

ГЕОФИЗИКА

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИМПУЛЬСА В НЕФТЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ КОЛЛЕКТОРА
В ПРИСУТСТВИИ ВОДОНЕФТЯНОГО КОНТАКТА

М.И. Эпов, В.Л. Миронов*, С.А. Комаров*, К.В. Музалевский**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

** Институт физики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, строение 38, Россия*

*** Алтайский государственный университет, 656049, Барнаул, просп. Ленина, 61, Россия*

В данной работе проведено численное моделирование распространения широкополосных импульсов, излучаемых электрическим диполем в однородной нефтенасыщенной среде и в нефтенасыщенной среде в присутствии водонефтяного контакта (ВНК). Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики для нефтенасыщенного и водонасыщенного слоев коллектора как низкочастотных фильтров, и найдены соответствующие частоты среза. Получены оценки удельного затухания плотности потока энергии электромагнитных импульсов наносекундной и пикосекундной длительности, распространяющихся в однородной нефтенасыщенной среде коллектора и отраженных от границы ВНК. Исследовано влияние низкочастотной фильтрации спектров зондирующих импульсов на удельное затухание плотности потока энергии импульсов по мере их распространения в нефтенасыщенной среде.

Горизонтальная скважина, флюидонасыщенный коллектор, комплексная диэлектрическая проницаемость, дисперсные смеси, рефракционная модель диэлектрической проницаемости, широкополосный импульс, функция Грина, численное моделирование.

ULTRABROADBAND ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION
IN HYDROCARBON RESERVOIRS IN THE PRESENCE OF AN OIL-WATER INTERFACE

M.I. Epov, V.L. Mironov, S.A. Komarov, and K.V. Muzalevskii

Numerical experiments are applied to simulate propagation of broadband pulses which are transmitted by an electric dipole and travel in a uniform oil-bearing formation or in a layered reservoir with an oil-water interface. We calculate the frequency responses of the oil- and water-saturated layers as low-frequency filters for the propagating waves and find the respective cutoff frequencies. Attenuation rates are analyzed in the cases of incident nanosecond and picosecond pulses in uniform oil-bearing formations and those reflected from the oil-water interface. The low frequency filtration of pulses is investigated in terms of its effect on wave energy attenuation during propagation in oil-bearing rocks.

Horizontal well, fluid-saturated formation, complex permittivity, dispersive mixtures, refractive dielectric model, broadband pulse, Green's function, simulation

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при разработке скважин с горизонтальным завершением является обнаружение границ нефтенасыщенного коллектора с целью геонавигации бурового оборудования [Эпов и др., 1998а,б; Эпов, 2002]. Использование сверхширокополосных электромагнитных импульсов [Дворецкий, Ярмахов, 1998] может открыть новые возможности для решения этой проблемы. В предыдущей статье авторов [Эпов и др., 2007] были рассмотрены возможности применения для этих целей монохроматических импульсов с гауссовской амплитудной модуляцией, ширина спектра которых меньше несущей частоты. Затухание таких импульсов, как показано в этой работе, близко к затуханию монохроматической волны и слабо возрастает с уменьшением длительности импульса.

В данной работе рассмотрены реальные сверхширокополосные видеоимпульсы, ширина спектра которых больше, чем частота, соответствующая максимуму их спектра. При распространении в диспергирующей среде, вследствие зависимости от частоты фазовой скорости и затухания частотных гармоник, исходный импульс уширяется во времени и затухает. Явления затухания и уширения длительности

зондирующего импульса определяют предельную дальность и погрешность зондирования водонефтяного контакта (ВНК).

Исследовано искажение формы и затухание энергии сверхширокополосных импульсов как при распространении в однородной нефтенасыщенной среде, так и в нефтенасыщенной среде в присутствии ВНК. Результаты данного исследования могут быть использованы для оценок предельной дальности и погрешности зондирования ВНК при геонавигации горизонтальных скважин.

ПОСТАНОВКА И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Представим плоскостойкий коллектор двумя полупространствами с общей границей раздела. Геометрия задачи изображена на рис. 1. Поместим горизонтальный диполь на высоте D над границей ВНК.

На расстоянии ΔL от него по горизонтали находится точка приема ($x = 0, t = \Delta L, z = D$). Значение плотности электрического тока диполя представим в следующем виде:

$$\mathbf{j}^e(x, y, z, t) = I(t)l\delta(x)\delta(y)\delta(z - D)\mathbf{e}_x, \quad (1)$$

где $I(t)$ — плотность тока импульса, l — длина диполя, $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, \mathbf{e}_x — орт декартовой системы координат. Решение уравнений Максвелла для электрического поля диполя в нефтенасыщенном полупространстве находим аналогично работе [Зоммерфельд, 1948]. Компоненты поля электрического поля E_x представляются в виде преобразования Фурье в пространственной и временной областях и для временной зависимости вида $e^{-i\omega t}$ записываются в форме

$$E_x^{ins}(x_r, y_r, z, \omega) = \frac{I(\omega)l}{8\pi^2 \omega \varepsilon(\omega) \varepsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\alpha_x d\alpha_y}{w} e^{i(\alpha_x x_r + \alpha_y y_r)} (k_0^2 \varepsilon(\omega) - \alpha_x^2) e^{i\omega(z - D)}, \quad (2)$$

$$E_x^{refl}(x_r, y_r, z, \omega) = \frac{I(\omega)l}{8\pi^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon(\omega)} \int_{-\infty}^{\infty} d\alpha_x d\alpha_y e^{i(\alpha_x x_r + \alpha_y y_r)} \frac{e^{i\omega(z + D)}}{\alpha_x^2 + \alpha_y^2} \times \\ \times \left(\alpha_x^2 R_{\parallel}(\alpha, \omega) w - \alpha_y^2 \frac{k_0^2 \varepsilon(\omega)}{w} R_{\perp}(\alpha, \omega) \right), \quad (3)$$

