

## СЕЙСМОАКУСТИКА

---

---

### ИЗУЧЕНИЕ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА С ПОМОЩЬЮ ГЕОВИЗОРА

В.Н. Носов, И.Н. Жуланов<sup>1)</sup>

*Московский государственный технический университет (МГТУ),*

*<sup>1)</sup>ОАО "Пермнефтегеофизика"*

#### **Введение**

Для успешной разработки нефтяных, газовых и других разбуриваемых месторождений необходимо детально знать геологическое строение, характеристики насыщения и фильтрационно-ёмкостные свойства пластов, в том числе, в межскважинном пространстве. Особенно это важно на позднем этапе разработки, когда выработаны наиболее продуктивные участки месторождений. Возможности стандартного комплекса геофизических исследований ограничены только ближней прискважинной зоной. Наибольшие возможности и, соответственно, перспективы использования имеют акустические методы изучения около и межскважинного пространства, поскольку они могут работать через стальную обсадную колонну.

Особенно привлекателен односкважинный вариант зондирования околоскважинного пространства – скважинный геовизор. Глубинность его исследований в зависимости от решаемой задачи должна составлять сантиметры, метры, десятки и сотни метров.

В настоящей работе представлены первые результаты изучения околоскважинного пространства на нефтяных скважинах Пермского региона.

#### **Состояние проблемы**

В настоящее время практически вся известная аппаратура, за исключением аппаратуры межскважинного прозвучивания, позволяет получать информацию о параметрах околоскважинного пространства на дальности не более 0,5 м. В частности, такая глубинность исследований достигается акустическим методом регистрации полных энергий волнового сигнала – метод выявляет зоны неоднородностей пластов, содержащих трещины и каверны [1].

Таким образом существует необходимость разработки аппаратуры для звуковидения околоскважинного пространства в ближней и дальней зонах от оси скважины. Технически и теоретически это является сложнейшей задачей за решение которой авторы взялись несколько лет назад [2,3].

### **Методы реализации геовизора**

Сложность решаемой проблемы вынуждает использовать комплексно несколько методов:

- акустический метод отражённых волн;
- параметрический метод волнообразования в горных породах;
- новые принципы интерпретации принятых сигналов;
- специализированные программы для обработки данных геовизора.

### **Возможности скважинного геовизора**

Аппаратура позволяет проводить:

- расчленение геологических разрезов с высокой разрешающей способностью;
- обнаружение и фиксацию в околоскважинном пространстве зон различных неоднородностей (карсты, зоны каверзности и трещиноватости, фронтов воды, газа, нефти);
- определение газо и нефтенасыщенности пластов;
- доразведка нефтяных и газовых месторождений;
- контроль за насыщением пластов растворами с различными химическими компонентами в заданных интервалах;
- и т.д.

### **Характеристики и принцип действия геовизора**

Разработанный и экспериментально опробованный скважинный геовизор может работать в сейсмическом, нижнем, среднем звуковом, ультразвуковом диапазонах частот и на дистанциях от долей метра до 1000 метров.

Применён метод отражённых волн, распространяющихся вдоль пласта, а также параметрический метод, позволяющий преобразовать в заданную разностную частоту до 30 - 40% излучаемой мощности. Используемые акустические преобразователи типа "Сапфир-25" имеют электроакустический коэффициент полезного действия до 92 - 95% и чувствительность в режиме приёма в воде 12000 - 15000 мкВ/Па и полосу пропускания от 10 до 300 кГц по уровню - 6 дБ [2,3,4].

### **Экспериментальные данные**

Исследования карбонатных отложений глубокой скважины, проведенные первым вариантом геовизора, показали правильность научного подхода к решению сложнейшей проблемы. Это подтверждается качеством сигналов, представленных на рис. 1.

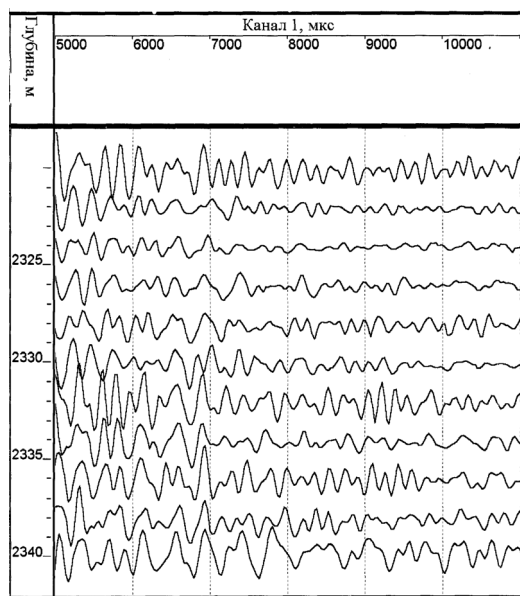


Рис.1

На волновых картинах практически отсутствуют помехи, наблюдается изменчивость формы и частоты отражённых сигналов в дальней зоне (диапазон глубин от 10 до 30 метров, мощность сигналов накачки - 150 Вт). Полученные данные свидетельствуют о том, что спектральный состав сигналов полученных при глубинном зондировании, изменяется в зависимости от типа горных пород и от их строения.

В начальной части трассы сигнала амплитуда сигнала возрастает вплоть до его ограничения в приёмном тракте, что требует введения в приёмно-усилительный тракт сигнала автоматических регуляторов усиления.

### Литература

1. Жуланов И.Н. и др., «Опыт использования методики выделения зон приточности на месторождениях Пермской области», Тверь, научно-технический вестник «Каротажник» № 67, 2000г., с.54.
2. Носов В.Н., Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук "Акустические преобразователи для геофизических работ", М., ВНИИ ядерной геофизики и геохимии, 1988 г., с. 500.
3. Носов В.Н., Виноградов В.А., Васильев Г.Г., Устройство для каротажа скважин, а.с. 1520460, 1986 г.
4. Носов В.Н., Новые акустические преобразователи с односторонней направленностью колебаний для геофизических работ, М., ВНИИ Геоинформсистем, 1988 г., с. 64.
5. Носов В.Н., Звуковидение околоскважинного пространства, М., АКИН РАН, Труды X-й сессии Российского акустического общества, 2000 г., с. 170.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД НАГРУЗКАМИ

В.Л.Ильченко

*Геологический институт Кольского научного центра РАН*

### Введение

Ключевую роль в жизни Вселенной играют волновые процессы. Волновое (ультразвуковое) воздействие на металлы, уменьшающее их хрупкость, при штамповке изделий из чугуна, например, используется в промышленности [1]. Горные породы, в большинстве, являются очень хрупкими. При этом в горных массивах встречаются как хрупкие, так и пластичные виды деформаций, наблюдается складчатость, настолько интенсивная, что кажется невероятным, будто в ее появлении участвовали только тектонические силы. Нуждается в объяснении также природа расслоенности литосферы [2]. Например, в разрезе, вскрытом Кольской сверхглубокой скважиной (СГ-3), выявлена расслоенность в виде ритмичного чередования интервалов с различным характером разуплотненности керна [3]. Ритмичность навела на мысль о ее волновой природе и постановке экспериментов, целью которых было установление факта организующего волнового влияния на твердеющую [4] и твердую среду, находящуюся в напряженном состоянии [5]. Была экспериментально смоделирована ситуация, имитирующая совокупное воздействие на твердую среду тектонических сил и периодических гравитационных волновых возмущений, обусловленных прохождением по поверхности Земли деформационных приливных волн [6]. В настоящей работе приведены результаты эксперимента по изучению воздействия ультразвука на прочностные, упругие и пластичные свойства осадочных горных пород – песчаников, углистых алевролитов (шунгитов) и мраморизованных известняков, находящихся под воздействием одноосного нагружения.

### Эксперимент, результаты и их обсуждение

Из проб мраморизованных известняков, песчаников и шунгитов (штуфы размером приблизительно 30X30X40 см) были изготовлены кубики с длиной ребра 45 мм. При распиловке штуфов основное внимание уделялось единой пространственной ориентировке и маркировке граней: X, Y, Z, где для горизонтальнослоистых песчаников и шунгитов направления X и Y выбирались по падению и простиранию слоев, а Z – по нормали к слоистости. В отношении мраморизованного известняка направлением Z служила нормаль к горизонтальной системе трещин отдельности, X и Y – выбирались произвольно. Однородность материала контролировалась акустополаризационным методом [7]: определялось пространственное положение элементов упругой симметрии, измерялись скорости распространения в образцах ультразвуковых продольных и поперечных волн. Затем образцы испытывались на прочность. Часть – без озвучивания, часть – с озвучиванием ультразвуковыми стоячими продольными волнами разной частоты по нормали к направлению приложе-

ния нагрузки. Стоячие волны возбуждались в образцах посредством пропускания навстречу друг другу ультразвуковых волн с одинаковыми характеристиками. Расстояние между источниками ультразвука (толщина образца) выдерживалось строго – кратным половине длины волны. Нагружение осуществлялось с помощью гидравлического пресса по направлению Z, прозвучивание – по X или Y. В процессе испытаний фиксировались характер разрушения образцов, ориентировка трещин в них, прочность.

Затем из наиболее хорошо сохранившихся крупных обломков разрушенных образцов были изготовлены (с сохранностью первоначальной маркировки граней) кубики с длиной ребра 22-25 мм и подвергнуты повторным акустополяризационным исследованиям – определению пространственного положения элементов упругой симметрии и скоростей распространения в них продольных и поперечных волн. После чего было проведено сопоставление пространственного положения элементов упругой симметрии и скоростей распространения упругих волн в образцах до и после разрушения с озвучиванием и без, а также для образцов, разрушенных с озвучиванием ультразвуком разной частоты. Установлено, что в образцах, разрушенных без озвучивания пространственное положение элементов упругой симметрии, равно как и величины скорости распространения в них продольных и поперечных колебаний, изменились незначительно. Сопоставление тех же параметров, но для образцов, разрушенных с озвучиванием показало изменения в ориентировках элементов упругой симметрии и перераспределение в величинах скоростей (в квазиматрицах скоростей) распространения в них продольных и поперечных волн.

