

Учредители:

ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ СО РАН
ООО "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ"

ООО "ЦЕНТРАЛЬНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ "СПЕКТР"

ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

2/2009

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Ю. П. Ампилов - председатель
М. Л. Владов
А. Ф. Глебов
М. С. Денисов
А. П. Жуков
Л. А. Золотая
В. И. Кузнецов
М. М. Мандельбаум
Н. В. Милетенко
Б. Г. Михайленко
С. Н. Птецов
В. С. Славкин
В. Д. Суворов
В. Н. Троян
Г. А. Шехтман

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Л. Д. БОВТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ОСНОВАН В 2004 ГОДУ

Издатель: ООО "ЦЕНТРАЛЬНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ "СПЕКТР":
(ООО "Издательство "Спектр")

Ведущий редактор - **Л. Д. Овчининская**
Научный редактор - **М. Б. Шнейерсон**
Редактор - **С. И. Козлова**
107014, Москва, ул. Жебрунова, б, к. 126
Тел./факс: (495) 349-01-67
Для писем: 109144, Москва, а/я 7
ООО "Издательство "Спектр"
E-mail: geofizdat@geomodel.ru

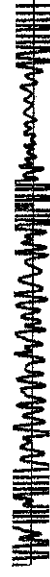
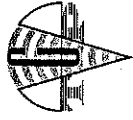
Производство журнала:
"ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕРС":

Компьютерная
вёрстка - **В. Г. Зайцева, А. В. Титоченко**
Набор - **Р. С. Калинин**
Корректор - **Н. В. Царева**
170037, Тверь, ул. 2-я Лукина, 9
Тел.: (4822) 35-41-00, 34-40-29
Отпечатано в типографии "Издательство ГЕРС":
лицензия ПД № 5-0012

Подписной индекс
по каталогу "Пресса России":
42087 - полугодие
42088 - годовая

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИИ № 77-17833 от 05. 04. 2004 г.

Перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИИ № ФС77-33653 от 25. 09. 2008 г.



В. Б. Левянт
И. Б. Петров
С. А. Панкратов

ОАО "ГЭС", МОСКВА
МФТИ, МОСКВА
МФТИ, МОСКВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН ОТКЛИКА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОГО КОЛЛЕКТОРА

АННОТАЦИЯ. В статье методом численного моделирования исследуется характер продольных и обменных волн, обусловленных рассеянием упругой энергии от трещиноватых зон в массивных породах. Анализируется влияние плотности, наклона и характера заполнения трещин на энергетический уровень продольных PP и обменных PS -волн при регистрации вертикальной и горизонтальной компонент сейсмического сигнала. Выявлены существенные различия их уровней. Показано, что соотношение энергии различных компонент продольных и обменных волн может быть использовано для прогнозирования характера заполнения и наклона трещин. Предварительно также наметилась потенциальная возможность по этим соотношениям оценивать плотность газонасыщенных вертикальных трещин в ранее выявленных трещиноватых резервуарах.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование трещиновато-кавернозных резервуаров в последнее десятилетие стало одним из основных направлений в развитии сейсмических методов разведки нефтяных и газовых месторождений. Из многочисленных публикаций, посвященных этой проблеме, можно выделить работы, нацеленные на изучение и использование рассеянных волн - откликов сейсмической энергии от трещиноватых и кавернозных коллекторов.

Ряд методов выделения зон повышенной концентрации рассеянной энергии, которые ассоциируются с трещиноватыми коллекторами, нашёл практическое применение в отечественной сейсморазведке: технология СЛБО [3], ФП - фокусирующих преобразований [7, 8], волнового ОГТ [2], текстурно-спектрального анализа [5], миграционного изображения рассеивающих объектов МИРО [1]. Все эти методы нацелены на выявление трещиноватых и кавернозных резервуаров по аномалиям высокого уровня рассеянной энергии. Однако более детальные характеристики трещинно-кавернозных резервуаров в массивных вмещающих породах, такие как характер заполнения, пространственное положение и плотность трещин, практически не определяются. Для решения этих задач требовалось более детальное изучение характера распространения сейсмических волн в случайно-неоднородной упругой среде, каковой являются трещинно-кавернозные резервуары в массивных породах.

Одним из наиболее корректных методов изучения характера распространения волн в таких средах является

ся численное моделирование. В его основу должны быть положены системы дифференциальных уравнений с частными производными, описывающие распространение как продольных, так и поперечных волн в приближении малых деформаций.

Исследование особенностей волнового отклика от кавернозного резервуара, заключённого в однородной массивной вмещающей среде [4], показало, что отклик представляет собой многофазный пакет интерферирующих фрагментов продольных и обменных волн с временной мощностью, отвечающей толщине резервуара. Выказанное предположение о природе такого волнового отклика, обусловленного неравномерной кондентрацией микронеоднородностей с образованием зон их скопления - кластеров, сопоставимых с длиной сейсмической волны, было подтверждено в работе [6]. В ней был использован более совершенный по сравнению с предыдущим в работе [4] численный метод, позволяющий в явном виде задавать не только каверны, но и многочисленные произвольно ориентированные трещины малой величины. На базе его применения было установлено, что в зонах диффузной трещиноватости с ростом неравномерности распределения трещин в прострэнстве (т. е. с увеличением кластерной структуры) так же, как и в случае с кавернами, увеличивается энергия волнового отклика.