где E_x^{ins} — падающее поле, E_x^{refl} — отраженное поле от полупространства, $I(\omega)$ — спектр плотности тока импульса, $w = \sqrt{k_0^2 \varepsilon(\omega) - \alpha_x^2 - \alpha_y^2}$ — поперечное волновое число, $\varepsilon(\omega)$ и $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м) — диэлектрическая проницаемость нефтенасыщенного полупространства и вакуума соответственно, $k_0 = \omega/c$ — волновое число в свободном пространстве, ω — круговая частота электромагнитной волны, c — скорость света, α_x, α_y — продольные волновые числа, R_{\perp} и R_{\parallel} — коэффициенты отражения Френеля от плоской границы ВНК для ТЕ- и ТМ-поляризаций соответственно. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\omega)$ вычислялась так же, как в работе [Эпов и др., 2007], на основе спектроскопической модели [Migonov et al., 2004]. Данная модель в случае смесей нефти солевого раствора и песка получила экспериментальное подтверждение в работе [Савин и др., 2007]. Применяя обратное преобразование Фурье по частоте к выражениям (2), (3), получим временные зависимости видеоимпульсов в нефтенасыщенной среде на любых расстояниях от источника.

Для понимания процессов затухания и искажения формы импульсов в нефтенасыщенной среде в следующем разделе будет проведен анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и импульсной передаточной функции (ИПФ) при распространении плоских волн в нефтенасыщенной и водонасыщенной средах коллектора.

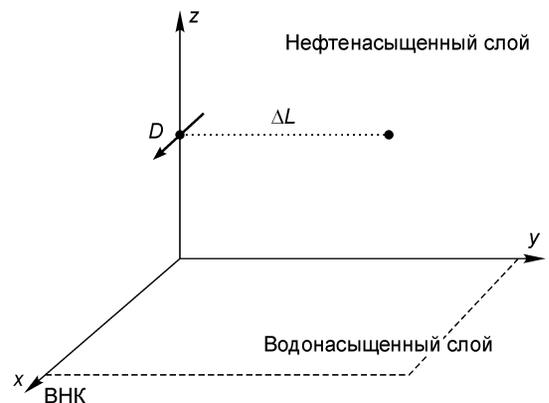


Рис. 1. Двухслойный коллектор.

Источник и приемник расположены на высоте $z = D$.

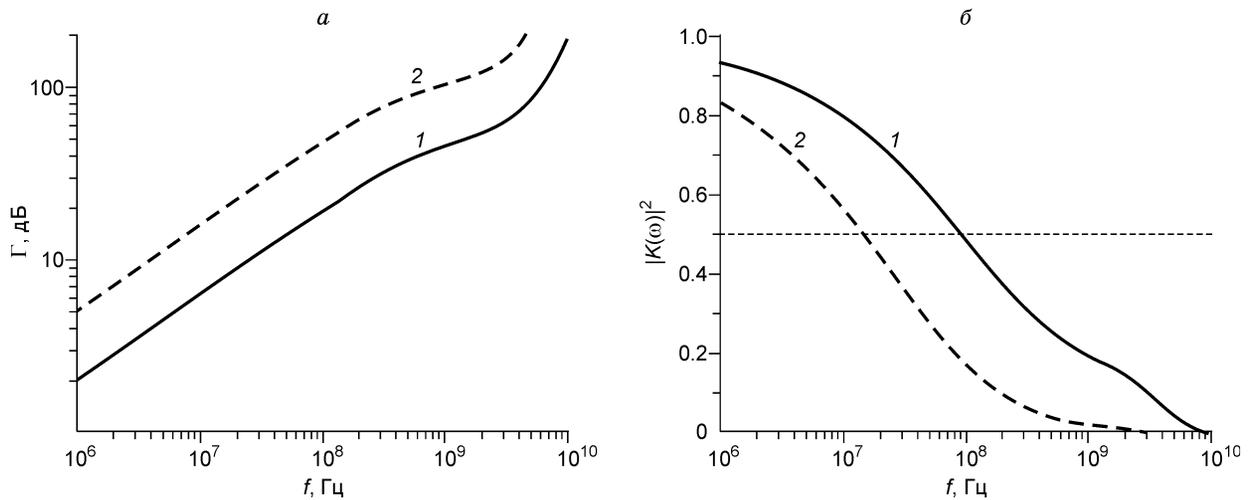


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика (а) и логарифмический коэффициент затухания Γ (б) для нефтенасыщенного (1) и водонасыщенного (2) слоев.

АЧХ И ИПФ СРЕД КОЛЛЕКТОРА

Представим АЧХ при распространении плоской волны в среде на расстояние 1 м в виде

$$|K(\omega)| = \exp(-\kappa\omega/c), \quad (4)$$

где $\kappa\omega/c = \text{Im} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \omega/c$ — коэффициент затухания гармонической составляющей импульса на частоте ω АЧХ и логарифмический коэффициент затухания

$$\Gamma = (20 \lg e) \frac{\omega}{c} \kappa \text{ (дБ)}, \quad (5)$$

рассчитанные для нефтенасыщенного и водонасыщенного слоев коллектора с применением диэлектрической модели для $\varepsilon(\omega)$, предложенной в работе [Эпов и др., 2007], представлены на рис. 2, а и б соответственно.