Также имели место чисто внешние отличия. Образцы всех типов исследованных пород без озвучивания проявляли один и тот же характер разрушения: с образованием систем обычных трещин под углом  $\sim 45^\circ$  к направлению нагружения. При этом в большинстве случаев разрушение проходило в соответствии с пространственными ориентировками элементов упругой симметрии.

Разрушение с озвучиванием показало неожиданный характер. При разрушении образовывались текстуры, напоминающие в объеме фунтиковую или con-in-cone, которые представляют собой стопку вложенных друг в друга сосудов конусовидной формы в средней части образца, изменяющейся в сторону гиперболоидной в крайних частях. В плане это выглядит как набор не очень правильных концентрических окружностей - сепаратрис, напоминающий «полный фазовый портрет маятника» [8] или график скалярного осевого поля плотности в неоднородной среде [9]. Подобные структуры иногда наблюдаются в осадках (например, в алевролитах таврической серии Горного Крыма). От первичной – горизонтально слоистой – текстуры осадочной породы внешне практически ничего не остается. Происходит как бы перерасслоение породы. Толщина конических “черепков”, на которые в итоге раслаивается образец, составляла  $\sim 1.5$  мм. Длина стоячей волны озвучивающего эксперимента была равной 3 мм. Положение границ между новыми слоями, вероятно, совпадает с узловыми точками стоячих волн. Границы выполнены разрушенным в пыль веществом образца, поэтому имеют более светлый цвет и хорошо видны.

Фигуры разрушения мраморизованного известняка текстур, типа фунтиковой не образуют. При разрушении известняка с озвучиванием образуется пара пирамид с квадратным основанием и ступенчатыми сходящими к их вершинам треугольными сторонами. Низкая пластичность известняка обусловлена, по-видимому, его степенью метаморфической перекристаллизованности. Установлено также, что характер разрушения мраморизованного известняка несколько меняется в зависимости от частоты озвучивающего ультразвука. С повышением частоты "ступенчатость" наклонных поверхностей фигур (пирамид) разрушения стирается.

#### **Выводы**

По совокупности полученной информации можно сделать следующие выводы: 1) воздействие стоячей волны на объем горной породы, находящейся в стрессовой ситуации, может играть организующую роль в характере разрушения или деформации породы и способствовать возникновению в них новых текстур и структур; 2) расслаивание озвучиваемой стоячими волнами среды происходит по сепаратрисам, поверхности которых составлены множеством точек, являющихся узловыми для стоячих волн, контролирующих данную среду. Гиперболоидно-коническая форма сепаратрис обусловлена, вероятно, за счет одноосного нагружения образцов, в которых, под воздействием стоячих волн, возникла плотностная неоднородность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №-00-05-64057.

#### **Литература**

1. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. – Минск, «Наука и техника», 1976, 448 с.
2. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. //Ред.: Ю.М.Пушаровский и В.Г.Трифонов. -М.:Наука, 1990, 293 с.
3. Ильченко В.Л. Природа упругой анизотропии керна Кольской сверхглубокой скважины.//Автореферат канд. дисс., С.-Пб, 2000, 16 с.
4. Ильченко В.Л. Стоячие волны как вероятная причина расслоенности литосферы.//Труды X сессии Российского акустического общества.- М.: 2000, с.215-218.
5. Ильченко В.Л., Горбачевич Ф.Ф., Головатая О.С. Результаты экспериментального исследования ультразвукового воздействия на пластичность и упругие свойства твердой среды под нагрузками.//Труды XI сессии Российского акустического общества. - М.: ГЕОС, 2001, т.2, с.251-254.
6. Dobrolyubov A.I. Traveling deformation waves: A tutorial review. //Appl. Mech. Rev., vol.44, №5, May 1991, pp. 215-254.
7. Горбачевич Ф.Ф. Акустополярископия горных пород. - Апатиты. 1995, 204 с.
8. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1990.- с.100 – (Б-чка «Квант», вып.48).
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.- М.: Наука, Гл. ред. физ.- мат. лит., 1986. С.391.

## МОБИЛЬНЫЙ ПРИЕМНО-ИЗЛУЧАЮЩИЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

В.С.Авербах, В.В.Артельный, Б.Н.Боголюбов, А.П.Марышев, Ю.К.Постоенко,  
В.И.Таланов

*Институт прикладной физики РАН*

В ИПФ РАН создан приемно-излучающий комплекс для расшифровки геофизического рельефа и определения месторасположения подземных неоднородностей с высоким разрешением в диапазоне частот 100-800Гц. Кратко опишем аппаратуру, используемую при проведении работ, и приведем результаты, полученные в ходе обработки массива данных полевых измерений.

Мобильный приемно-излучающий комплекс располагается в автомобиле УАЗ 2206-014. Излучающая часть комплекса состоит из ЭВМ Explorer M типа Note-Book с цифро-аналоговым преобразователем модуля DAQCard-1200 (ЦАП) и фильтра НЧ (ФНЧ), усилителя мощности (УМ), излучателя (И) с трактом калибровки (рис.1), а также программного обеспечения формирования всех режимов излучения.

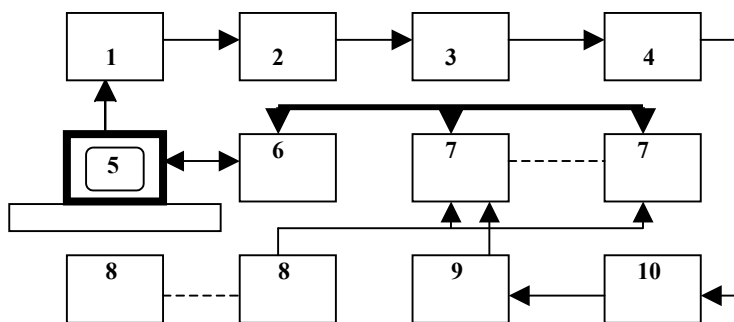


Рис.1 Блок-схема приемно-излучающего комплекса.

1 – цифро-аналоговый преобразователь, 2 – фильтр нижних частот, 3 – усилитель мощности, 4 – излучатель, 5 – ЭВМ, 6 – крест-контроллер, 7 – аналого-цифровой преобразователь, 8 – сейсмоприемники, 9 – усилитель 2635 V&K, 10 – акселерометр ДГ-1.

Сигнал, сформированный в ЭВМ, поступает на цифро-аналоговый преобразователь модуля LC-202, затем через фильтр нижних частот на усилитель мощности и излучатель. ЦАП имеет разрешение 12 бит, имеет два буфера по 1024 слова. Скорость считывания данных задается внутренним таймером с разрешением 16 бит. Стабильность считывания определяется внутренним кварцевым генератором.

Основной частью приемного комплекса является та же ЭВМ Explorer M, а также крест LTC-36 с модулями АЦП LC-202, крест-контроллером LC-014 и приемная сейсмическая антенна.

Модуль LC-202 является четырехканальным прецизионным модулем АЦП с широким динамическим диапазоном и частотным диапазоном от 0 до 25,5 кГц. Каждый измерительный канал включает в себя 16-битный сигма-дельта АЦП, антиалийзинговый фильтр и инструментальный усилитель. Сигнальный процессор модуля типа ADSP-2186 фирмы Analog Device обеспечивает управление аналоговой частью модуля, цифровую фильтрацию, а также обеспечивает протокол сбора данных и передачу их в ЭВМ через крейт-контроллер и принтерный порт. Синхронизация с излучающей частью комплекса осуществляется при помощи импульса, поступающего со второго канала ЦАП на внешний запуск АЦП модуля LC-202. Приемная антенна состоит из сейсмоприемников акселерометров типа СПАН-4 и согласующего устройства. Программное обеспечение комплекса состоит из программ формирования и излучения сейсмоакустических сигналов, программ сбора, предварительной обработки, отображения и регистрации принятых сигналов.

Ниже приведены результаты, полученные в ходе предварительной обработки массива данных полевых измерений, полученных во время работ 2001г. по инженерной сейсморазведке площадки под строительство склада пропана в районе г. Дзержинска.

Для обнаружения сигналов отраженных и преломленных волн были пройдены два линейных профиля: длинный (профиль 3) и короткий (профиль 4), схема расположения профилей представлена на рис.2.

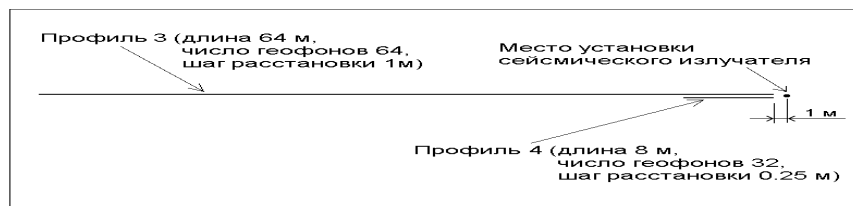


Рис.2. Схема расположения профилей.