При этом были выявлены и существенные различия откликов кавернозных и трещиноватых резервуаров (имеется в виду равенство длины трещины и диаметра каверны). Заполненные жидкостью трещины в сравнении с кавернами при одинаковом их числе и размере дают существенно более слабый волновой отклик, но с боль-

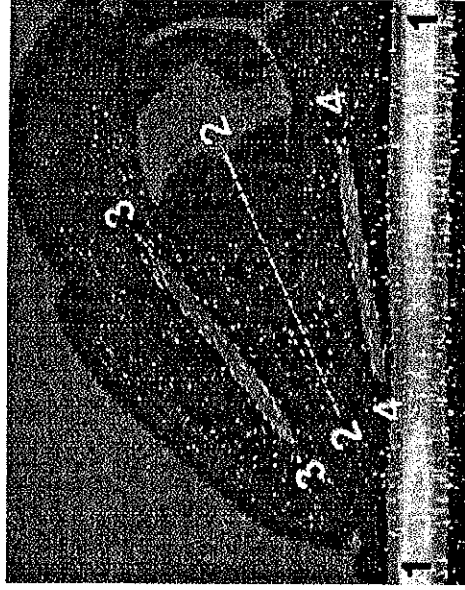


Рис. 1. Иллюстрация прохождения упругой волны PP через единичную трещину:

1-1 - плоский фронт падающей волны; 2-2 - наклонная трещина; 3-3 - отражённая обменная волна от трещины; 4-4 - проходящая обменная волна

шей относительной интенсивностью обменных (PS) волн по сравнению с продольными. Это можно объяснить относительной прозрачностью для продольных волн (PP) заполненных жидкостью трещин и достаточно интенсивным отражением от них обменных волн (PS). Подтверждением и иллюстрацией этого эффекта служит новая картина прохождения волнового фронта через единичную трещину, приведённая в работе [6] и изображённая на рис. 1. Видно, что по сравнению с продольными PP интенсивность отражённых обменных PS -волн заметно изменилась в пользу последних (отражённые PP -волны практически еле видны). Такая ситуация определяет значительную роль обменных PS -волн в обнаружении и описании трещиноватых флюидонасыщенных резервуаров.

В данной статье на базе методики численного моделирования, использованной в статье [6], приводятся результаты исследований, посвящённых продолжению изучения волновых откликов продольных (PP) и обменных PS -волн. Цель настоящей работы - выявление особенностей регистрируемой волновой картины при различных свойствах трещиноватых резервуаров, таких как плотность трещин, характер их заполнения и преобладающий наклон трещин. Особенностью проведённого исследования было получение волновых полей не только при регистрации вертикальной U -компоненты, но и при записи горизонтальной X -компоненты.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Использовалась модель идеального изотропного линейно-упругого материала. Известная система дифференциальных уравнений с частными производными описывает состояние элементарного объёма упругого материала в приближении малых деформаций следующими выражениями:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{xy}}{\partial y}; \quad \rho \frac{\partial V_y}{\partial t} = \frac{\partial t_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yy}}{\partial y};$$

$$\frac{\partial t_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial V_y}{\partial y}; \quad \frac{\partial t_{xy}}{\partial t} = \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} + \mu \frac{\partial V_x}{\partial y};$$

$$\frac{\partial t_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial V_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_y}{\partial y},$$

где ρ - средняя плотность среды; λ, μ - параметры Ламе; V_x и V_y - горизонтальная и вертикальная составляющие скорости; t_{xx}, t_{xy}, t_{yy} - напряжения в среде.

Для обеспечения инвариантности относительно выбора системы координат перейдём к форме её записи:

$$\rho \vec{v} = \nabla T, \quad T = \lambda(\nabla \cdot \vec{v}) + \mu(\nabla \otimes \vec{v} \otimes \nabla),$$

где \vec{v} - вектор скорости; T - симметричный тензор напряжений Коши; ∇ - оператор градиента, $(\nabla \cdot T)_k = \sum_i \nabla_i T_{ki}$; I - единичный тензор; \otimes - операторы скалярного и тензорного произведений: $a \cdot b = \sum_j f_j = ab$, $(a \otimes b)_{ij} = a_i b_j$. Рассмотрены условия контакта массивной породы с заполненными газом или жидкостью кавернами и трещинами.

1. Постановка граничных условий на поверхности раздела породы и трещины в явном виде, что позволяет ослабить ограничения на положение и ориентацию неоднородностей;

учитывать неоднородности с практически нулевым объёмом, но конечной площадью поверхности (трещины);

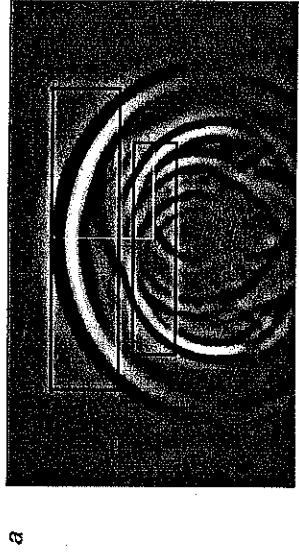
повысить точность расчёта микронеоднородностей с размерами, сопоставимыми с одной ячейкой сетки.

2. Использование неструктурированной треугольной разностной сетки, позволяющей описать любую форму неоднородностей (полостей) внутри массивной породы: и каверн, и плоских трещин.

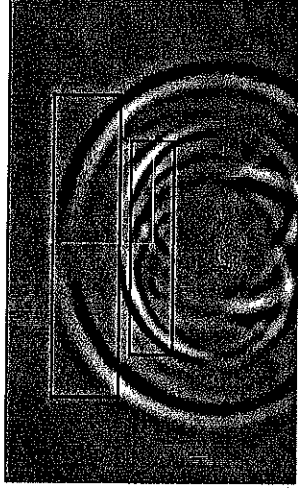
Решения построены на основе сеточно-характеристического метода, относящегося к схемам типа Куранта - Изакосона - Рунге для нерегулярных сеток. Поле восстановления не линейной интерполяцией в каждом треугольнике, а по значениям в узлах как непрерывная кусочно-квадратичная функция. Это обеспечивает численному методу свойство монотонности и позволяет избежать нефизических осцилляций решения. Подробная методика моделирования оригинальна. Она обеспечивает высокоточный расчёт волновых полей в произвольных заданных случайно-неоднородных средах.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ЦЕЛОМ, А ТАКЖЕ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН В ОТДЕЛЬНОСТИ

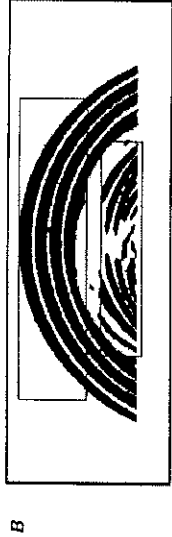
Для количественной оценки энергии использовался метод, предложенный в работе [6]. Полная кинематическая энергия отражённых сигналов оценивалась её расчётом по всей области интегрирования.