Как следует из рис. 2, а, среда каждого из слоев представляет собой фильтр низких частот. Частоты среза, соответствующие уровню 0.5 от квадрата АЧХ (см. рис. 2, б, штриховая линия), равны: 14.2 МГц для водонасыщенного слоя; 93.6 МГц для нефтенасыщенного слоя. Таким образом, водонасыщенный слой сильнее поглощает высокочастотные компоненты импульсного сигнала по сравнению с нефтенасыщенным слоем. В случае нефтенасыщенной среды (см. рис. 2, б), логарифмический коэффициент затухания для высоких и низких частот относительно частоты среза (93.6 МГц) оказывается соответственно больше и меньше величины ≈ 10 дБ/м. При распространении импульса преимущественно затухают компоненты спектра в области высоких частот.

Основываясь на АЧХ нефтенасыщенной среды, показанной на рис. 2, а, рассчитаем ИПФ $g(t)$, которая является откликом среды на возбуждение дельта-импульсом. Эти зависимости для различных дистанций распространения импульсной плоской волны в нормированном виде представлены на рис. 3.

Характерной особенностью отклика среды является уменьшение крутизны переднего фронта и возникновение экспоненциального следа распрост-

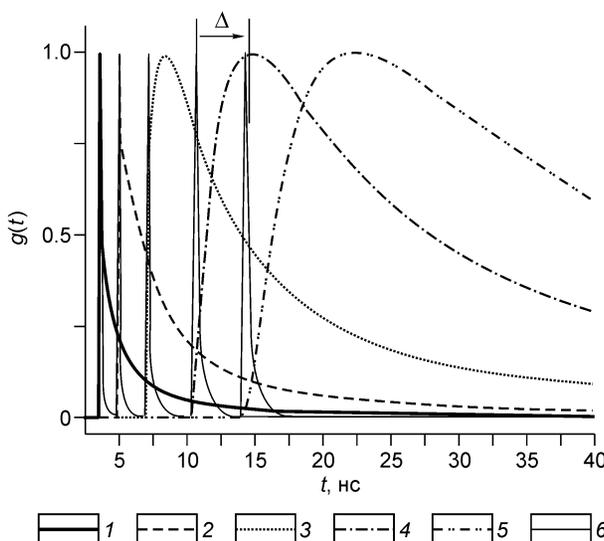


Рис. 3. Импульсная переходная функция нефтенасыщенной среды для различных расстояний (м): 1 — 0.5, 2 — 0.7, 3 — 1, 4 — 1.5, 5 — 2, 6 — соответствующая характеристика в отсутствие омической проводимости.

ранящегося импульса. В среде без омической проводимости, с учетом только релаксационных потерь, след импульса практически исчезает (см. кривые 6 на рис. 3). Кроме того, за счет омической проводимости максимум распространяющегося импульса запаздывает на некоторое время Δ относительно максимума импульса, распространяющегося в среде без омической проводимости.

Для оценки влияния сорта нефти на АЧХ нефтенасыщенного слоя были сравнены спектры комплексной диэлектрической проницаемости слоя, содержащего нефть Нурлатского месторождения [Сараев и др., 2003, 2005] или месторождения в Северном море [Folgero, 1995]. Наибольшие различия находились в пределах 1.7 и 3.6 % для диэлектрической проницаемости и фактора потерь соответственно. Ввиду столь незначительных вариаций диэлектрических характеристик, на данном этапе исследований, который ставит своей целью оценить по порядку величины предельно возможную дальность и разрешение при зондировании ВНК, вопрос о влиянии сорта нефти можно пока детально не рассматривать.

ИСКАЖЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ФОРМЫ И ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ИМПУЛЬСОВ

Распространение в однородной нефтенасыщенной среде. Рассмотрим вначале распространение сферической волны в однородной нефтенасыщенной среде. Волна возбуждается диполем. Амплитуда электрического тока в диполе выбрана равной 1.0 А. Формы импульсов тока и их спектры представлены на рис. 4.

Такие биполярные импульсы реализованы в коммерчески доступных генераторах ТМГ100010P01 и ТМГ1500.080P02, которые производятся компанией «ТРИМ» (г. Санкт-Петербург). Длительность импульсов на уровне 0.1 от максимального значения равна 0.1 и 1.5 нс соответственно.

Спектры импульсов вычислялись с использованием выражений (2), (3), которые являются строгим решением уравнений Максвелла и применимы для расчета спектров как в ближней, так и в дальней (волновой) зонах относительно излучателя. Численное интегрирование в (2), (3) осуществлялось с помощью формулы Гаусса с 24 узлами. С помощью вычисленных спектров, временная зависимость поля импульсов рассчитывалась методом быстрого преобразования Фурье, при этом использовалось 65 536 отсчетов. Относительная погрешность вычислений составила меньше 0.1 %.

Из рис. 5 видно, что для импульсов длительностью 1.5 и 0.1 нс на расстояниях 2.5 и 2.4 м спектральные плотности поля импульсов занимают приблизительно полосу частот от 0 до 0.2 ГГц, которая лежит ниже условной частоты среза АЧХ нефтенасыщенной среды (порядка 0.1 ГГц, см рис. 2, а). При этом спектры поля импульсов вблизи излучателя (на расстоянии 0.2 м) занимают полосы частот 1.0—5.0 и 0.2—20.0 ГГц соответственно. Таким образом, так как при распространении импульса его спектр перемещается в область частот ниже условной частоты среза АЧХ нефтенасыщенной среды, то должно существовать такое критическое расстояние $L_{кр}$, при прохождении которого удельное затухание энергии импульса уменьшится благодаря тому, что на расстояниях, больших, чем $L_{кр}$, спектр импульса находится в области частот меньше, чем частота среза, и удельное затухание всех монохроматических компонент импульса становится меньше (см. рис. 2, б).