Используемый при зондировании сигнал представлял собой последовательность из 32-ух импульсов, следующих с интервалом 0.5 с. Длительность каждого импульса составляла три периода несущей частоты, форма огибающей – амплитудное окно Хэннинга, так что фактическая длительность импульса составляла примерно полтора периода несущей частоты. Шаг расстановки геофонов на длинном профиле 3 составлял 1 м, длина профиля 64 м, несущие частоты сигналов 50, 80, 125 и 200Гц. На коротком профиле 4 шаг расстановки геофонов 0.25 м, длина профиля 8 м, несущие частоты сигналов 200, 400 и 625 Гц.

На рис.3 представлен модуль распределения ускорений на длинном профиле 3 одного из описанных выше импульсных сигналов, а именно с несущей частотой 125 Гц. При обработке сигнала было произведено временное накопление (усреднение) по 32-ум импульсам, а также пространственное усреднение скользящим окном по трем геофонам. На рисунке хорошо видны сигналы, соответствующие прямым,



отраженным и преломленным волнам. Отметим сразу, что время середины излучаемого импульса соответствует задержке 27 мс, именно от этого значения на временной шкале надо отсчитывать задержки всех сигналов. Первые вступления на удалениях 1...18 м от излучателя соответствуют прямым и преломленным волнам, распространяющимся со скоростями до 370 м/с в самых верхних слоях грунта. Первое вступление на удалениях 20...55 м от излучателя соответствует преломленной волне, распространяющейся со скоростью 1250 м/с вдоль одной из достаточно контрастных границ раздела грунтов. Однократно отраженная от этой границы волна хорошо видна на удалениях 20...40 м и во временной области 90...130 мс (задержка от момента излучения 63...103 мс), фазовая скорость этой волны по мере удаления от излучателя стремится к некоторой средней скорости волны в слое над этой границей 530 м/с. Хорошо видна также и двукратно отраженная от этой границы волна в области рисунка на удалениях 40...65 м и во временном интервале 165...210 мс (задержки 138...183 мс). В области рисунка на удалениях 40...60 м и во временном интервале 125...150 мс можно наблюдать приход еще одной преломленной волны, распространяющейся со скоростью 2400 м/с под следующей контрастной границей раздела грунтов на еще большей глубине.

Для определения глубин контрастных границ и толщин слоев грунта необходимо кроме определяемых по преломленным волнам скоростей волн в слоях знать еще и временные задержки отраженных волн. Эти задержки можно определять при вертикальном зондировании (метод отраженных волн) с использованием коротких профилей с более частой расстановкой геофонов.

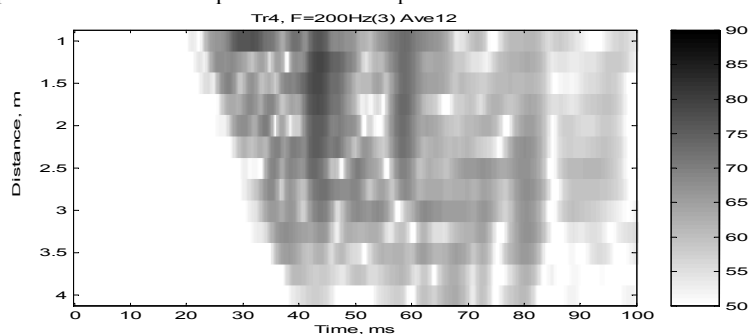


Рис.3. Модуль ускорения вдоль профиля 3 для импульсного сигнала с несущей частотой 125 Гц при длительности импульса три периода с амплитудным окном Хэннинга. Временное накопление 32 импульса, пространственное усреднение по трем геофонам, яркостная шкала в дБ.

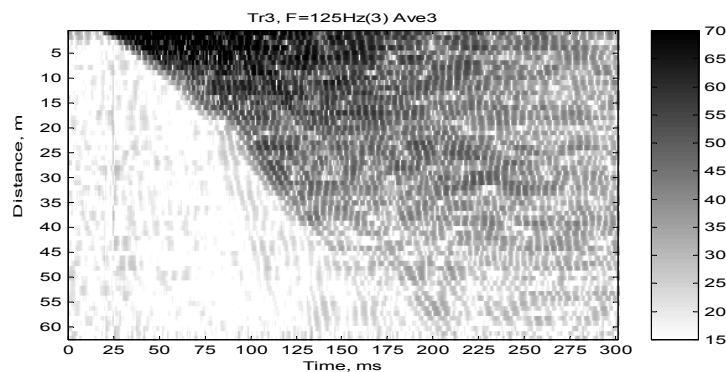


Рис.4. Модуль ускорения вдоль профиля 4 импульсного сигнала с несущей частотой 200 Гц, при длительности импульса в три периода с амплитудным окном Хэннинга. Временное накопление 32 импульса, пространственное усреднение по 12-ти геофонам (по вертикальной оси отложена дистанция от излучателя до начала скользящего окна), яркостная шкала в дБ.

На рис.4 представлена огибающая поля ускорений на коротком профиле 4 импульсного сигнала с несущей частотой 200 Гц. Для подавления прямых и, в том числе, поверхностных волн, и для лучшего выделения сигналов, соответствующих распространяющимся почти вертикально отраженным волнам, проведено пространственное усреднение волнового поля скользящим окном по группе из 12-ти геофонов. На рисунке хорошо просматриваются три прихода сигнала на временах 43, 58 и 81 мс. Середина излученного сигнала соответствует времени 24 мс, так что эти три прихода имеют задержки соответственно 19, 34 и 57 мс. Сопоставляя эти задержки со структурой волнового поля на длинном профиле 4 (см. рис.3), можно предположить, что приход с задержкой 57 мс соответствует волне, отраженной от первой из контрастных границ, обсуждавшихся выше. Если мысленно продолжить годограф преломленной волны, скорость которой 1250 м/с, в область малых удалений от источника, то его пересечение с линией, соответствующей ближайшему к излучателю геофону, придется на временной интервал 80...90 мс, что соответствует задержке относительно излученного сигнала 53...63 мс. Именно в этот диапазон попадает и одна из задержек, наблюдаемых на коротком профиле.

Итак, предварительный анализ структуры волновых полей на длинном и коротком профилях, проведенный методами отраженных и преломленных волн, позволяет построить первое приближение модели слоистой структуры грунта, которая включает себя четыре слоя, лежащих на полупространстве. Скорость сейсмической волны в полупространстве 2400 м/с, в трех слоях над ним, соответственно, 1250, 530 и 370 м/с, скорость волн в самом верхнем приповерхностном слое грунта лежит в интервале 150...250 м/с (для грунта такого же типа, на котором и проводилось данное исследование). Задержки отраженных волн от нижних границ первых трех

слоев составляют соответственно 19, 34 и 57 мс. Задержку отраженной волны от самой глубокой четвертой границы можно оценить следующим образом. Для этого нужно аналогичным образом мысленно продолжить годограф второй преломленной волны, скорость которой 2400 м/с, в область малых удалений от источника. Разность времен, соответствующих пересечениям продолжений годографов двух преломленных волн (со скоростями 1250 и 2400 м/с) с линией, соответствующей ближайшему к излучателю геофону, составляет величину около 50 мс. Эта разность времен близка к удвоенному времени пробега волны в слое между контрастными границами при вертикальном зондировании. Отметим, что приход сигнала с задержкой 95...105 мс, соответствующего, по-видимому, отраженной от четвертой границы волне, также достаточно хорошо наблюдается на распределении огибающей волнового поля во временном интервале 120...130 мс.

Время пробега волны при вертикальном зондировании через каждый слой равно половине разности задержек волн, отраженных от нижней и верхней границы этого слоя, и составляет для каждого из слоев (отсчитывая слои сверху вниз) величину 9.5, 7.5, 11.5 и 25 мс. Зная скорость волны в каждом слое, для толщины слоев получаем следующие оценки: ~2, ~2.5, ~6 и ~30 м, а для глубины залегания границ, соответственно, ~2, ~4.5, ~10 и ~40 м. На рис.5 представлено первое приближение модели слоистой структуры грунта с указанием глубины границ и скоростей волн в слоях. Заметим, что модель слоистой структуры приповерхностной части грунта (а именно, число слоев, их толщина и скорости волн в них) может уточняться при анализе структуры волнового поля при вертикальном зондировании сигналами с более высокой несущей частотой, обеспечивающей лучшие разрешение и точность.

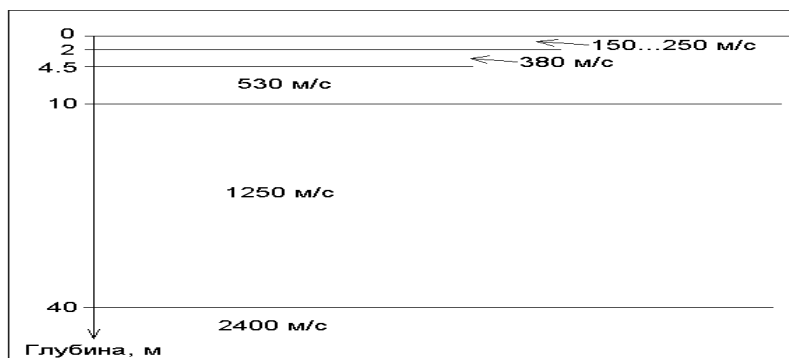


Рис.5. Первое приближение модели слоистой структуры грунта с указанием глубины границ и скоростей волн в слоях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 02-02-17089).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ ГРУНТОВОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

В.Г.Баженов, В.Л. Котов, А.В. Кочетков, С.В.Крылов

*НИИ механики Нижегородского госуниверситета*

### Введение

Исследование вопросов сейсмобезопасности взрывных работ является актуальной задачей. Моделирование волновых процессов в дальней зоне взрыва, когда взрывные волны вырождаются в упругие, невозможно без подробного исследования волновых процессов в ближней зоне, где проявляются нелинейные свойства грунтов – пластичность, вязкость и т.д. Поэтому моделирование сейсмического эффекта взрыва является комплексной проблемой.