а



б



в

Рис. 2. Пример выделения областей волнового поля для оценки энергии продольных PP - и обменных PS -волн:
 а - при регистрации горизонтальной компоненты; б - вертикальной компоненты; в - при модульном представлении волнового поля

Для оценки изменений энергии продольных и обменных волн использовались фиксированные области их "чистого" (не осложнённого интерференцией с другими волнами) проявления. На рис. 2 эти области обозначены прямоугольниками.

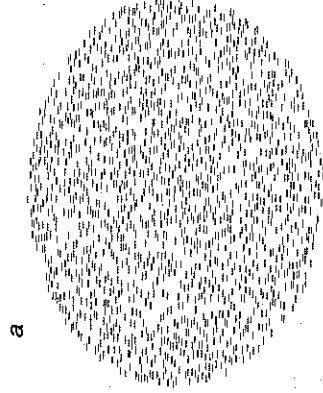
Помимо изменения их энергии в зависимости от плотности трещин, их числа, заполняющего флюида и регистрируемой компоненты (X или Y), рассчитывались отношения энергии E_{PP}/E_{PS} продольных и обменных волн.

ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ СО СЛУЧАЙНО-НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТРЕЩИН В КОЛЛЕКТОРНОЙ МАКРОЗОНЕ

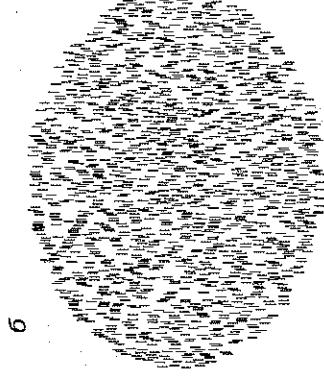
Исследовалось влияние на характеристику волнового отклика, содержащего продольные и обменные волны: а) плотности трещин (или их числа в эллиптическом объёме); б) наклона однонаправленных трещин; в) влияния заполнения трещины газа или воды.

Модели, для которых выполнялось численное моделирование, имели следующие параметры:

- Область интегрирования 400×200 м.
- Для массивных пород, вмещающих коллекторные зоны, приняты скорости продольных волн $V_1 = 6000$ м/с, поперечных волн $V_2 = 3500$ м/с и плотность $\rho = 2,7$ г/см³.
- Зона развития трещиноватости составляет эллиптическую область (60×30 м по осям эллипса).
- Для воды, заполняющей трещины, приняты плотность $\rho = 1,0$ г/см³ и скорости $C_1 = 1500$ м/с, $C_2 = 100$ м/с.
- Длина трещин $1,0$ м. Максимальная длина ребра сетки $0,15$ м.



а



б



в

Рис. 3. Характер распределения трещин в эллиптической макроне для горизонтального (а), вертикального (б) и наклонного (в) расположения трещин: плотность (число) трещин: слева - 1500, справа - 550

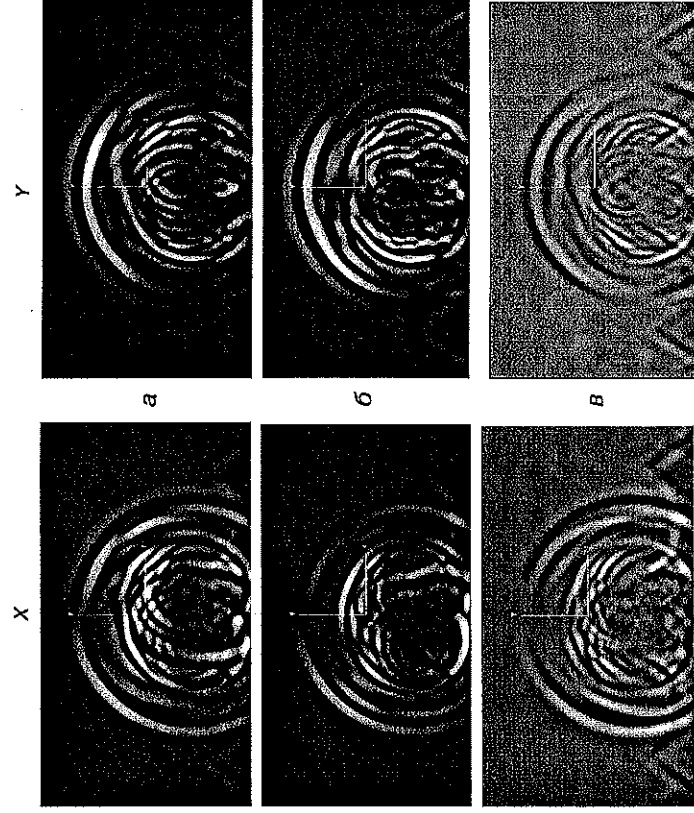


Рис. 4. Волновые поля откликов рассеянной энергии при регистрации вертикальной (Y) и горизонтальной (X) компонент для газонасыщенных трещиноватых резервуаров с горизонтальным (а), наклонным (б) и вертикальным (в) расположением 550 трещин