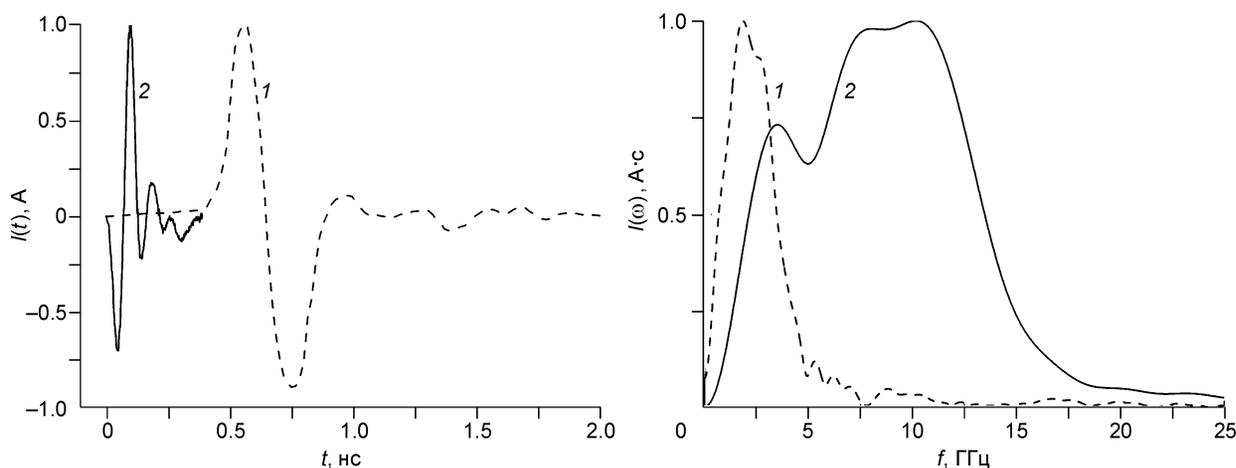


Рис. 4. Форма импульсов и нормированный спектр тока реальных широкополосных импульсов двух длительностей:

1 — $t = 1.5$, 2 — $t = 0.1$ нс.

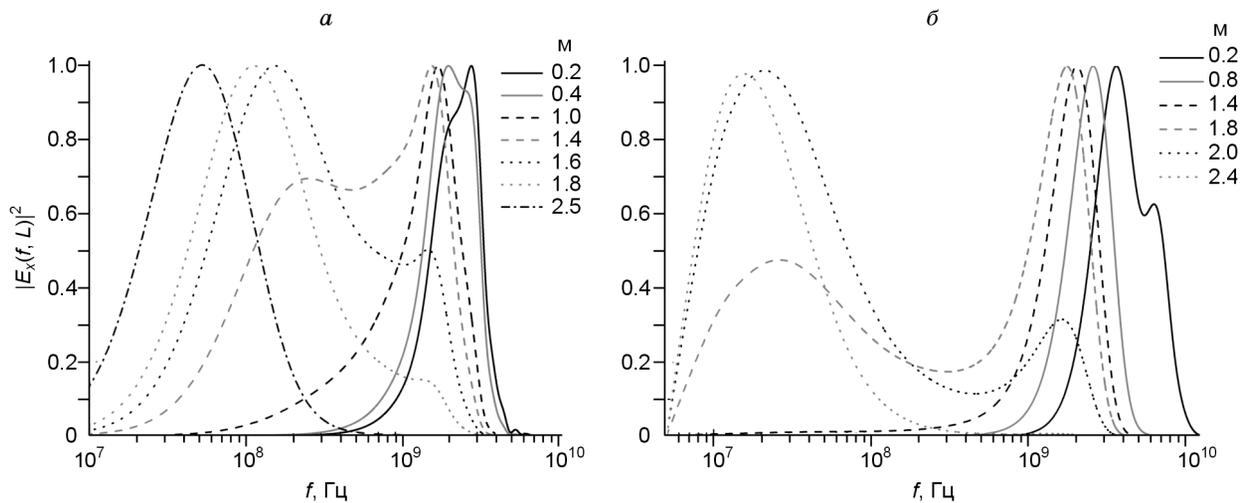
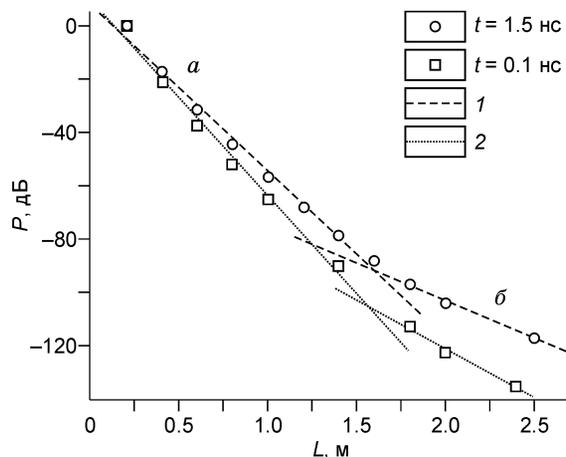


Рис. 5. Спектр реального импульса длительностью $t = 1.5$ нс (а) и $t = 0.1$ нс (б) при прохождении в однородной нефтенасыщенной среде расстояния L .