В предлагаемом докладе излагаются основные положения численной методики расчета взрывных процессов в грунтовых средах. Нелинейные уравнения упруго-пластической среды интегрируются в подвижных эйлерово-лагранжевых сетках вблизи заряда взрывчатого вещества (ВВ) и на неподвижных сетках в дальней зоне. Используются широкодиапазонные уравнения состояния грунтов, описывающие как их упругое поведение, так и нелинейную сжимаемость, объемную и сдвиговую пластичность. Результаты расчетов сравниваются с известными теоретическими и экспериментальными результатами.

### Основные уравнения

Осесимметричная задача взрыва заряда ВВ в грунте формулируется в цилиндрической системе координат  $xOy$ . Ось  $Ox$  является осью вращения, ось  $Oy$  проходит перпендикулярно к ней вдоль свободной поверхности полупространства грунта. Система уравнений динамики грунтовой среды в стандартных обозначениях выглядит следующим образом [1]

$$(\rho)_{,t} + (\rho u)_{,x} + (\rho v)_{,y} = -(\rho v)/y,$$

$$(\rho u)_{,t} + (\rho u^2 + p - s_{xx})_{,x} + (\rho uv - s_{xy})_{,y} = -(\rho uv - s_{xy})/y,$$

$$(\rho v)_{,t} + (\rho uv - s_{xy})_{,x} + (\rho v^2 + p - s_{yy})_{,y} = -(\rho v^2 - s_{yy} - s_{\theta\theta})/y,$$

$$D_r s_{xx} + \lambda s_{xx} = 2G(2u_{,x} - v_{,y} - v/y)/3,$$

$$D_r s_{xy} + \lambda s_{xy} = G(u_{,y} + v_{,x}),$$

$$D_r s_{yy} + \lambda s_{yy} = 2G(2v_{,y} - u_{,x} - v/y)/3.$$

Для описания объемной сжимаемости грунта вводится параметр  $\rho^*$  - максимальная плотность, достигнутая в процессе активного нагружения грунта. При активном нагружении полагается  $\rho^* = \rho$ , разгрузка и повторная догрузка описывается уравне-

нием  $d\rho^*/dt = 0$ , где  $d/dt$  – полная производная по времени. Критерий сдвиговой пластичности для частиц грунта определяется как функция  $p$

$$s^{ij} s_{ij} / 2 = F(p)$$

Соотношения между давлением и плотностью принимаются в виде

$$p = \begin{cases} f_1(\rho), & dp/dt > 0 \\ f_2(\rho, \rho^*), & dp/dt \leq 0 \end{cases}$$

Первое уравнение представляет собой ударную адиабату (УА), второе уравнение задает кривую разгрузки от достигнутой максимальной плотности  $\rho^*$ .

Для решения задач применялась явная разностная схема Годунова [2] первого порядка точности, сочетающая подходы Лагранжа и Эйлера к описанию движения сжимаемой среды.

### Результаты расчетов

В работе представлены результаты расчетов действия взрыва в песчаном грунте при различных глубинах заложения заряда. Уравнение состояния песка, предложенное в [1], схематично показано на рис. 1. Кривые 1, 2 соответствуют экспериментальным результатам, пунктиром нанесен аппроксимирующий полином [1], кривая 3 соответствует разгрузочной ветви диаграммы. Для тестирования составной УА был проведен расчет взрыва сферического заряда ВВ (ТНТ) в песчаном грунте. Результаты сравнения тестовых расчетов с экспериментальными данными [3] для песка различной структуры приведены на рис.2.

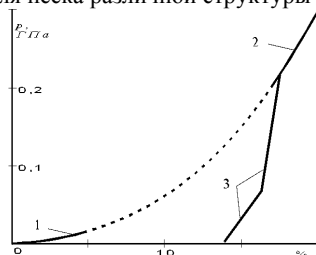


Рис. 1

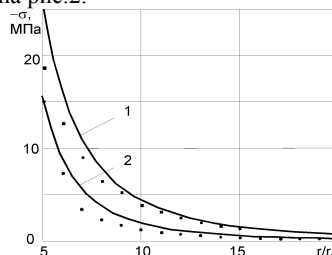


Рис. 2

Экспериментальные зависимости [3] максимумов радиальных напряжений от расстояния, отнесенного к радиусу заряда ВВ ( $r_0 = 5,2$  см), соответствуют песку ненарушенной структуры (кривая 1 на рис. 2) и нарушенной (кривая 2). Результаты численных расчетов показаны точками и находятся в удовлетворительном соответствии с данными эксперимента. В эксперименте отношение тангенциальных напряжений к радиальным (коэффициент бокового давления) изменялось в диапазоне 0,3 - 0,4. В численных расчетах требуемое отношение удовлетворяется при модуле сдвига 60 - 100 МПа для песка ненарушенной структуры и 20 - 40 МПа для песка нарушенной структуры естественной влажности.

Также производились расчеты действия камуфлетного взрыва в слоистом грунте. Глубина заложения заряда ВВ массой 1 кг составила 0,5 м, глубина слоя песка –

1,5 м. Водонасыщенный суглинок характеризуется отсутствием сдвиговых напряжений, отношение скоростей звука в суглинке и песке равно 3. На рис. 3, 4 показаны распределения давлений на моменты времени 5,5 и 8,5 мс. Штрихпунктирными линиями показаны границы полупространства грунта и полость, образованная продуктами детонации.

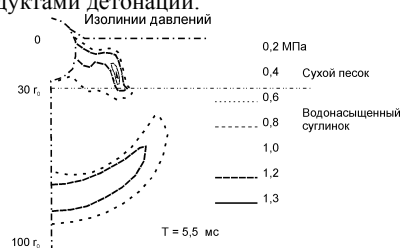


Рис. 3

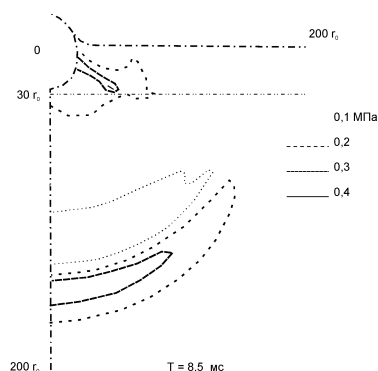


Рис. 4

Решение данной задачи в рамках предложенной методики наталкивается на определенные трудности, связанные со значительными размерами областей. Применение данного полного метода расчетов целесообразно для изучения переходных процессов формирования сейсмического импульса – учет взаимодействия со свободной поверхностью, отражениями от границ раздела слоев. Для описания дальнейшего распространения сигнала желательно применение упрощенных моделей и аналитических методов.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках Программы поддержки ведущих научных школ России (код проекта 00-15-99029), грантов Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 01-01-00556, 02-01-06420) и гранта Минобразования РФ в области фундаментального естествознания (№ Е 00-12.0-99).

#### Литература

1. Баженов В.Г., Котов В.Л., Кочетков А.В. и др. Исследование волновых процессов в грунтовой среде при взрыве накладного заряда. // Изв. РАН. МТТ. № 2. 2001. С. 70-77
2. Абузьяров М.Х., Баженов В.Г., Котов В.Л. и др. Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // ЖВМ и МФ. Т. 40. № 6. 2000. С. 940-953.
3. Рыков Г.В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте // ПМТФ. 1964. № 1. С.85-89.

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В СКВАЖИНЕ

Д.А. Касьянов

НИРФИ

Проблеме излучения различного типа упругих волн из скважины в массив посвящено значительное количество работ. В основном решаются задачи так или иначе связанные с акустическим каротажем. Существуют также работы, где рассматриваются дифракционные поля, создаваемые скважинными акустическими источниками в массиве, причём чаще всего исследуются задачи с идеальными граничными условиями, а решения ищутся в зоне дифракции Фраунгофера. В [1] излучение скважинным акустическим прибором упругих волн в горный массив описывается с помощью задания упругих напряжений на внутренней поверхности цилиндрической скважины, в [2] с помощью задания радиальных смещений. В [3] учитывается существование водяного слоя между скважинной протяжённой акустической антенной и внутренней поверхностью скважины, однако, на поверхности антенны задаются радиальные смещения. Таким образом, в известных работах принципиально не рассматривается тот факт, что собственный импеданс излучающей антенны конечен и зависит от многих факторов, таких как импеданс окружающего пространства, материал из которого выполнен излучатель и т.д. Целью данной работы является исследование оптимальных условий возбуждения упругих волн в горном массиве протяжённой пьезокерамической антенной, находящейся в скважине, которая заполнена жидкостью.

Рассмотрим следующую модель. Пусть в безграничной изотропной однородной упругой среде находится бесконечная круговая цилиндрическая полость радиусом  $r_2$ , заполненная идеальной сжимаемой жидкостью, которая характеризуется своей плотностью  $\rho_f$  и скоростью звука  $c_f$ . В полости осе симметрично находится протяжённая пьезокерамическая антенна с внешним радиусом  $r_1$  и внутренним радиусом  $r_3$ , геометрия коаксиальной системы «антенна - жидкий слой - массив» представлена на рис.1. Пьезокерамика, из которой состоит антенна, характеризуется

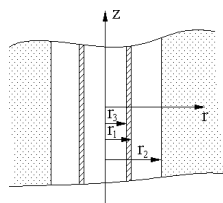


Рис.1

плотностью  $\rho_c$ , скоростью распространения продольных волн в стержне  $c_l^E$ , пьезоэлектрическим модулем  $d_{31}$  и модулем гибкости  $s_{11}^E$ . Считаем, что пьезокерамическая антенна совершает осе симметричные колебания, поляризацию пьезокерамики предполагаем радиальной. Антенна возбуждается переменным электрическим напряжением  $U=U_0 f(z)$ , где  $f(z)$ -нормированное распределение электрического напряжения вдоль образующей протяжённой цилиндрической антенны.