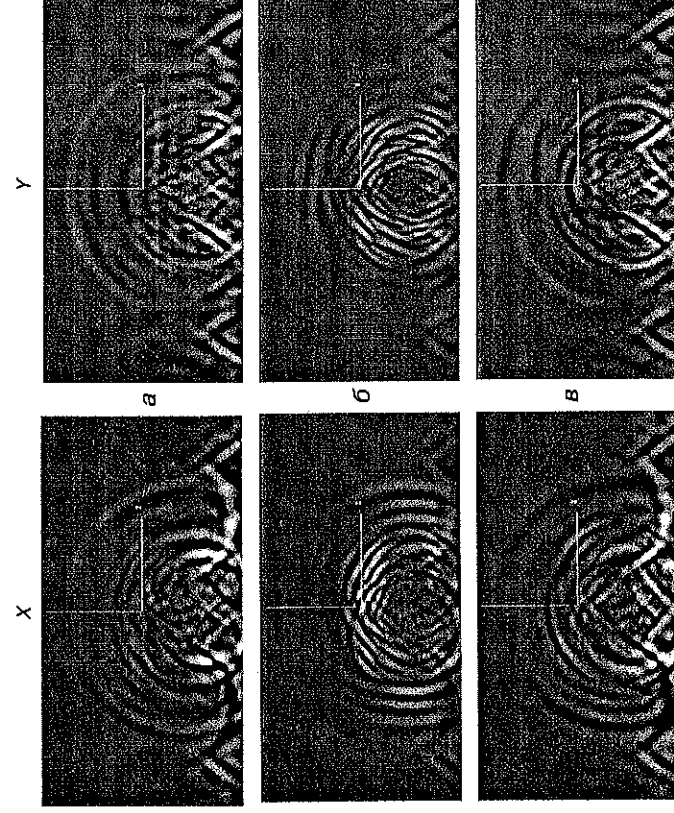


Рис. 5. Волновые поля откликов рассеянной энергии при регистрации вертикальной (Y) и горизонтальной (X) компонент для водонасыщенных трещиноватых резервуаров с горизонтальным (а), наклонным (б) и вертикальным (в) расположением 2000 трещин

Коллекторные зоны - это трещиноватые объемы среды внутри массивных вмещающих пород, содержащие трещинные пустоты, заполненные для одного класса моделей газом, для другого класса - водой. Расчёты волновых полей были выполнены для вертикальных, горизонтальных и наклонных трещин в газо- и водонасыщенных средах: число трещин - 200; 550; 800; 1000; 1500; 2000; 2500; 200 (длина 609 м); 550 (длина 1770 м); 800 (длина 2743 м).

Распределение трещин, т. е. оценка их координат в пределах эллиптической макрозоны, задавалось с использованием датчика случайных чисел, что обеспечивало случайно-равномерное их распределение.

Примеры распределения трещин приведены для низкой ($n = 550$) и средней ($n = 1500$) плотности на рис. 3.

Отличительной особенностью данного исследования по отношению к выполненным ранее [4, 6], была регистрация волнового поля не только вертикальной Y, но и горизонтальной X-компоненты. На рис. 4 показаны изображения волновых откликов от макрозон с различным расположением 550 газонасыщенных трещин на времени 0,022 с после прохождения волнового фронта через рассеивающую область. На рис. 5 приведено изображение волновых картин, полученных при регистрации X горизонтальной компоненты (слева) и Y вертикальной (справа) для макрозон с различным расположением 2000 водонасыщенных трещин в макрозоне.

Волновые изображения, записанные на земной поверхности (обычные сейсмограммы), отличаются от приведённых на упомянутых рисунках. Однако метод, которым изображён процесс распространения волн, не оказывает какого-либо искажающего воздействия на взаимосвязь между свойствами среды и энергией отклика.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН ОТ ХАРАКТЕРА ЗАПОЛНЕНИЯ ТРЕЩИН, ИХ ПЛОТНОСТИ И НАКЛОНА

Полученный массив рассчитанных волновых полей позволяет оценить:

- влияние заполнения трещин газом или жидкостью на энергетический уровень продольных и обменных волн и соотношение их энергий;
- влияние наклона трещин на характеристики волновых полей;

оватые
ещая-
пусто-
уделей
счёты
ы для
онных
редак:
, 2000;
, 70 м);

ика их
, мак-
4 дат-
двало
эние.
риве-
1500)

иното
инен-
лно-
но и
ис. 4

иков
нем
еени
онта
ис. 5
тин,
зон-
аль-
рас-
цин

е на
ам-
мя-
ым
лн,
ето
ва-

ю-
ли
нь
о-
и-

Таблица 1

Изменение энергии отклика для продольных E_{PP} (числитель) и обменных E_{PS} (знаменатель) волн при регистрации Y - и X -компонент (в условных единицах)

| Характер насыщения | Регистрация продольных PP -волн/обменных PS -волн на вертикальной Y -компоненте | | | Регистрация продольных PP -волн/обменных PS -волн на горизонтальной X -компоненте | | |
|--------------------|---|--|---|---|---|---|
| | Расположение трещин | | | Расположение трещин | | |
| | Горизонтальные | Вертикальные | Наклонные | Горизонтальные | Вертикальные | Наклонные |
| Газ | $\frac{1000 \dots 6000}{480 \dots 1900}$ | $\frac{20 \dots 150}{44 \dots 100}$ | $\frac{300 \dots 3000}{250 \dots 1250}$ | $\frac{500 \dots 2500}{530 \dots 2450}$ | $\frac{20 \dots 55}{22 \dots 55}$ | $\frac{300 \dots 3000}{280 \dots 2880}$ |
| Вода | $\frac{0,1 \dots 0,4}{0,24 \dots 1,11}$ | $\frac{0,1 \dots 0,6}{0,321 \dots 3,36}$ | $\frac{0,016 \dots 0,081}{0,44 \dots 2,24}$ | $\frac{0,25 \dots 0,7}{0,107 \dots 0,639}$ | $\frac{0,3 \dots 4,0}{0,27 \dots 4,08}$ | $\frac{0,011 \dots 0,098}{0,20 \dots 3,58}$ |

□ характер изменения энергии продольных и обменных волн и соотношения их энергий с изменением плотности трещин.

