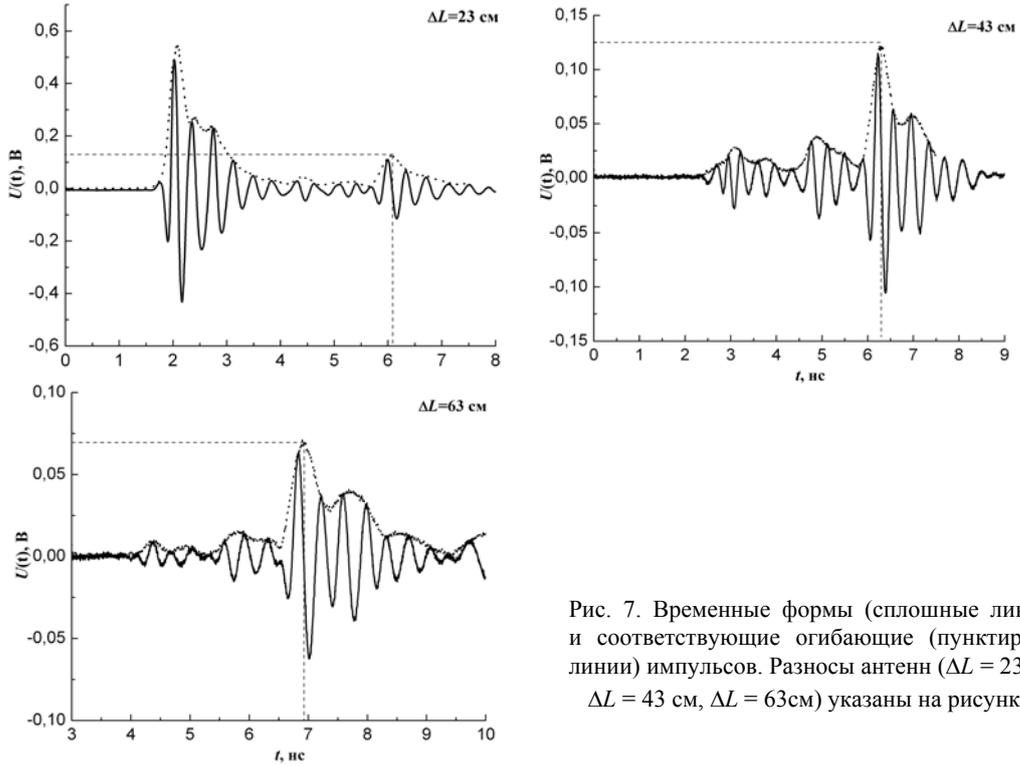


Рис. 7. Временные формы (сплошные линии) и соответствующие огибающие (пунктирные линии) импульсов. Разносы антенн ( $\Delta L = 23$  см,  $\Delta L = 43$  см,  $\Delta L = 63$  см) указаны на рисунках

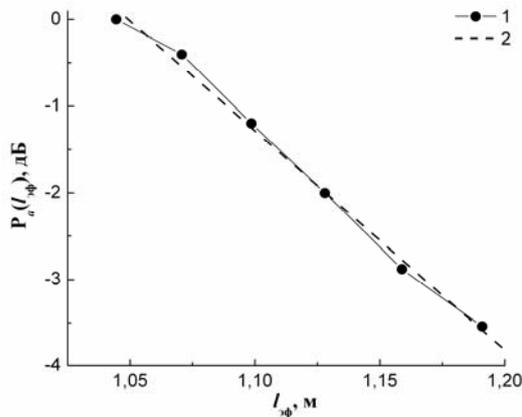


Рис. 8. Ослабление амплитуды огибающей импульса, отраженного от границы влажного песчаного слоя: 1 – измеренные данные; 2 – линии регрессии