Для расчёта движения пьезокерамических преобразователей часто используется метод эквивалентных электромеханических схем [4], который позволяет выразить в явном виде скорость движения границы преобразователя и корректно запи-

сать после этого граничные условия дифракционной задачи. Следуя результатам работы [5], получим интересующую нас приближённую, при  $k(r_1-r_3) \ll 1$ , эквивалентную схему протяжённой пьезокерамической антенны, см. рис.2. Эквивалентная

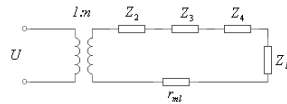


Рис.2

схема получена при предположении малости диэлектрических потерь в пьезокерамике, считалось также, что полностью компенсирована статическая ёмкость антенны, например, введением внешней индуктивности, что соответствует практике согласования пьезокерамических антенн с генератором [6]. На рис.2 введены следующие обозначения:  $Z_2 = in^2/(\omega C_a)$ ,  $Z_3 = 2i\pi\omega\delta r C r_a$ ,  $Z_4 = 2\pi\delta(i\omega r_a s_{11}^E)$ ,  $n = 2\pi d_{31}/s_{11}^E$ ,  $Z_1$  – импеданс, создаваемый нагрузкой,  $r_{ml}$  – погонное сопротивление механических потерь, импеданс  $Z_2$  учитывает прямой пьезоэффект,  $C_a$  – погонная ёмкость,  $r_a$  и  $\delta$  – соответственно средний радиус и толщина стенки пьезокерамического цилиндра. Используя определение коэффициента электромеханической трансформации  $n$  (см., например, [4]), получим, что величину колебательной скорости поверхности цилиндра можно выразить следующим образом:  $V = nU/(Z_1 + Z_m)$ , где  $Z_m = Z_2 + Z_3 + Z_4 + r_{ml}$ , направление вектора скорости совпадает с направлением нормали к поверхности цилиндра, положительное направление нормали совпадает с осью  $r$  на рис.1. Импеданс, создаваемый нагрузкой  $Z_1$ , равен отношению силы действующей со стороны внешней среды на излучающую поверхность к скорости этой поверхности. Результирующая удельная сила, действующая на внешнюю границу пьезокерамического цилиндра равна давлению в жидкости на той же границе взятому с обратным знаком. Воспользуемся также условием неразрывности нормальной составляющей колебательной скорости на поверхности цилиндра и перепишем выражение для  $V$  в виде:  $V_f = nU/(Z_m - (P_f/V_f))$ , где  $P_f$  и  $V_f$  – соответственно давление и скорость в жидкой среде на границе пьезокерамического цилиндра. Далее введём потенциал смещения в жидкости  $\varphi$ , при этом  $P_f = -\rho_f(\partial^2\varphi/\partial t^2)$ ,  $V_f = (\partial/\partial t)\nabla\varphi$ , зависимость от времени определяется множителем  $e^{-i\omega t}$ . Сделав небольшие преобразования получим следующее соотношение, выполняющееся на границе  $r_1$ :

$$\nabla\varphi + \frac{\rho_f\omega\varphi}{iZ_m} = -\frac{U_0 f(z)n}{i\omega Z_m} \quad (1)$$

Выражение (1) является тем необходимым граничным условием, с помощью которого можно сформулировать интересующую нас дифракционную задачу о распространении упругих волн в массиве, при возбуждении их протяжённой пьезокерамической антенной, находящейся в скважине.

В работе [3] при изучении влияния жидкого слоя на процесс излучения протяжённой антенны из скважины считалось, что на границе  $r_1$  выполняется условие вида:  $\nabla\varphi = u_0 f(z)$ , где  $u_0$  – амплитуда начальных смещений на поверхности антенны. Подобная идеализация, при задании условия неразрывности нормальных составляющих смещений и напряжений и равенства нулю касательных напряжений на



внутренней границе скважины, приводит к очевидному результату: резонансные значения волновой толщины жидкого слоя  $\chi$ , находящегося между антенной и внутренней стенкой скважины практически совпадают с величиной  $m\pi$ , где  $m$  – целые числа, начиная с нуля. Фактически, в этом случае реализуется полуволновой резонанс коаксиального жидкого слоя, заключённого между двумя абсолютно жёсткими цилиндрическими границами. В случае выполнения более реальных граничных условий (1) значение величины  $\chi$  начинает существенно зависеть от электромеханических параметров пьезокерамической скважинной антенны, которые меняются в зависимости от частоты. На рис.3, на примере антенны из [6], представ-

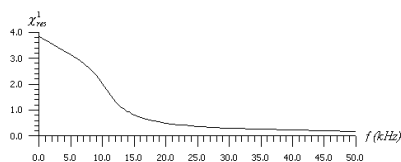


Рис.3

лена эволюция величины  $\chi$ , соответствующей первому резонансному прохождению акустической энергии от антенны в массив, в зависимости от частоты возбуждения антенны. При уменьшении волнового размера  $kr_1$  происходит переход к известной задаче об излучении точечного источника в скважине [7], где выполняется

условие  $J_1(\chi) \rightarrow 0$  ( $\chi \rightarrow 3,82$ ). Эквивалентная схема на рис.2 уже не работает в области второго радиального резонанса пьезокерамического цилиндра, несмотря на возможное сохранение условия  $k(r_1 - r_3) \ll 1$  [5]. Таким образом, для рассматриваемой в качестве примера антенны мы ограничены верхней частотой порядка 25 кГц. Тем не менее,  $\chi$  закономерно стремится к нулю при увеличении относительных волновых размеров стенки излучающего цилиндра, т.е. описывается предельный переход к задаче из [3].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 00-02-16156.

#### Литература

1. Васильев Ю. И. // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1968, №1, с. 25
2. Крутин В. Н., Ямщиков В.С. // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, №10, с. 37
3. Крутин В. Н., Кузнецов О. Л. и др. // В кн. Ядерно-геофизические и геоакустические исследования скважин на нефть и газ. - М.: ВНИИЯГГ, 1977, с. 5
4. Подводные электроакустические преобразователи-Л.: Судостроение, 1983, 248с.
5. Дианов Д. Б., Кузьменко А. Г. // Акуст. журн. 1970. Т.26. №1. С. 42-48.
6. Касьянов Д. А., Шалашов Г. М. // в Трудах XI Сессии РАО, т.2. М.: ГЕОС, 2001, с. 121
7. Крауклис П. В., Крауклис Л. А. // в кн. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. 16. Л.: Наука, 1976, с. 41

## ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПОЛУОГРАНИЧЕННЫХ УПРУГИХ СРЕДАХ

А.В.Разин

*Научно-исследовательский радиофизический институт*

При решении задач сейсмической локации и неразрушающего ультразвукового контроля материалов возникает необходимость исследования процессов возбуждения и распространения акустических и упругих волн вблизи границы раздела газообразного и твердого полупространств при наличии в последнем локализованной подповерхностной неоднородности или поверхностного дефекта ограниченных размеров. В борновском приближении метода возмущений задача рассеяния волн может быть сформулирована как задача излучения путем введения эффективных источников рассеянных волн («вторичных источников»). Конфигурация вторичных источников и характеристики их излучения определяются формой и внутренней структурой исследуемой неоднородности и параметрами зондирующего волнового поля. В связи с этим представляет интерес задача о возбуждении волн в твердом полупространстве находящимися в нем произвольными силовыми источниками.

Более простой является теория локации поверхностных неоднородностей твердых тел (шероховатостей, локальных изменений плотности или модулей упругости в тонком по сравнению с характерными длинами упругих волн приповерхностном слое), поскольку поля рассеянных волн в этом случае возбуждаются вторичными источниками, находящимися на границе раздела сред.

В настоящей работе в интегральном виде получено решение задачи о возбуждении упругих волн в однородном изотропном твердом полупространстве и в граничащем с ним однородном газе зависящими от времени силами, произвольно распределенными по некоторой площадке ограниченных размеров, которая параллельна границе твердое тело – газ. Подробно рассмотрен частный случай точечного гармонического подповерхностного источника, действующего перпендикулярно границе раздела сред.

Пусть плоскость  $z=0$  декартовой системы координат совпадает с границей раздела однородного газа, имеющего плотность  $\rho_1$  и скорость звука  $c_1$  и заполняющего полупространство  $z<0$ , и однородного изотропного твердого тела, занимающего полупространство  $z>0$  и характеризуемого плотностью  $\rho_2$  и скоростями продольной  $c_l$  и поперечной  $c_t$  волн. На единицу плоскости  $z=h$  действует сила  $f(x,y,t)$ , где  $t$  – время. Смещения в упругой среде описываются уравнением Ламэ, а волновые движения в газе – линеаризованной системой уравнений гидродинамики.