Ниже анализируются значения плотности энергии продольных PP -волн (E_{PP}) при Y - и X -регистрации, а также обменных PS -волн (E_{PS}), рассчитанные в пределах фиксированных контуров (см. рис. 2) для всех вариантов волновых картин для моделей трещиноватых зон. Пределы изменения этих величин для всех вариантов с одинаковой протяжённостью трещин приведены в табл. 1.

Таким образом, имеют место очень существенные изменения энергетического уровня, как при изменении характера насыщения, так и при разных наклонах трещин.

В целях получения обобщённых оценок относительно энергетического уровня для горизонтальных и наклонных трещин они были приведены к уровню E_{PP} для вертикальных трещин для каждого из семи вариантов плотности (числа) трещин.

$$\text{Осреднённые отношения } E_{PP} = \frac{\sum (E_{PP} / E_{верт})}{7},$$

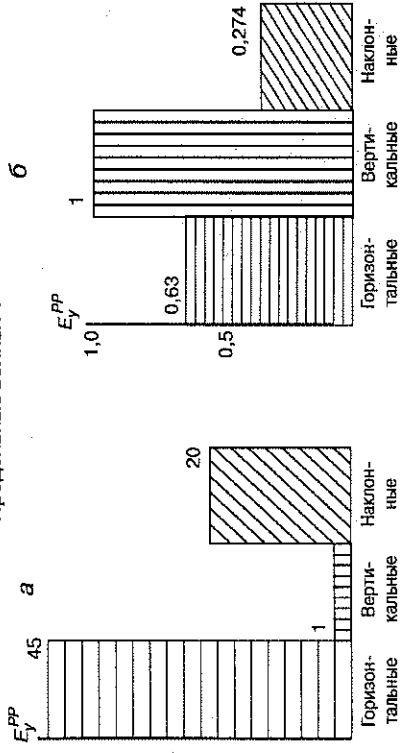
определяющие соотношение энергий продольных волн для рассматриваемых вариантов наклонов трещин и характера их заполнения, приведены на рис. 6, а, б.

Осреднение отношений энергий, а не самих E_{PP} позволило получить устойчивые относительные значения E_{PP} с низким уровнем дисперсии. На рис. 6, в, г приведены аналогичные графики для обменных волн. Такой анализ был выполнен для данных при регистрации вертикальной Y -компоненты.

Сопоставление относительных уровней энергии продольных волн для заполненных газом и водой трещин свидетельствует о резком изменении их относительной интенсивности для всех трёх вариантов расположения трещин.

Относительный уровень E_{PP} для горизонтальных трещин снизился примерно в 50 раз по сравнению с таковыми для вертикальных трещин. Относительный уровень E_{PP} для наклонных трещин увеличился примерно в 6 раз.

Продольные волны PP



Обменные волны PS

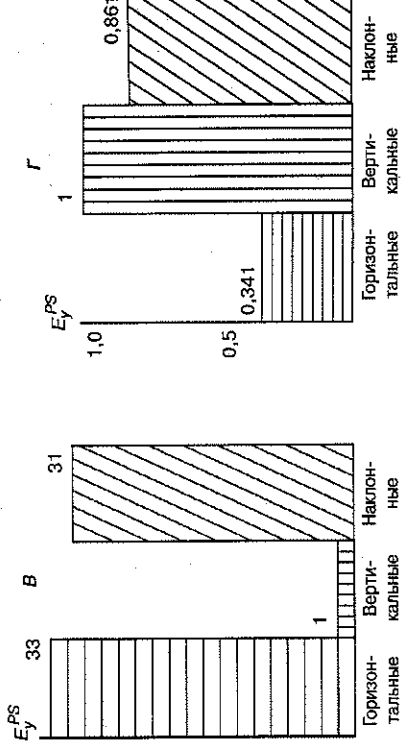


Рис. 6. Осреднённые значения относительных уровней энергии продольных и обменных волн для газо- (а, в) и водонасыщенных (б, г) трещин при их горизонтальной, вертикальной и наклонной направленности

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ЗАПОЛНЕНИЯ ТРЕЩИН НА СООТНОШЕНИЕ ЭНЕРГИЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН

Оценивалось среднее значение отношений энергий продольных и обменных волн для всех вариантов плотности трещин.

На рис. 7, а, б приведены средние по всем вариантам плотности N трещин значения отношений энергий E_y^{PP}/E_x^{PS} для трёх типов наклона трещин и при

заполнении их газом и водой:
$$\frac{E_y^{PP}}{E_x^{PS}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_{y_i}^{PP}}{E_{x_i}^{PS}}$$

Они дают обобщённые, хотя и грубые оценки соотношений энергий продольных и обменных волн.

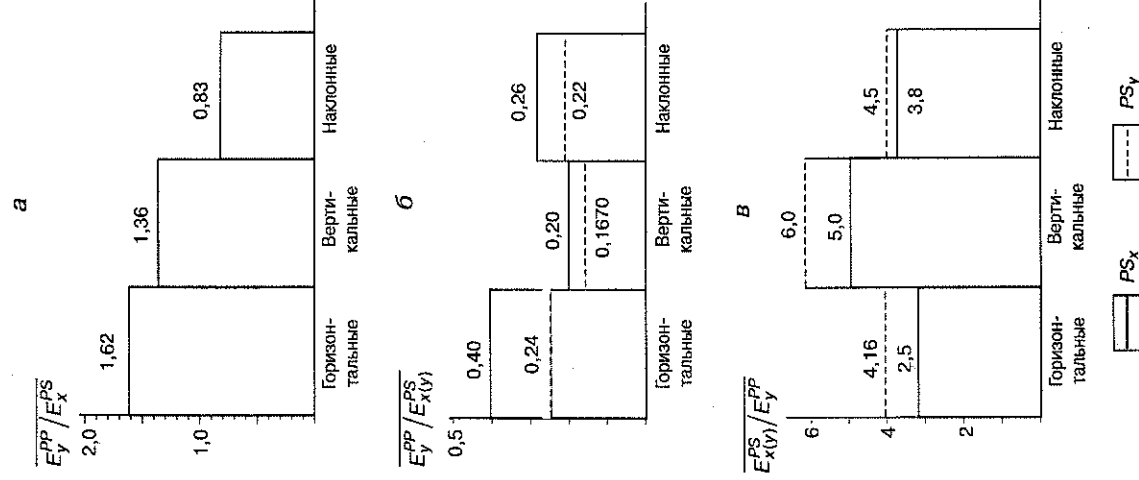


Рис. 7. Отношения энергий продольных (PP) и обменных (PS) волн для газонасыщенных (сухих) трещин (а), для заполненных водой трещин (б) и превышение энергии обменных волн при X- и Y-регистрации над энергией продольных PP-волн при водонасыщении (в)