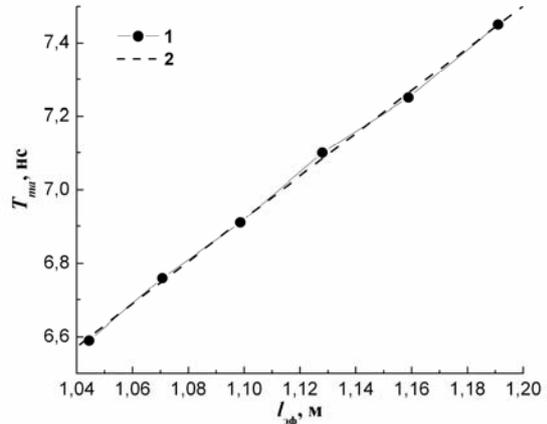


Рис. 9. Время прихода отраженного импульса: 1 – измеренные данные; 2 – линии регрессии

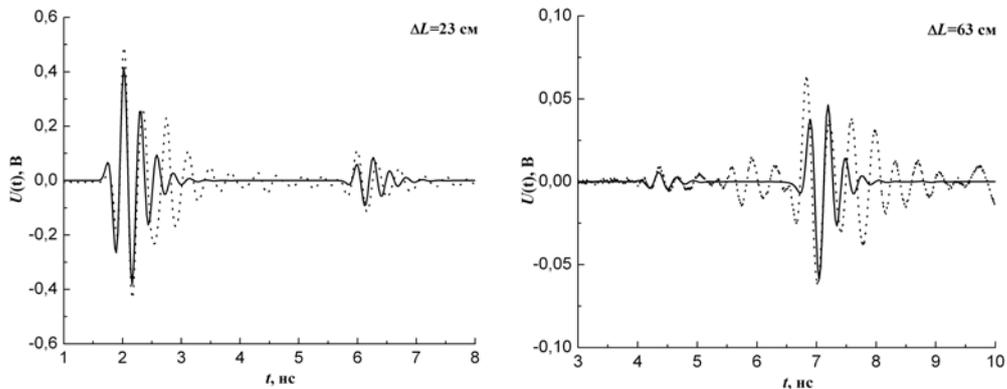


Рис. 10. Временные формы импульсов на выходе приемной антенны при разносе антенн на расстоянии  $\Delta L = 23$  см,  $\Delta L = 63$  см. Сплошная и пунктирная линии соответствуют расчету и эксперименту

Коэффициент затухания амплитуды огибающей импульса, вычисленный по формуле  $\Gamma_p = dP_a(l_{эф})/dl_{эф}$  с использованием (3), равен 25,3 дБ/м. Зависимость времени прихода отраженного импульса  $T_{ma}$  от эффективного расстояния  $l_{эф}$  имеет линейную зависимость (рис. 9), что говорит о постоянной скорости распространения импульса (среда обладает слабой частотной дисперсией диэлектрической проницаемости). Линейная регрессия, описывающая время прихода огибающей импульса в зависимости от проходного импульсом эффективного расстояния  $l_{эф}$ , имеет вид

$$T_{ma}(l_{эф}) = 5,40 \cdot 10^{-10} + 5,80 \cdot 10^{-9} l_{эф},$$

$$1,04 \text{ м} < l_{эф} < 1,19 \text{ м}. \quad (4)$$

Скорость распространения отраженного импульса в среде найдем, воспользовавшись формулой

$$V_p = \left( \frac{dT_{ma}}{dl_{эф}} \right)^{-1} \quad (5)$$

и регрессионной зависимостью (4). Эта величина составила  $V_p = 1,72 \cdot 10^8$  м/с.

**Теоретическое моделирование временных форм импульса.** Временные формы импульсов на выходе приёмной антенны, приведенные на рис. 7, были рассчитаны на основе метода дискретных источников (МДИ) [11–13]. При расчете в МДИ была использована модель комплексной диэлектрической проницаемости модельной среды нефтегазового коллектора [5]. Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными (см. рис. 7) приведены на рис. 10.

Из данных, представленных на рис. 10, видно, что рассчитанные и измеренные форма и время прихода импульса, отраженного от верхней границы слоя песка, хорошо согласуются друг с другом. Дополнительные по отношению к расчетам осцилляции, наблюдаемые в измерениях импульсов, могут быть связаны с отражениями от дна и боковых стенок бака. В то время как при расчетах среда имела одну границу раздела.