Возмущения в газе удобно характеризовать скалярным потенциалом смещений, а в твердом теле – скалярным и векторным потенциалами смещений. Для потенциалов получаются волновые уравнения, которые следует решать методом преобразования Фурье по времени и по горизонтальным координатам с учетом граничных условий на поверхности контакта газообразной и упругой сред и условий излучения. Это приводит к интегральным выражениям для потенциалов. Например, потенциал смещений в газе имеет вид:

$$\Psi_1(x, y, z, t) = \frac{1}{\rho_2 c_t^2} \iiint S_0^{-1}(k) \left[ (k_t^2 - 2k^2) e^{i\kappa_t h} - 2\kappa_t \kappa_l e^{i\kappa_l h} \right] (F_x k_x + F_y k_y) - \\ - \kappa_l \left[ (k_t^2 - 2k^2) e^{i\kappa_t h} + 2k^2 e^{i\kappa_l h} \right] F_z \left\{ \exp(-i\omega t + ik_x x + ik_y y - i\kappa_l z) \right\} d\omega dk_x dk_y, \quad (1)$$

где интегрирование проводится в бесконечных пределах,

$$S_0(k) = R_0(k) + \varepsilon k_t^4 \kappa_l / \kappa_t,$$

$$R_0(k) = (k_t^2 - 2k^2)^2 + 4k^2 \kappa_l \kappa_t,$$

$$\kappa_{l,t} = (k_{l,t}^2 - k^2)^{1/2}, \quad \varepsilon = \rho_l / \rho_2, \quad k_{l,t} = \omega / c_{l,t}.$$

$F(k_x, k_y, \omega)$  – спектр силового источника.

Интеграл (1) имеет полюса, определяемые из решения уравнения  $S_0(k) = 0$  и связанные с излучением волн Рэлея и Стонели. При условии  $c_l < c_R$ , где  $c_R$  – скорость рэлеевской волны на границе твердое тело – вакуум (соответствующее ей волновое число  $k_R$  определяется из уравнения Рэлея  $R_0(k) = 0$ ), уравнение  $S_0(k) = 0$  имеет один действительный корень  $k_S$ , соответствующий поверхностной волне Стонели [1]. Второй корень этого уравнения является комплексным. Этому корню соответствует вытекающая псевдорэлеевская волна, амплитуда которой экспоненциально спадает вдоль границы раздела газообразной и упругой сред.

Отметим, что выражение (1) может быть использовано как для расчетов акустических полей, возникающих в газе при рассеянии упругих волн на подповерхностных включениях, так и для оценок возмущений, возникающих в ионосфере вследствие воздействия акустической волны, возбуждаемой мощными подземными сейсмическими источниками искусственного или естественного происхождения.

В случае гармонических источников интегралы Фурье, описывающие потенциалы в упругой среде, могут быть оценены в волновой зоне методом стационарной фазы. Это позволяет проанализировать как поля смещений, так и диаграммы направленности излучения. Средняя за период волны мощность излучения вычисляется путем подсчета потока энергии через поверхность полусферы большого по сравнению с длиной волны радиуса, содержащей источник внутри себя. Мощность излучения поверхностных волн удобнее вычислять методом реакции излучения.

При анализе энергетических характеристик волн в газе необходимо учитывать, что, как показано в [2] для частного случая точечного поверхностного источника, получаемое из потенциала смещений (1) выражение для мощности излучения описывает как сферическую акустическую волну, так и вытекающую псевдорэлеевскую волну.

Для случая гармонических силовых источников произвольной конфигурации, действующих на границе твердое тело – вакуум, поля и мощности излучения продольных, поперечных и рэлеевских волн вычислены в работе [3]. Выражения для энергий излучения произвольных импульсных источников получены в [4].

Рассмотрим ситуацию, когда распространяющаяся вертикально вниз гармоническая продольная волна рассеивается на находящемся на глубине  $z=h$  малом по сравнению с длинами волн включении, плотность которого незначительно отличается от плотности фоновой среды. В борновском приближении метода возмущений можно считать, что рассеянное поле создается точечным гармоническим источником, действующим на глубине  $z=h$  по нормали к границе раздела газообразной и упругой сред. Амплитуду  $f_0$  такого источника нетрудно выразить через поле падающей волны и разность плотностей среды и рассеивателя. Поля рассеянных объемных волн на больших расстояниях от источника находятся методом стационарной фазы.

Мощность поверхностной волны Стонели дается выражением:

$$W(h) = W(0) \left[ \left( 2k_S^2 - k_I^2 \right) e^{-\sqrt{k_S^2 - k_I^2} h} - 2k_S^2 e^{-\sqrt{k_S^2 - k_I^2} h} \right]^2 k_I^{-4}$$

где  $W_S(0) = -\frac{f_0^2 \omega^3 k_S \sqrt{k_S^2 - k_I^2}}{4 \rho_2 c_I^4 S_0'(k_S)}$  — мощность волны Стонели, возбуждаемой по-

верхностным источником амплитуды  $f_0$  [5]. Аналогичной формулой описывается мощность излучения волны Рэлея в отсутствие газа над твердым телом (все символы «S» нужно заменить на «R»).

Мощности излучения продольной и поперечной сферических волн в твердом теле и суммарная мощность излучения сферической акустической волны и вытекающей псевдорэлеевской волны даются интегральными выражениями, которые здесь не приводятся из-за их громоздкости.

Полученные формулы позволяют исследовать распределение мощности излучения по различным типам волн при изменении глубины источника.

### Литература

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
2. Разин А.В. Излучение поверхностной и вытекающей волн на границе раздела твердое тело – газ // Изв.вузов. Радиофизика, т.45, №4.
3. Докучаев В.П., Разин А.В. Возбуждение упругих волн в однородном полупространстве поверхностными источниками // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1990, №10, с.81-87.
4. Орлов А.Л., Разин А.В. Возбуждение упругих волн в полупространстве нестационарными поверхностными источниками // Изв. РАН. Физика Земли, 1993, №2, с.78-82.
5. Разин А.В. Об излучении волн Стонели нормальным к границе газ – твердое тело гармоническим силовым источником // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1991, №12, с.100-104.

## ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СЕЙСМОИЗЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Е.Я.Бубнов, В.В.Гущин

*Научно-исследовательский радиофизический институт*

Железнодорожный транспорт является одним из интенсивных источников сейсмического излучения в низкочастотном диапазоне частот (от нуля до нескольких десятков герц). Уникальность такого генератора определяется прежде всего разнообразием физических механизмов излучения.

Необходимость исследований железнодорожного состава как сейсмического излучателя вызвана прежде всего проблемой борьбы с акустическим загрязнением среды, поиском эффективных параметров диагностики состояния движущихся частей поезда и полотна дороги, мониторинга состояния среды, использования уникального источника возбуждения объемных волн для задач сейсмической разведки.

С этой целью в работе дается теоретический анализ некоторых механизмов сейсмического излучения железнодорожного состава в различных диапазонах частот.

Исследованиям упругих полей железнодорожного транспорта посвящено достаточно много работ (см., например, [1-2]). Тем не менее, полного анализа возможных механизмов сейсмического излучения в этих работах не дается.

Источниками возникновения сейсмических колебаний при движении поезда являются статические и нестационарные силовые нагрузки, физические причины возникновения которых объясняются следующим образом.

Одной из возможных причин создания колебаний в грунте является воздействие со стороны поезда на твердую среду вертикальной силы тяжести. Эти силы носят статический характер и вызывают деформацию железнодорожного полотна и грунта в окрестности прохождения поезда. В случае неподвижного состава для фиксации таких деформаций необходим датчик статических деформаций. Факт движения железнодорожного состава приведет к появлению в спектре смещений грунта переменных компонент сейсмического сигнала, обусловленных нестационарным характером сил в связанной с приемником системе координат.

Оценим характерную величину длительности  $t$  импульса силы, вызванного движущимся со скоростью  $v$  железнодорожным составом длиной  $l$  по формуле

$$t=l/v \quad (1)$$

При средней длине поезда 500 м и скорости 90 км/час, характерное время изменения нагрузки на полотно составляет 20 с и максимальная величина смещений грунта будет наблюдаться в полосе частот 0-0.05 Гц.

Оценим при этом величины смещений на поверхности грунта, вызванных весом действующим на колесную пару груженого четырехосного вагона грузоподъемностью 80 т. Для вычисления вертикальной компоненты смещения воспользуемся формулой, полученной в работе [3].

$$u_z = F(1-\sigma^2)/\pi Er, \quad (2)$$

где  $u_z$ -вертикальная деформация грунта,  $F$ -величина силы,  $E$ -модуль Юнга (для грунта этот параметр изменяется от  $10^8$  до  $10^{10}$  н/м<sup>2</sup>),  $\sigma$  -коэффициент Пуассона. Значение коэффициента Пуассона изменяется от 0.25 до 0.5 при переходе от твердого к водонасыщенному грунту.

Подставляя в формулу (2) известные значения  $F$ ,  $E$ ,  $\sigma$  получаем, что на расстоянии  $r = 10$  м от полотна дороги величина смещения вертикальной компонент сухого грунта составляет соответственно 59 мкм для рыхлых пород и 0.59 мкм для твердых пород. Такие величины смещений вполне доступны для регистрации имеющимися сейсмическими станциями.

Постоянная нагрузка поезда в виде силы тяжести может вызвать генерацию распространяющегося сейсмического поля. Этот механизм, именуемый в электродинамике как переходный, возникает за счет движения постоянной силы по неоднородному пространству. В качестве характерной неоднородности среды могут выступать шпалы, лежащие на балласте. Характерная частота изменения сейсмического сигнала, определяемая формулой (1), составляет 36-50 Гц ( $l=0.5-0.7$  м - расстояние между шпалами,  $v = 90$  км/час – скорость движения).