При газонасыщении в основном доминируют продольные волны. После заполнения водой соотношение резко (в 5 ± 1 раз) меняется в пользу обменных волн.

В целом для газонасыщенных трещин можно отметить:

- весьма высокий энергетический уровень отклика продольных PP-волн;

- значительное в (25 ... 50 раз) снижение его для вертикальной трещиноватости по сравнению с таковыми для горизонтальной и наклонной;

- соотношение энергии продольных и обменных волн (E_y^{PP}/E_x^{PS}) для всех вариантов наклонов выше 0,8 ... 1,0, т. е. примерно совпадает.

Для водонасыщенных трещин отмечается:

- на один-два порядка меньший энергетический уровень отклика энергии отражённой PP-волны, чем для сухих трещин;

- существенное превышение энергии обменных волн над уровнем энергии продольных волн (см. рис. 7, в);

- соотношение энергий продольных и обменных волн (E_y^{PP}/E_x^{PS}) для всех вариантов положения трещин ниже 0,3 ... 0,4.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН ОТ НАКЛОНА ТРЕЩИН В МАКРОЗОНЕ

На рис. 8 и 9 приведены графики значений энергии продольных и обменных волн при регистрации вертикальной Y- и горизонтальной X-компонент для газо- и водонасыщенных трещин соответственно. На рис. 10 и 11 изображены зависимости отношений энергий продольных и обменных волн также для газо- и водонасыщенных трещин соответственно при регистрации Y- и X-компонент.

Анализ этих графиков с целью выявления характерных особенностей при различных наклонах трещин позволяет выявить следующие закономерности:

Для вертикальных трещин, насыщенных газом (сухих), характерно:

- Превышение энергии продольной волны над энергией обменной волн: $E_y^{PP} > E_{y,x}^{PS}$ при плотности ($N > 1000$). При меньших значениях плотности $E_y^{PP} < E_{y,x}^{PS}$, т. е. меньше энергии обменной.

- Энергия обменной волны E_y^{PS} , зарегистрированной на Y-компоненте, всегда выше зарегистрированной на X-компоненте: $E_y^{PS} > E_x^{PS}$.

- Зависимость E_y^{PP}/E_x^{PS} (N) имеет линейный характер. Для вертикальных трещин, насыщенных флюидом (водой):

- $E_x^{PS} \equiv E_y^{PP} > E_y^{PS}$ во всём диапазоне плотности (N).

Для горизонтальных газонасыщенных трещин:

- $E_y^{PP} > E_x^{PS} > E_y^{PS}$.

- Для горизонтальных водонасыщенных трещин:

- Противоположное соотношение этих величин: $E_y^{PP} < E_x^{PS} < E_y^{PS}$.

Для наклонных газонасыщенных трещин:

- Практически равный энергетический уровень продольной E_y^{PP} при регистрации Y-компоненты и об-

При газонасыщении в основном доминируют продольные волны. После заполнения водой соотношение резко (в 5 ± 1 раз) меняется в пользу обменных волн.

В целом для газонасыщенных трещин можно отметить:

- весьма высокий энергетический уровень отклика продольных PP -волн;
 - значительное в (25 ... 50 раз) снижение его для вертикальной трещиноватости по сравнению с таковым для горизонтальной и наклонной;
 - соотношение энергии продольных и обменных волн (E_y^{PP}/E_x^{PS}) для всех вариантов наклонов выше 0,8... 1,0, т. е. примерно совпадает.
- Для водонасыщенных трещин отмечается:
- на один-два порядка меньший энергетический уровень отклика энергии отражённой PP -волны, чем для сухих трещин;
 - существенное превышение энергии обменных волн над уровнем энергии продольных волн (см. рис. 7, в);
 - соотношение энергий продольных и обменных волн (E_y^{PP}/E_x^{PS}) для всех вариантов положения трещин ниже 0,3 ... 0,4.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН ОТ НАКЛОНА ТРЕЩИН В МАКРОЗОНЕ

На рис. 8 и 9 приведены графики значений энергии продольных и обменных волн при регистрации вертикальной Y - и горизонтальной X -компонент для газо- и водонасыщенных трещин соответственно. На рис. 10 и 11 изображены зависимости отношений энергий продольных и обменных волн также для газо- и водонасыщенных трещин соответственно при регистрации Y - и X -компонент.

Анализ этих графиков с целью выявления характерных особенностей при различных наклонах трещин позволяет выявить следующие закономерности:

Для вертикальных трещин, насыщенных газом (сухих), характерно:

- Превышение энергии продольной волны над энергией обменной волны: $E_y^{PP} > E_{y,x}^{PS}$ при плотности ($N > 1000$). При меньших значениях плотности $E_y^{PP} < E_{y,x}^{PS}$, т. е. меньше энергии обменной.
- Энергия обменной волны E_y^{PS} , зарегистрированной на Y -компоненте, всегда выше зарегистрированной на X -компоненте: $E_y^{PS} > E_x^{PS}$.

менной E_x^{PS} волн при X -регистрации, который существенно превышает уровень обменной волны, регистрируемой на Y -компоненте: $E_y^{PP} \cong E_x^{PS} > E_y^{PS}$.