Для оценки затухания энергии импульсов рассмотрим полный поток энергии импульса (P) через единичную площадку

$$P = \int_0^{\infty} |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| dt \text{ (Дж/м}^2\text{)}. \quad (6)$$

Данная характеристика, нормированная на полный поток энергии импульса, прошедшего 0.2 м в однородной нефтенасыщенной среде, представлена в логарифмическом масштабе на рис. 6. Здесь видно, что плотность потока энергии импульсов затухает с расстоянием приблизительно по кусочно-экспоненциальному закону (удельное затухание слабо зависит от расстояния на каждом из участков). При этом, действительно, на некотором расстоянии $L_{кр}$, которое равно приблизительно 1.7 м, наблюдается изменение удельного коэффициента затухания, что выражается в изменении наклона прямых линий регрессии. Кроме того, можно заметить, что более короткий импульс (0.1 нс) имеет большее на 10 дБ/м значение удельного коэффициента затухания потока энергии (наклон линии регрессии круче) по сравнению с импульсом длительностью 1.5 нс, так как спектр последнего сосредоточен в более низкочастотной области, где удельное затухание спектральных компонент меньше (см. рис. 2, б). В целом затухание потока энергии импульсов на расстоянии порядка 2.0—2.5 м составляет около 120 дБ. Затухание импульсов в нефтенасыщенной среде является не единственным фактором, принципиально ограничивающим дальность зондирования. В частности, современные георадары [Резников и др., 2000] обладают динамическим диапазоном около 120 дБ, поэтому с точки зрения энергетических потерь глубина зондирования могла бы составить около 2.0—2.5 м. Однако в связи с затуханием высокочастотных компонент в спектре импульса (см. рис. 5) его длительность должна увеличиться, что приведет к увеличению погрешности в определении



расстояния по положению импульса на временной шкале относительно исходного излучаемого импульса. Поэтому рассмотрим далее изменение временной формы распространяющегося импульса.

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования временной формы реальных биполярных импульсов длительностью $t = 1.5$ и 0.1 нс (см. рис. 4) для продольной компоненты поля E_x при рас-

Рис. 6. Нормированная плотность потока энергии импульсов в зависимости от пройденного расстояния L .

Регрессионные линии: 1а — $P = -8.0 \dots -62.4L$, 1б — $P = -46.7 \dots -28.20L$, 2а — $P = 9.7 \dots -73.7L$, 2б — $P = -47.1 \dots -36.9L$.

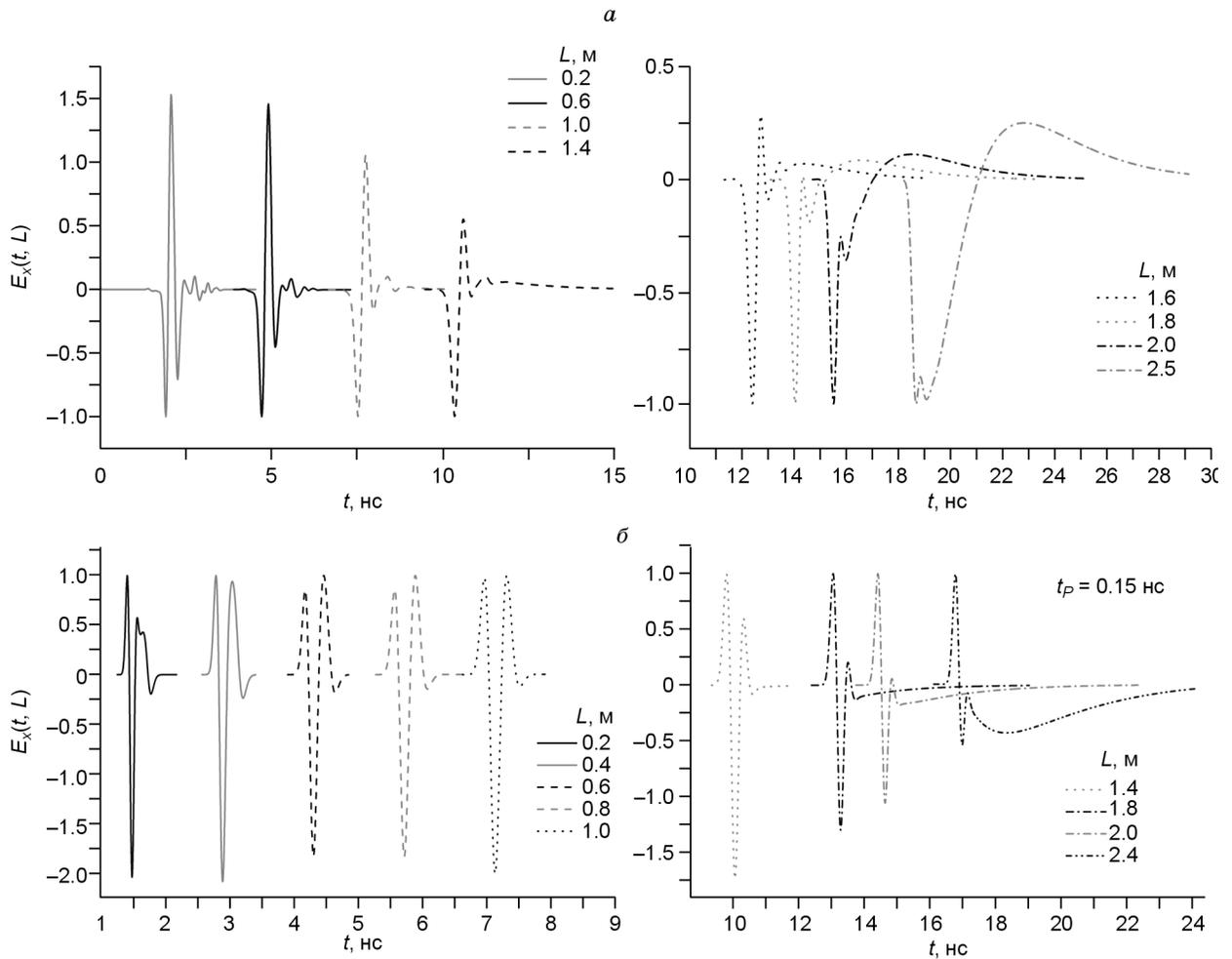


Рис. 7. Форма реального импульса длительностью $t = 1.5$ нс (а) и $t = 0.1$ нс (б) при прохождении в однородной нефтенасыщенной среде расстояния L .