**Метод измерения расстояния до границы слоя влажного песка.** Для оценок расстояния до зондируемой границы применим следующую обработку экспериментальных данных. Из геометрооптического приближения для длины трассы, проходимой отраженным импульсом (см. формулу (1)), можно записать систему уравнений

$$L_{эф,1} = \sqrt{4D^2 + \Delta L_1^2} = V_p T_{am,1},$$

$$L_{эф,i} = \sqrt{4D^2 + \Delta L_i^2} = V_p T_{am,i}, \quad (6)$$

где  $T_{am,1}$ ,  $T_{am,i}$  – время регистрации максимума огибающей импульса при разносах антенн  $\Delta L_1$  и  $\Delta L_i$  соответственно. В уравнениях (6) локальная скорость распространения импульсов на различных дистанциях, согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 9, принята постоянной. Величины  $T_{am,1}$ ,  $T_{am,i}$ ,  $\Delta L_1$ ,  $\Delta L_i$  известны из результатов проведенного эксперимента. В результате решения системы уравне-

ний (6) расстояния до границы слоя влажного песка могут быть найдены по формуле

$$D_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta L_i^2 t_i^2 - t_i^2 \Delta L_1^2}{t_i^2 - t_1^2}}, \quad (7)$$

где индекс  $i$  относится к изменяющемуся с шагом 5 см разносу антенн ( $i = 2$  при  $\Delta L = 0,58$  м и  $i = 5$  при  $\Delta L = 0,73$  м). Оценка расстояния до границы как среднего значения по всем измерениям составила  $D_{эксп} = 0,46$  м (рис. 11). При этом действительное расстояние до границы слоя песка было равно  $0,45 \pm 1$  см.

Таким образом, в случае слабо диспергирующей среды, когда локальная скорость распространения импульса приближенно постоянна, можно определить расстояние до границы слоя с помощью скважинного зонда, измеряя время прихода импульса при нескольких известных расстояниях между передающей и приемной антеннами. При этом нет необходимости иметь дополнительную информацию о диэлектрической проницаемости и эффективной проводимости водонасыщенного песчаника.

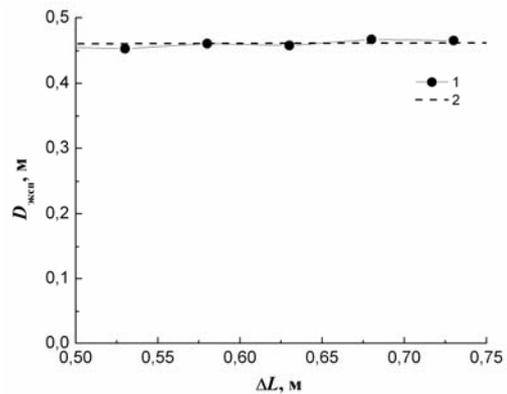


Рис. 11. Оценка расстояния до отражающей границы: 1 – вычисление по формуле (7), 2 – среднее значение

**Заключение.** Экспериментально подтверждена применимость теоретической модели скважинного зонда, созданной авторами с применением метода дискретных источников для прогноза временной формы и времени задержки импульса, отраженного от границ слоистой среды. Предложен способ определения расстояния до границы слоя влажного песка по значениям временной задержки отраженного импульса, измеренным для различных расстояний между передающей и приемной антеннами радара. Данный способ позволяет определять расстояние до границы слоя с относительной погрешностью 2,2 % без привлечения априорной информации об электрофизических свойствах среды в слое. Результаты данного исследования позволяют спланировать и начать стендовые испытания опытных образцов скважинных зондов.

#### Библиографические ссылки

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. Vol. 40, No. 9. P. 2083–2092.
2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1999. Vol. 37, No. 4. P. 1940–1950.