Кроме того, генерация волновых сейсмических полей статической нагрузкой поезда возможна за счет так называемого в электродинамике «черенковского» механизма. Действие этого механизма проявляется в том случае, если скорость движения постоянной нагрузки больше минимальной скорости распространения сейсмических волн. На практике эти условия могут выполняться: скорости движения скоростных поездов достигают 50-100 м/с, а скорость распространения мод поверхностной волны для некоторых типов грунтов может составлять 40-70 м/с. Для сейсмических волн, обусловленных этим механизмом, характерным является наличие ударной N –волны. Длительность сейсмического импульса связана при этом с длиной железнодорожного состава и при указанных выше скоростях движения поезда составляет 7-14 с. В настоящей работе не даются теоретические оценки сейсмических возмущений, вызванных указанными выше двумя механизмами

Существуют и другие источники возбуждения сейсмических волн, обусловленные техническими особенностями подвижного состава и представляющие интерес для диагностики возможных неисправностей. Так неоднородный прокат колеса может привести к его несбалансированности и, соответственно, к формированию переменных силовых нагрузок, действующих на железнодорожное полотно. Несбалансированность колеса можно заменить эквивалентным действием приведенной к ободу массы дисбаланса  $m_{об}$ , которая создает центробежную силу. Фактическая величина силы дисбаланса вагонных колес может достигать 300 Н. Для данного механизма характерным является гармонический вид изменения силовой нагрузки на грунт.

Кроме того, при эксплуатации вагонных тележек окружность колеса с течением времени преобразуется в эллипс. При вращении колеса с такой поверхностью качения возникают переменные силы, спектр которых определяется формой отклонения поверхности колеса от окружности и может содержать в своем составе набор кратных гармоник.

При экстренном торможении колеса юзом на поверхности качения может образоваться ползун (хорда). В этом случае при движении состава возникает ударный процесс качения поверхности колеса по головке рельса. Из-за периодического характера процесса качения колеса спектр силовых нагрузок, действующих со стороны колеса на грунт, представляет гармонический ряд Фурье.

Основная частота изменения перечисленных выше силовых нагрузок зависит от скорости движения состава, радиуса колеса и равна

$$f = v/2\pi r_k \quad (3)$$

где  $r_k$  - радиус колеса.

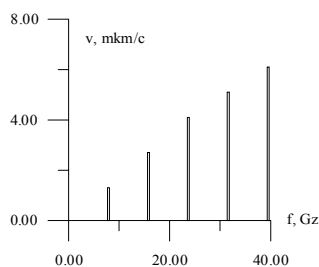
При скорости движения поезда, равной 90 км/час, и радиусе колеса, равного 0.5 м, основная частота изменения силы составляет 7.9 Гц.

Для оценки величин амплитуд волновых возмущений, создаваемых данными механизмами воспользуемся формулой работы [4].

$$V_z = \frac{0.075F \omega^{3/2}}{\rho C_R r^{5/2}} e^{-\frac{\theta \omega r}{C_R}} \quad (5)$$

где  $F$  - амплитуда силового воздействия,  $\rho$  - плотность грунта,  $C_R$  - скорость поверхностной волны Релея,  $\theta$  - декремент затухания,  $r$  - расстояние до источника. На рисунке приведено спектральное распределение амплитуд вертикальной компоненты поверхностной волны на расстоянии 25 м от полотна дороги. Расчетные параметры имели следующие значения:  $\rho=2000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_R=200$  м/с,  $\theta=0.03$ ,  $F=300$  Н.

Учитывая то, что спектр окружающих сейсмических шумов имеет, как правило, спадающий с ростом частоты характер, для диагностики неисправностей колесной группы необходимо использовать высокочастотные составляющие спектра сейсмического сигнала.



Кроме перечисленных выше источников генерации сейсмических сигналов поезда следует рассмотреть механизм взаимодействия движущегося состава с регулярными и случайными неровностями железнодорожного пути. Как показывает практика, этот механизм создает интенсивные сейсмические сигналы в грунте и будет исследован в дальнейших работах.

#### Литература

1. Т. М. Dawn. // J. Sound and Vibration. 1983. V.87. N2. P.351-356.
2. Т. Fujikake // J. Sound and Vibration. 1986. V.111. N3. P. 357-360.
3. Рекач В.Г. Руководство решения задач по теории упругости. - М.: Высшая школа, 1977, 215 с.
4. Отчет по НИР «Штихель». НИРФИ, Н. Новгород. 1991.

## **ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ РОТАЦИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ИМПУЛЬСА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В РЫХЛОМ ГРУНТЕ**

**В.В. Гущин, А.И. Потапов<sup>1)</sup>, С.Н. Рубцов**

*Научно-исследовательский радиофизический институт,*

*<sup>1)</sup>Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*

### **Введение**

Экспериментальные исследования распространения волн в средах с мезоструктурой [1,2] указывают, что в них при определенных условиях могут распространяться новые типы волн. Скорости распространения этих волн существенно отличаются от скоростей продольных и сдвиговых волн в твердом теле и не могут быть рассчитаны в рамках классической теории упругости. Для объяснения подобных феноменов привлекаются более сложные модели сплошных сред, учитывающие ротационные степени свободы частиц среды [3-5].

Так в работе [3] на основе модели континуума Коссера была предпринята попытка объяснения генерации низких частот (субгармоник), наблюдавшихся в рыхлом грунте [6]. В работе [5] предложена одномерная модель гранулированной среды, в которой показано, что скорости продольной, сдвиговой и ротационной волн в такой среде зависят от пористости (рыхлости) среды и формы гранул.

Типичным примером среды со сложной структурой является верхний слой грунта, в котором наряду с продольными и поперечными волнами могут возбуждаться колебания связанные с микроповоротами его фрагментов. В работе [7] проведено экспериментальное исследование условий генерации в грунте субгармоник излучаемого колебания. Возникшие субгармоники на основании выводов работы [2] отождествлялись с волнами микроповоротов. Тем не менее, остается вероятность, что они являются продуктом нелинейного преобразования излученного колебания упруго-вязкой средой. Однако в этом случае их скорость распространения не должна отличаться от скорости других спектральных составляющих импульса, так как дисперсия Р-волн мала.

Для определения природы возникновения субгармоник в настоящей работе предпринята попытка определения скорости распространения низкочастотных (субгармонических) колебаний в грунте и ее зависимости от структуры грунта.

### **Методика проведения эксперимента**

Эксперименты проводились в геобассейне НИРФИ. Глубина геобассейна – 1 м, грунт – сухой слежавшийся суглинок, в котором размещены акселерометры. Один из них помещен непосредственно под источником сигнала, два других на глубинах  $30 \pm 1$  см и  $60 \pm 1$  см. Источником сигнала являлся пьезокерамический стержневой вибратор с резонансной частотой 2.9 кГц и шириной полосы 0.1 кГц. по уровню 0.7. Возбуждение вибратора проводилось коротким (два периода несущей частоты) высокочастотным импульсом с несущей на резонансной частоте вибратора. Колебания, принятые акселерометрами, усиливались и поступали на цифровой накопи-



тель, где проводилось синхронное суммирование 100 – 200 импульсных посылок. Параметры накопителя: длительность фиксируемой реализации 2048 точек, период квантования сигнала 10 мкс, разрядность входного АЦП –11, разрядность памяти – 24. Сигнал с накопителя записывался в ПК.

Поскольку эксперименты проводились длительное время, грунт под весом источника со временем уплотнялся, его параметры менялись [8], таким образом, без изменения блок-схемы установки плавно менялся объект исследования.

Малая глубина геобассейна не позволяла пространственно разделить компоненты импульса распространяющиеся с разными скоростями. Поэтому, для измерения скоростей распространения спектральных компонент импульсного колебания проводилась фильтрация сигналов принятых на разных глубинах полосовым фильтром образованным ВЧ и НЧ фильтрами Баттерворда 8<sup>го</sup> порядка. Полоса пропускания фильтра была выбрана равной 100 Гц. Определение скорости распространения отфильтрованных компонент проводилось по построенному для каждого случая годографу скорости.

Погрешность измерения скорости распространения волн оценивалась как 7% по ВЧ и 10% по НЧ- колебаниям (более плавные кривые затрудняют определение момента прихода). Каждое полученное значение скорости – результат усреднения двух-трех измерений.

#### Эксперимент

Проведенные по описанной выше методике измерения показали, что скорость распространения в грунте колебаний с частотами в диапазоне 0.9 – 1.0 кГц отлича-

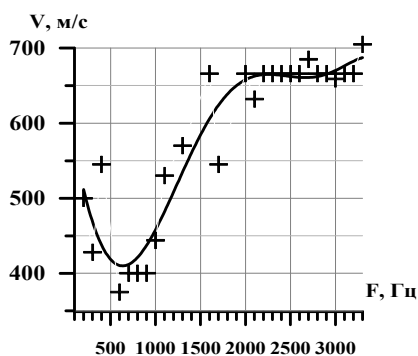


Рис. 1

ется от скорости распространения колебаний других частот. На рис.1 дано распределение фазовых скоростей отдельных спектральных составляющих импульса для рыхлого грунта. Наблюдается уменьшение скорости в районе частот субгармоники. Отметим, что подобная немонотонная зависимость фазовой скорости от частоты характерна для волн в среде с внутренними колебательными степенями свободы. К ним относятся упругие среды с порами заполненными газом или жидкостью [9] и жидкости с пузырьками газа.

Это позволяет предположить, что сейсмоколебания на частоте субгармоники относятся к волне микровращений (ротационные волны).