пространении на различные расстояния. Все импульсы нормированы на свое максимальное по модулю отрицательное значение. Величина уменьшения амплитуды импульсов по мере распространения может быть оценена из данных, представленных на рис. 5 и 6.

По мере распространения импульсов происходит затягивание переднего и, в особенности, заднего фронтов (см. рис. 7). Такое поведение формы импульсов согласуется с затягиванием фронтов импульсной переходной функции, показанной на рис. 3. Как отмечается в работе [Вайнштейн, 1975], затягивание заднего фронта возникает за счет того, что в поглощающей среде импульс потока энергии опережает импульс мощности потерь, вследствие чего потери искажают преимущественно задний фронт импульса. Из сравнения данных, представленных на рис. 3, 7, следует, что задний фронт реального импульса на расстоянии порядка 2.0—2.5 м, независимо от исходной длительности импульса, имеет приблизительно такую же длительность, как и задний фронт импульсной переходной характеристики. Однако вследствие того, что исходный импульс является биполярным, длительность его переднего фронта (см. рис. 7) оказывается на расстоянии порядка 2.0—2.5 м значительно меньше соответствующей величины для ИПФ, показанной на рис. 3, которая соответствует однополярному импульсу в виде дельта-функции Дирака. Такое поведение временной формы распространяющегося импульса согласуется с динамикой его спектрального состава (см. рис. 5 и 6).

Вследствие уширения импульса при распространении в нефтенасыщенной среде его длительность занимает все более возрастающую часть от временного интервала между излученным и принятым импульсами, что приводит к возрастанию ошибки определения местоположения его в пространстве. Этот вопрос будет более детально проанализирован в следующем разделе при рассмотрении отражений сверхширокополосного импульса от ВНК.

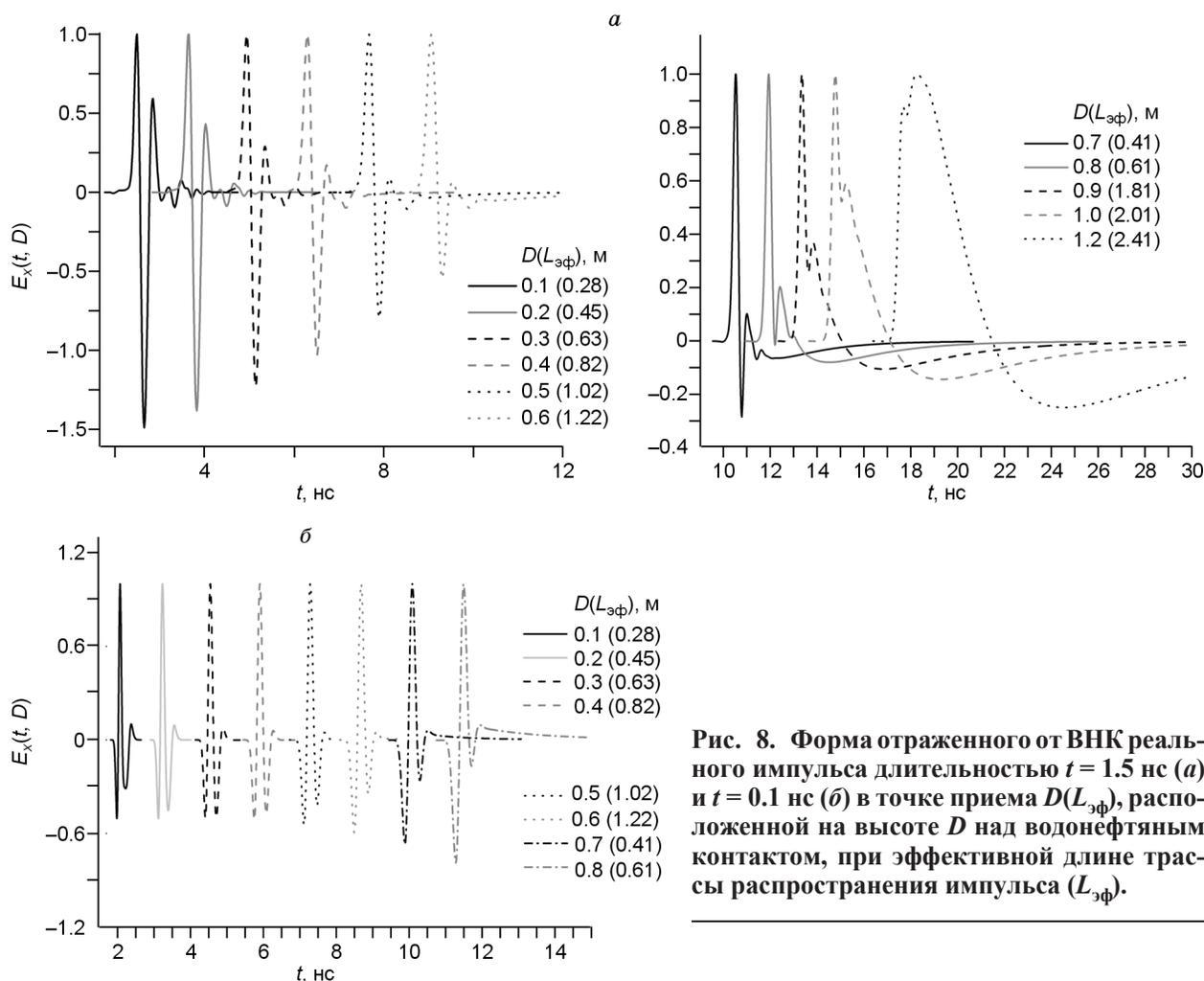


Рис. 8. Форма отраженного от ВНК реального импульса длительностью $t = 1.5$ нс (а) и $t = 0.1$ нс (б) в точке приема $D(L_{эф})$, расположенной на высоте D над водонефтяным контактом, при эффективной длине трассы распространения импульса ($L_{эф}$).