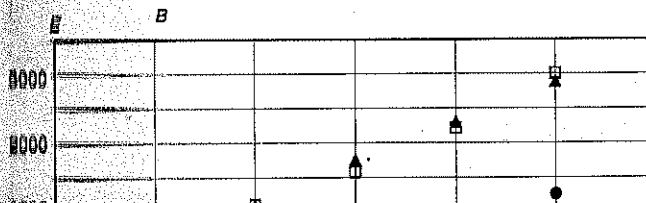
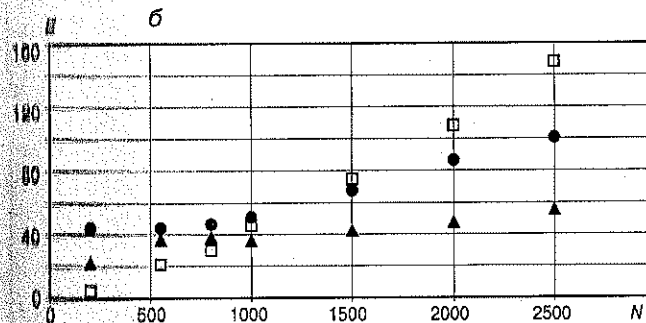
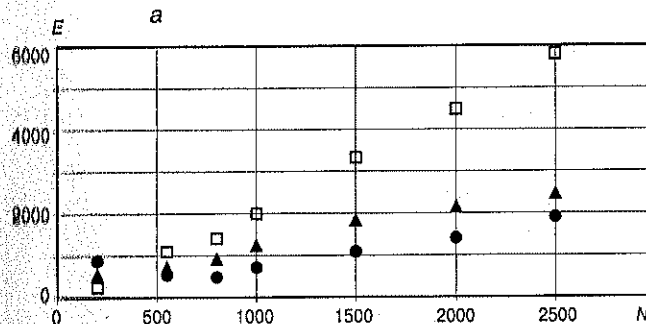
Для наклонных водонасыщенных трещин:

- $E_y^{PP} < E_x^{PS} < E_y^{PS}$.

Изложенные выше соотношения можно представить в компактной форме в табл. 2.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГИИ ПРОДОЛЬНЫХ PP - И ОБМЕННЫХ PS -ВОЛН ОТ ПЛОТНОСТИ ТРЕЩИН

На упомянутых выше графиках использовались волновые поля моделей с постоянной длиной трещин (1 м), поэтому их плотность характеризуется числом трещин в фиксированном эллиптическом объёме. Рассмотрение



графиков, представленных на рис. 8 - 11, позволяет отметить следующие характерные особенности зависимости энергии от плотности.

Для газонасыщенных трещин энергия продольных волн E_y^{PP} возрастает для всех вариантов наклона практически почти линейно (см. рис. 8).

Энергия обменных волн PS и при X -, и при Y -регистрации изменяется ближе к параболическому закону, выполаживаясь при малых значениях плотности. Исключение составляет график $E_x^{PS}(N)$ для наклонных трещин, который практически совпадает с графиком $E_y^{PP}(N)$ для продольных волн.

Для водонасыщенных трещин (см. рис. 9) линейный характер зависимостей отмечается для наклонных трещин при обеих компонентах регистрации X и Y обменной волны.

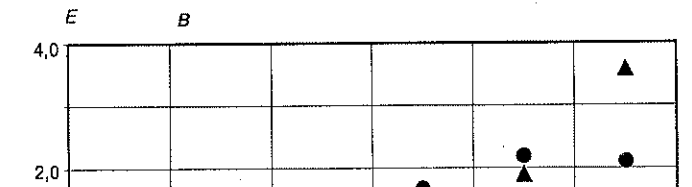
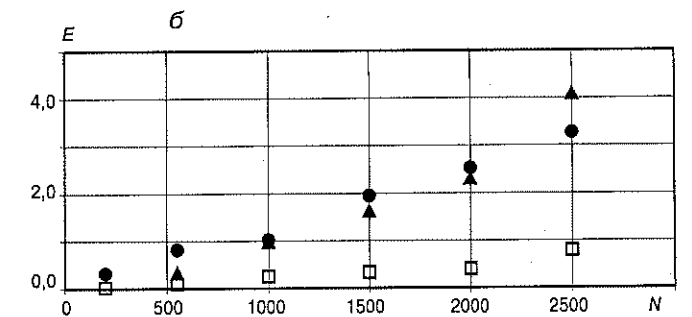
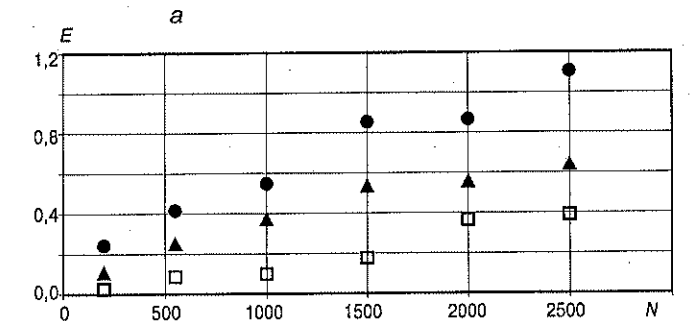


Таблица 2

| Наклон трещиноватости | Характер заполнения | Соотношение уровней энергий E_{PP} и E_{PS} |
|-----------------------|---------------------|---|
| Вертикальные | Водонасыщенные | $E_x^{PS} \approx E_y^{PS} > E_y^{PP}$ |
| | Газонасыщенные | $E_y^{PP} > E_{y,x}^{PS}$ при $N > 1000$ $E_y^{PP} < E_{y,x}^{PS}$ при $N < 1000$ $E_y^{PS} > E_x^{PS}$ |
| Горизонтальные | Водонасыщенные | $E_y^{PP} < E_x^{PS} < E_y^{PS}$ |
| | Газонасыщенные | $E_y^{PP} > E_x^{PS} > E_y^{PS}$ |
| Наклонные | Водонасыщенные | $E_y^{PP} < E_x^{PS} < E_y^{PS}$ |
| | Газонасыщенные | $E_y^{PP} \approx E_x^{PS} > E_y^{PS}$ |

Для вертикальной трещиноватости можно говорить о параболической зависимости почти совпадающих значений E_x^{PS} и E_y^{PS} .