3. Epov M. I. [et al.]. A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging // *Russian Geology And Geophysics*. 2013. Vol. 54, No. 9. P. 1103–1107.
4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50, № 1. P. 46–52.
5. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011 г. С. 110.
6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation // *Russian Geology and Geophysics*. 2007. Vol. 48, No. 12. P. 1054–1060.
7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. Geosteering Technology of Drilling Tool in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir // *Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON*. 2011. P.155–158.
8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas // *Proceedings PIERS*. (September 12–16). Suzhou, CHINA, 2011. P. 59–62.
9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool // in *Proceedings IGARSS* (July 25–30). Honolulu, USA, 2010. P. 3565–3567.
10. Музалевский К. В. Измерение частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости нефтенасыщенных горных пород с помощью скважинного зонда // *Вестник СибГАУ*. 2011. Т. 40, № 7. С. 127–131.
11. Эпов М. И., Кабанихин С. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Шишленин М. А. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // *Сиб. журн. индустр. матем.* 2011. Т. 14, № 2. С. 132–138.
12. Эпов М. И., Миронов В. Л., Музалевский К. В., Кабанихин С. И. Применение метода дискретных источников для расчёта полей СШП импульсного электромагнитного дипольного зонда в средах нефтегазового коллектора // *Известия вузов. Физика*. 2010. Т. 53, № 9/3. С. 257–262.
13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media // in *PIERS Preceeding*. 2009. Vol. 1. P. 303–305.
14. Ebihara S., Hashimoto Y. MoM analysis of dipole antennas in crosshole borehole radar and field experiments // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. Vol. 45, No. 8. P. 2435–2450.
15. Moghaddam M. Response of a vertical magnetic dipole in cylindrically stratified media. M. S. thesis, Univ. Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1989.
2. Hansen T. B. The far field of a borehole radar and its reflection at a planar interface. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999, vol. 37, no. 4, p. 1940–1950.
3. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Eltsov I. N., Salomatov U. P., A Geosteering Tool for Horizontal Well Logging. *Russian Geology and Geophysics*. 2013, vol. 54, no. 9, p. 1103–1107.
4. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevskiy K. V. Ultrabroadband electro- magnetic wave propagation in hydrocarbon reservoirs in the presence of an oil-water interface. *Russian Geology and Geophysics*. 2009, vol. 50, no. 1, p. 46–52.
5. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Sverkhshirokopolosnoye elektromagnitnoye zondirovaniye neftegazovogo kollektora [Ultra-wideband electromagnetic sounding of the oil and gas reservoir]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2011, 110 p.
6. Epov M. I., Mironov V. L., Komarov S. A., Muzalevsky K. V. Nanosecond electromagnetic sounding of a fluid-saturated layered formation. *Russian Geology and Geophysics*. 2007, vol. 48, no. 12, p. 1054–1060.
7. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N., Geosteering Technology of Drilling Tool in a Layered Medium Oil and Gas Reservoir. *Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON*. 2011, p. 155–158.
8. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Borehole Logging Tool to Explore the Electrical and Structural Properties of Near-wellbore Fluid-filled Areas. *Proceedings PIERS*. 2011, September 12–16, Suzhou, CHINA. P. 59–62.
9. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Yeltsov I. N. UWB Electromagnetic Borehole Logging Tool. in *Proceedings IGARSS*. 2010, July 25–30, Honolulu, USA. P. 3565–3567.
10. Muzalevskiy K.V. [Measurement of the frequency spectra of the complex permittivity of the oil-saturated rocks using the logging tool] *Vestnik SibGAU*. 2011, , no. 7(40), p. 127–131. (In Russ.)
11. Epov M. I., Kabanikhin S. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Shishlenin M. A. [A comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas collectors]. *Sib. Zh. Ind. Mat.* 2011, vol. 14, no. 2, p. 132–138. (in Russ.)
12. Epov M. I., Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., Kabanikhin S. I. [Application of the method of discrete sources to calculate the pulsed electromagnetic fields UWB dipole probe in environments of oil and gas reservoir]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2010, no. 9/3, p. 257–262. (In Russ.)
13. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V. Testing of the theoretical model for a wideband pulse propagation in the oil-gas collector media. *PIERS Preceeding*. 2009, Vol. 1, p. 303–305.
14. Ebihara S., Hashimoto Y. MoM analysis of dipole antennas in crosshole borehole radar and field experiments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007, vol. 45, no. 8, p. 2435–2450.
15. Moghaddam M. Response of a vertical magnetic dipole in cylindrically stratified media. M.S. thesis, Univ. Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, 1989.

## References

1. Liu S., Sato M. Electromagnetic logging technique based on borehole radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, vol. 40, no. 9, p. 2083–2092.