Распространение импульсов, отраженных от ВНК. Рассмотрим распространение импульсов в полубесконечной нефтенасыщенной среде, имеющей границу с водонасыщенным полупространством. Пусть излучающий диполь и точка приема, отстоящая от диполя на расстоянии ΔL , располагаются на высоте D над ВНК (см. рис. 1). Результаты расчета временной формы импульсов для продольной компоненты электрического поля, проведенные с использованием формул (2), (3), представлены на рис. 8. Эти результаты относятся к реальным импульсам длительностью 1.5 и 0.1 нс при разnose излучателя и точки приема $\Delta L = 0.2$ м. При этом величина $L_{эф} = \sqrt{(4D^2 + \Delta L^2)}$ принимается за геометрооптическую оценку эффективной длины трассы распространения отраженного импульса.

Так же как и в случае однородной нефтенасыщенной среды (см. рис. 7), показанные на рис. 8 импульсы нормированы на модуль своего наибольшего значения. Динамика формы отраженных от ВНК импульсов по мере увеличения эффективной длины трассы распространения аналогична той, которая наблюдается при распространении импульса в однородной нефтенасыщенной среде.

Оценим величину пространственного разрешения при зондировании ВНК импульсами, представленными на рис. 8. Примем за верхнюю оценку погрешности определения положения ВНК относительно источника импульсного сигнала расстояние $\Delta s = \Delta t \cdot c/n$, где n — показатель преломления нефтенасыщенной среды для частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности отраженного от границы импульса, длительность которого равна Δt . Зависимость относительной погрешности в определении расстояния D приведена на рис. 9. Видно, что для зондирующего импульса с заданной исходной длительностью существует некоторое оптимальное расстояние, на котором наблюдается минимальная погрешность определения положения ВНК. На дальностях, меньших оптимальных, погрешность возрастает за счет того, что приходится определять расстояния, соизмеримые с длиной исходного импульса в пространстве. В то время как на больших расстояниях погрешность возрастает за счет уширения длительности зондирующего импульса при его распространении в нефтенасыщенной среде. При этом, как

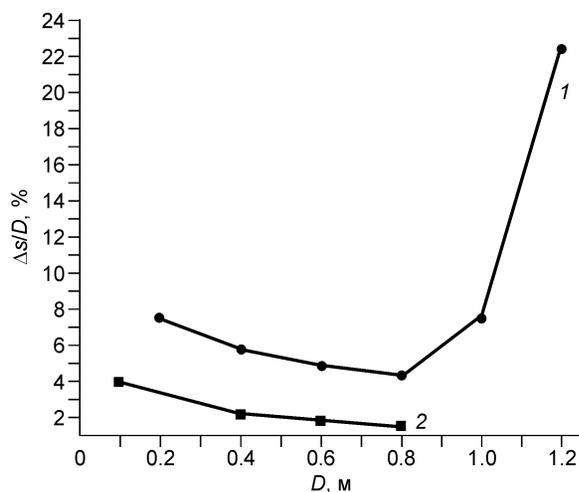


Рис. 9. Погрешность определения расстояния от источника импульсов до ВНК для двух длительностей исходных импульсов:

1 — $t = 1.5$ нс, 2 — $t = 0.1$ нс.

следует из рис. 9, на расстояниях до 1 м погрешность определения ВНК в пространстве не превышает 10 %.

Чтобы оценить динамический потенциал широкополосного локатора, необходимый для преодоления затухания в среде коллектора, рассчитаем полный поток энергии импульса (P), отраженного от границы ВНК. На рис. 10 показана найденная с использованием формул (2), (3) и (6) плотность потока энергии в импульсе, которая нормирована на плотность потока энергии в импульсе, распространяющемся на расстояние $\Delta L = 0.2$ м в однородной нефтенасыщенной среде. Для сравнения на этом же рисунке приведены данные для импульса, распространяющегося в нефтенасыщенной среде на расстояние $L_{эф}$.

Из рис. 6 и 10 видно, что коэффициенты удельного затухания плотности потока энергии для отраженного и прямого импульсов оказываются приблизительно одинаковыми. Однако за счет потерь при отражении от ВНК плотность потока энергии отраженных импульсов оказывается в среднем на 16 дБ меньше, чем при прямом распространении в однородной нефтенасыщенной среде. При этом значения коэффициентов удельного затухания отраженных от ВНК и прямых импульсов оказываются приблизительно одинаковыми (ср. соответствующие уравнения регрессии на рис. 6 и 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного численного моделирования распространения электромагнитных импульсов длительностью 0.1 и 1.5 нс в нефтенасыщенной среде коллектора, включая отражение импульсов от водонефтяного контакта, получены следующие основные результаты.