На рис.2 приведен график отражающий соотношение величин скоростей распространения Р-волн и колебаний на частоте субгармоник в грунте различной

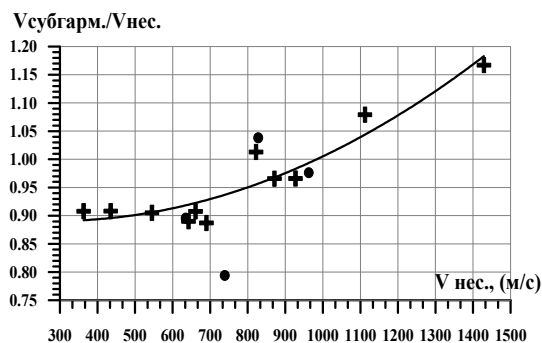


Рис.2

плотности. Из графика видно, что с ростом скорости распространения Р-волн (уплотнением грунта) растет относительная величина скорости распространения ротационных колебаний. Начиная с некоторого значения плотности грунта, скорость распространения волн микровращений превышает скорость распространения Р-волн. Подобный

же эффект наблюдался в экспериментах в искусственно созданных гранулированных материалах (алюминиевая дробь в эпоксидной матрице) [10]. Это согласуется и с теоретическими данными работы [5], где отмечается, что переупаковка частиц в гранулированных материалах может приводить к существенному увеличению скорости волны микровращений.

Работа проведена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Интеграция» и грантов РФФИ №№ 00-05-64429, 00-02-16582 и 01-01-00386.

#### Литература

1. Гик Л.Д. // Физическая мезомеханика. 1998. Т.1, №2. С.101.
2. Потапов А.И., Родюшкин В.М. // Акустический журнал, 2001, т.47, №3. С.347.
3. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. // Докл. РАН, 1997, т.352, №5. С.676.
4. Eringen A.C. Microcontinuum Field Theories. 1: Foundation and solids. Springer Verlag, New York Inc., 1999. 342 p.
5. Лисина С.А., Потапов А.И., Нестеренко В.Ф. // Акустический журнал, 2001, т.47, №5. С.685.
6. Гуцин В.В., Заславский Ю.М., Рубцов С.Н. // Препринт №395, НИРФИ, Н.Новгород. 1994. 20 с.
7. Гуцин В.В., Кудрявцев В.А., Рубцов С.Н. // Физика Земли, 2001, №10. С.56.
8. Гуцин В.В., Заславский Ю.М., Рубцов С.Н. // Физика Земли, 1997, №12. С.68.
9. Наугольных К.А., Островский Л.А. // Нелинейные волновые процессы в акустике. М: Наука, 1990. 237с.
10. Gauthier R.D. // Mechanics of Micropolar media. World Scientific, Singapore, 1982. P.395.

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

М.В. Тарантин

*Горный институт УрО РАН*

### Введение

Одно из применений акустических полей – использование их параметров при исследовании горных пород в процессе геофизических исследований скважин. Акустический каротаж в настоящее время получил широкое распространение и в большинстве геофизических служб вошел в стандартный комплекс каротажных исследований, поскольку несет объективную физическую информацию о вскрытых скважиной горных породах – информацию о скоростях упругих волн в них [1].

По определяемым характеристикам можно судить о структуре породы, в частности о наличии в ней неких неоднородностей, аномальных зон. Однако выводы можно делать лишь при условии, что известно решение т.н. прямой задачи (известно поле при заданной конфигурации системы скважина-прибор). Данная работа посвящена решению прямой задачи с тем, чтобы потом можно было делать предположения о виде решения обратной задачи (получение характеристик системы скважина-прибор по известному полю).

Очень часто ствол скважины пересекает большое количество слоев горных пород с различными физическими параметрами. Необходимо найти наиболее простой путь для выделения этих слоев из всей толщи. Кроме этого нередко в месте пересечения скважиной слоя слабой породы образуются каверны. Все эти факторы определенным образом влияют на каротажные данные. Определяемые по результатам каротажа параметры пород так же подвергаются искажению, и эти искажения необходимо определять и учитывать.

Было смоделировано влияние на акустический сигнал наклонного слоя и искажения геометрии скважины в рамках простой модели, а также исследовано влияние этих неоднородностей на обычно определяемые параметры сигнала.

### Применяемая модель

Модель строится на следующих предположениях: все акустическое поле может быть представлено в виде суперпозиции отдельных акустических полей, волновой сигнал при распространении подчиняется законам геометрической акустики. Будем рассматривать заполненную жидкостью цилиндрическую скважину в однородной толще с одиночным наклонным слоем некоторой толщины с параметрами, отличными от параметров вмещающей породы; каротажный прибор представляет собой круговой цилиндр заданной геометрии и находится на оси симметрии скважины.

В данном случае удобно перейти к цилиндрическим координатам  $(R, \theta, Z)$ . Ось  $Z$  совмещается с осью симметрии ствола скважины и прибора, все пространство разбивается на угловые сегменты полуплоскостями  $\theta = const$ . При достаточно большом количестве сегментов можно считать, что стенки скважины в пределах

каждого из них плоские. В силу предположения об «аддитивности» поля можно рассматривать распространение сигнала в каждом пространственном сегменте отдельно, а затем сложить сигналы, принимаемые приемником от каждого сегмента. При таком представлении задача о распространении сигнала сводится к плоской. В рамках модели полагается, что при преломлении сигнала на границе раздела жидкость-порода сигнал никак не изменяется, так как цель исследования – определить влияние на сигнал неоднородностей в толще породы, а не на всем пути распространения.

#### Влияние наклонного слоя

В данном случае основной интерес представляет случай, когда волновой фронт при распространении захватывает слой не во всех азимутальных направлениях, а лишь в части. При этом часть волнового фронта претерпевает соответствующие изменения, а часть проходит без изменений – соответственно наблюдается наложение неискаженного сигнала на искаженный. Параметры результирующего сигнала зависят от соотношения вкладов каждой из частей. Однако наблюдается тенденция снижения амплитуды сигнала и главной частоты. На рисунке 1 представлены зависимости амплитуды сигнала (1а) и частоты (1б) от толщины наклонного слоя (в см.) при различных углах его наклона (разные кривые).

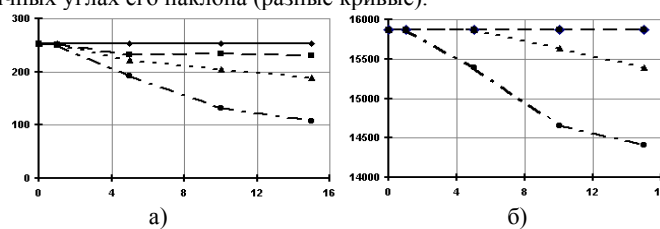


Рис. 1.

В рамках принятой модели отличить наклонный слой от горизонтального с большим затуханием практически невозможно.

#### Влияние тонкого слоя

Из теории волн [2] известно, что при прохождении границы двух сред с разными свойствами (оптическими, акустическими – в зависимости от типа волн) часть волны отражается. Поэтому в тонком слое возможны резонансные эффекты. Влияние границ раздела сред и тонких слоев описано в работе [3], и именно эти математические модели были исследованы применительно к акустическому каротажу. В результате получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) влияния тонкого слоя в зависимости от его толщины, угла наклона и скорости распространения сигнала в нем. Эти АЧХ для различных углов наклона слоя и фиксированной толщины (3 см.) представлены на рисунке 2а (углы составляют 0, 20, 40, 60, 80 градусов с горизонтом) и для различной толщины горизонтального слоя (1, 3, 5, 7 и 9 см.) – на рисунке 2б.

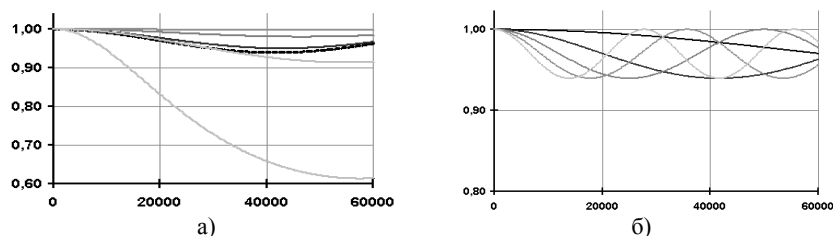


Рис 2.

В результате исследований получены пределы изменения толщины слоев, которые могут быть найдены по материалам АК. Эти пределы обусловлены формой АЧХ слоя и в данной модели максимальная толщина слоя составляет 5 сантиметров.

#### Искажение геометрии скважины

В рамках модельного подхода искажение ствола скважины сказывается в интерференции волн разных угловых сегментов. В результате сигнал искажается: уменьшается его основная частота и амплитуда. На рис. 3 представлены зависимости амплитуды (3а) и главной частоты (3б) принимаемого сигнала от толщины наклонного слоя при различном искажении ствола скважины (разность полуосей эллипса составляет 0, 0.5 и 1.0 см.)

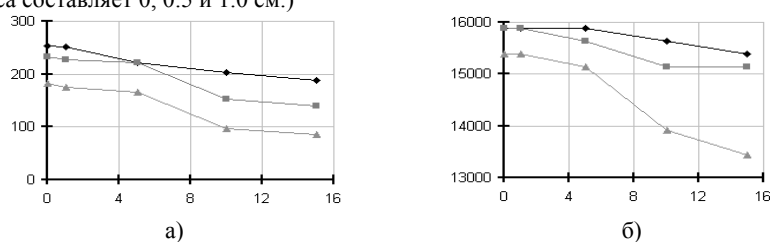


Рис. 3.

В терминах амплитуда-частота почти невозможно отличить влияние частотного затухания сигнала от влияния интерференции. Для разделения этих двух эффектов необходимо использовать данные, например, о форме спектра полученного сигнала.

#### Литература

1. Ивакин Б.Н., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Акустический метод исследования скважин. – М.: Недра, 1978, С. 229-276.
2. Овчинников И.К. Теория поля. – М.: Недра, 1979.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: АН СССР, 1957.