Для горизонтальных трещин груболинейная зависимость E_y^{PS} (N) заметно отличается от выполаживающейся в области высокой плотности (больших N) E_x^{PS} (N). Низкий уровень значений E_y^{PP} не позволяет выявить определённую зависимость от плотности (N).

Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн E_y^{PP}/E_x^{PS} и E_y^{PP}/E_y^{PS} от плотности, приведённых на рис. 10 и 11 позволяют отметить следующее.

Для газонасыщенного резервуара только для вертикальных трещин можно выделить для всего диапазона значений (N) линейную явную зависимость (с большим углом наклона) зависимость E_y^{PP}/E_x^{PS} (N).

Для горизонтальных и наклонных трещин эта зависимость более пологая (слабая) и меньшем диапазоне значений.

Для отношений E_y^{PP}/E_y^{PS} характерен почти постоянный уровень на большей части диапазона изменения плотности.

Отношение этих величин для вертикальных трещин существенно меняется от градиента изменений при $N < 1000$ и $N > 1000$.

Для заполненных водой трещин зависимости отношений энергий продольных и обменных волн E_y^{PP}/E_x^{PS} и E_y^{PP}/E_y^{PS} в основном не закономерны. Можно только для

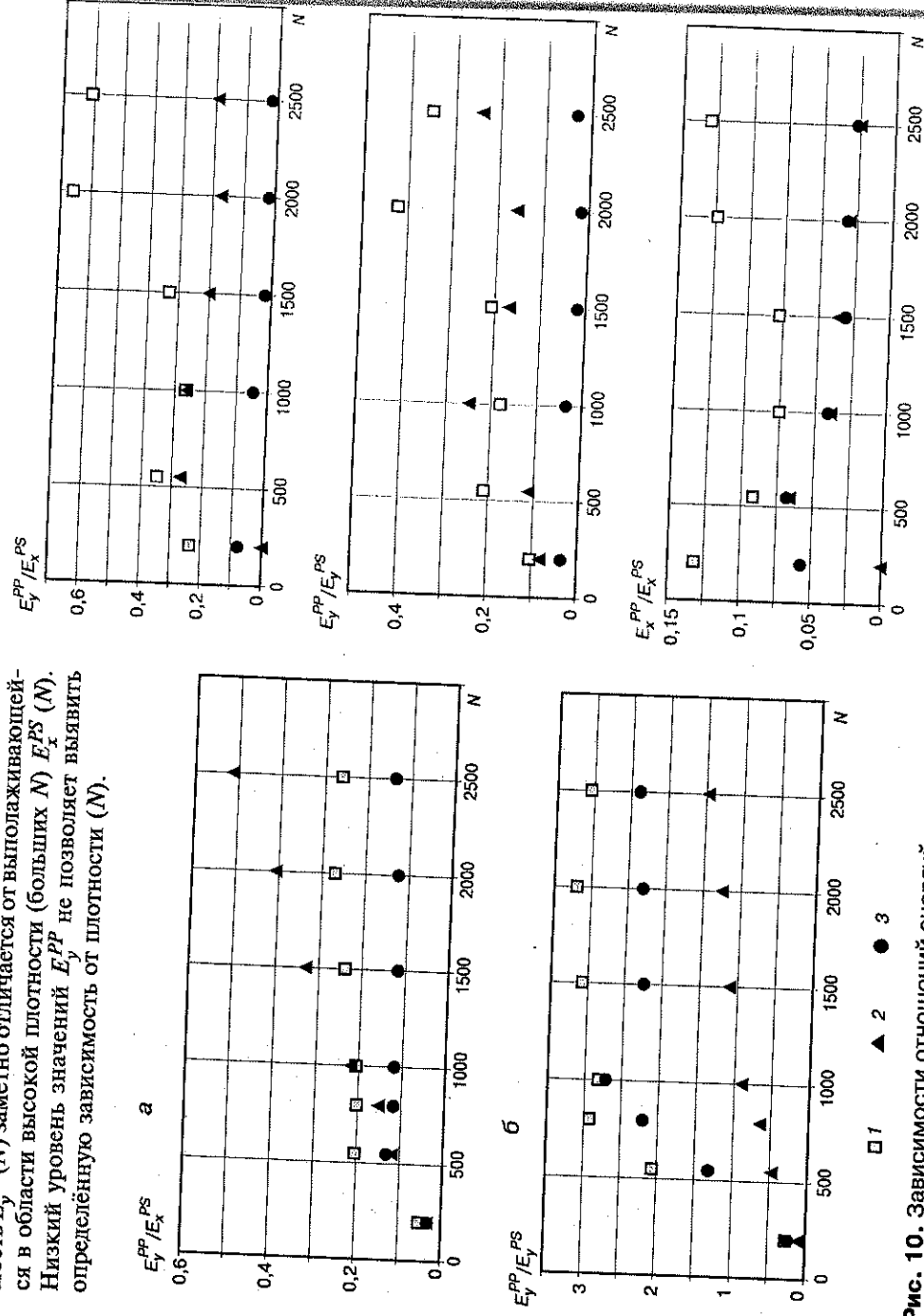


Рис. 10. Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн от плотности (числа) газонасыщенных трещин при горизонтальной (а) и вертикальной (б) регистрации обменных волн: 1 - горизонтальные, 2 - вертикальные, 3 - наклонные

Рис. 11 Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн от плотности (числа) заполненных водой трещин при вертикальной (а) и горизонтальной (б) регистрации: усл. обозначения см. на рис. 10