1. Нефтенасыщенный и водонасыщенный слои являются фильтрами низких частот для парциальных плоских волн, входящих в частотный спектр, излучаемой диполем импульсной сферической волны. При этом частоты среза на уровне 0.5 равны соответственно $f_{0.5} = 93.6$ МГц и $f_{0.5} = 14.2$ МГц.

2. В нефтенасыщенной среде пикосекундный импульс (длительность 0.1 нс) имеет больший коэффициент удельного затухания плотности потока энергии (73.7 дБ/м) по сравнению с наносекундным (длительность 1.5 нс) импульсом (62.4 дБ/м). При этом на расстояниях меньше и больше 1.7 м низкочастотная фильтрация спектра зондирующих импульсов по мере их распространения в нефтенасыщенной среде приводит к уменьшению удельного затухания плотности потока энергии импульса приблизительно в два раза (с 62.4 до 28.24 дБ/м для 1.5 нс импульса) и (73.7 до 36.9 дБ/м для 0.1 нс импульса).

3. Коэффициенты удельного затухания плотности потока энергии при распространении в нефтенасыщенной среде прямого и отраженного от ВНК импульсов приблизительно одинаковы. Благодаря просачиванию энергии отраженного импульса в водоносный слой поток энергии этого импульса оказывается в среднем на 16 дБ меньше по сравнению с прямым импульсом, прошедшим то же расстояние.

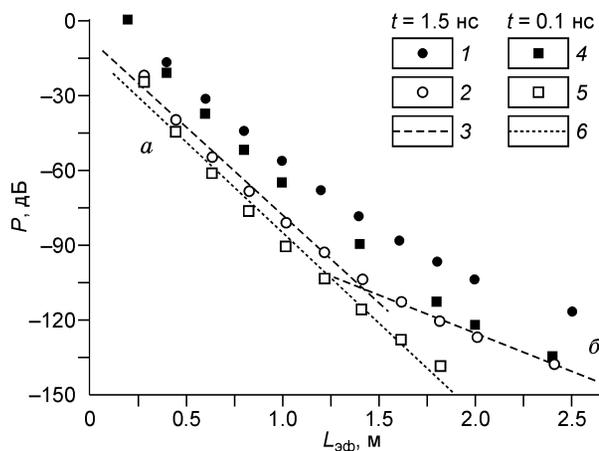


Рис. 10. Плотность потока энергии импульсов, отраженных от ВНК в зависимости от эффективного расстояния ($L_{эф}$), в сравнении с данными для распространения импульса в однородной нефтенасыщенной среде (см. рис. 7, б) для импульсов с исходной длительностью 1.5 и 0.1 нс.

1, 4 — однородная нефтенасыщенная среда; 2, 5 — среда с водонефтяным контактом. Линии регрессии описываются уравнениями: усл. 3, а — $P = -9.8 \dots -66.8L_{эф}$; усл. 3, б — $P = -65.4 \dots -30.0L_{эф}$; усл. 6 — $P = -12.3 \dots -72.7L_{эф}$.

4. При отдалении зонда от ВНК на дистанцию порядка 1 м погрешность в определении его пространственного положения не превышает 10 %.

Учитывая приемлемые значения погрешности определения расстояния, можно считать, что основной проблемой при создании соответствующего широкополосного каротажного оборудования является обеспечение значительного порядка 120 дБ и более динамического диапазона приемопередающей аппаратуры в условиях сравнительно высоких температур, наблюдаемых в скважинах.

ЛИТЕРАТУРА

Вайнштейн Л.А. Распространение импульсов. Рязань, Изд-во Рязанской типографии, 1975, 92 с.

Дворецкий П.М., Ярмахов И.Г. Электромагнитные и гидродинамические методы при освоении нефтегазовых месторождений. М., Недра, 1998, 318 с.

Зоммерфельд А. Дифференциальные уравнения в частных производных физики. М., Изд-во иностр. лит., 1948, 457 с.

Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения // Успехи физических наук, 2000, № 5, с. 565—568.

Савин И.В., Миронов В.Л., Репин А.В., Бобров П.П. Исследование влияния загрязнений нефтью на диэлектрические параметры почвенного покрова // Материалы XI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (6—10 ноября 2007, г. Красноярск), 2007, с. 96—97.

Сараев Д.В., Лунев И.В., Гафарова Л.И., Юсупова Т.Н., Гусев Ю.А., Романов Г.В. Метод диэлектрической спектроскопии в исследовании диэлектрической дисперсии нефтяных масел // Структура и динамика молекулярных систем, 2003, вып. 10, ч. 2, с. 1—12.

Сараев Д.В., Лунев И.В., Юсупова Т.Н. Диэлектрическая спектроскопия в исследовании структурной организации нефтяных дисперсных систем // Нефтегазовое дело, 2005, с. 1—2. <http://www.ogbus.ru>.

Эпов М.И. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск, НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2002, 104 с.

Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н. Оценка параметров тонкослоистых коллекторов по данным высокочастотных электромагнитных зондирований в горизонтальных скважинах // Геология и геофизика, 1998а, т. 39 (11), с. 1608—1614.

Эпов М.И., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Антонов Ю.Н. Особенности высокочастотных индукционных зондирований в скважинах с горизонтальным завершением // Геология и геофизика, 1998б, т. 39 (5), с. 649—656.

Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Электромагнитное зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (12), с. 1357—1365.

Folgero K. A. Broad-band and high-sensitivity dielectric spectroscopy measurement system for quality determination of low-permittivity fluids // Meas. Sci. Technol, 1995, v. 6, p. 995—1008.

Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., Komarov S.A., Kleshchenko V.N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004, v. 42, № 4, p. 773—785.

*Рекомендована к печати 27 марта 2008 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
23 июля 2007 г.*