

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

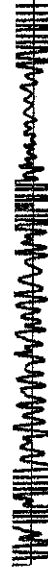
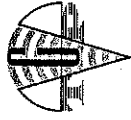
Производство журнала:  
"ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕРС":

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 ПИ № 77-17833 от 05. 04. 2004 г.

Перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № 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-

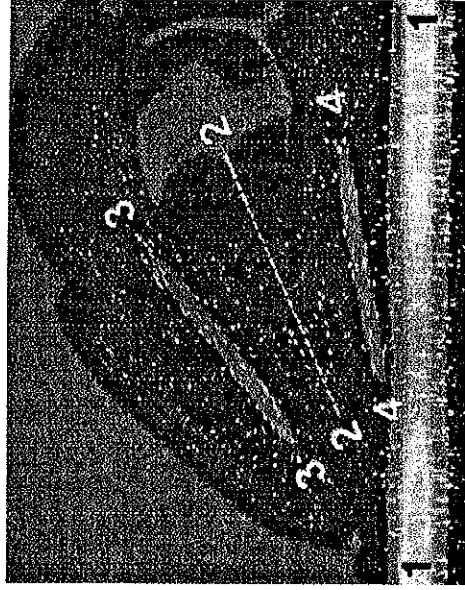


Рис. 1. Иллюстрация прохождения упругой волны  $PP$  через единичную трещину:

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 волновая 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  $\rho$  - средняя плотность среды;  $\lambda, \mu$  - 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;  $\nabla$  - 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);

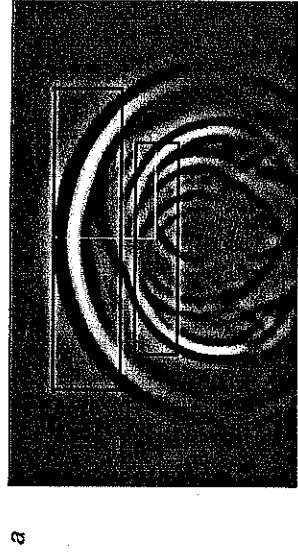
повысить точность расчёта микронеоднородностей с размерами, сопоставимыми с одной ячейкой сетки.

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 - Риса 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.

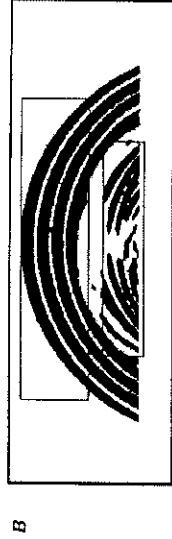
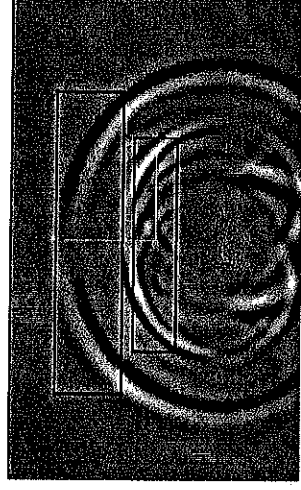
## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ЦЕЛОМ, А ТАКЖЕ ПРОДольНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН В ОТДЕЛЬНОСТИ

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, заполнения флюида и регистрируемой компоненты ( $X$  или  $Y$ ), рассчитывались отношения энергии  $E_{PP}/E_{PS}$  продольных и обменных волн.

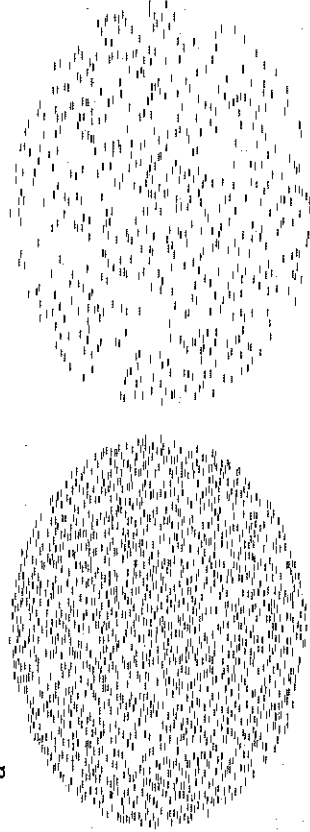
#### ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ СО СЛУЧАЙНО-НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТРЕЩИН В КОЛЛЕКТОРНОЙ МАКРОЗОНЕ

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.

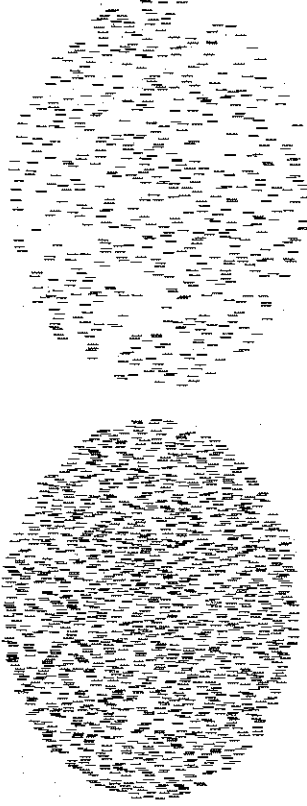
Модели, для которых выполнялось численное моделирование, имели следующие параметры:

- Область интегрирования  $400 \times 200$  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/см<sup>3</sup>.
- Зона развития трещиноватости составляет эллиптическую область ( $60 \times 30$  м по осям эллипса).
- Для воды, заполняющей трещины, приняты плотность  $\rho = 1,0$  г/см<sup>3</sup> 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



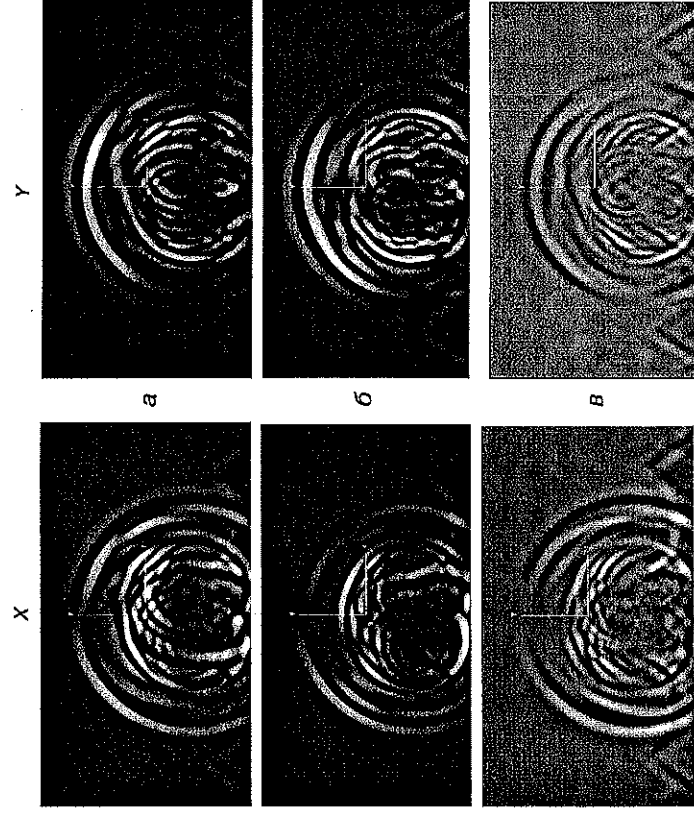
б



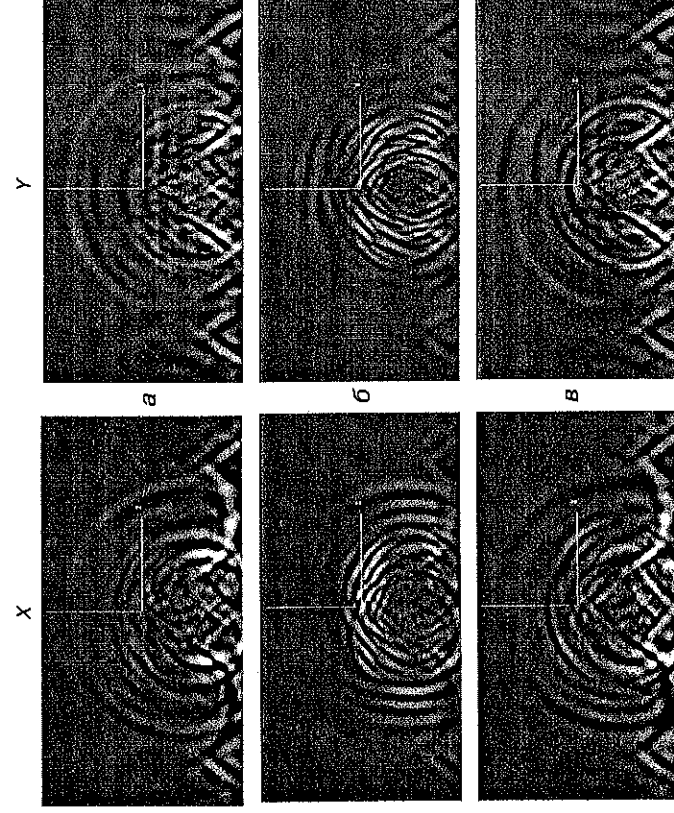
в



**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);

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 соотношение 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.

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

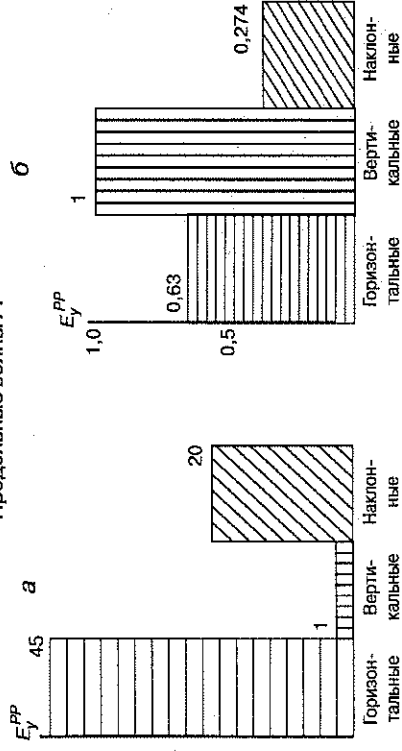
определяющие соотношение энергий продольных волн для рассматриваемых вариантов наклонов трещин и характера их заполнения, приведены на рис. 6, а, б.

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  $PS$

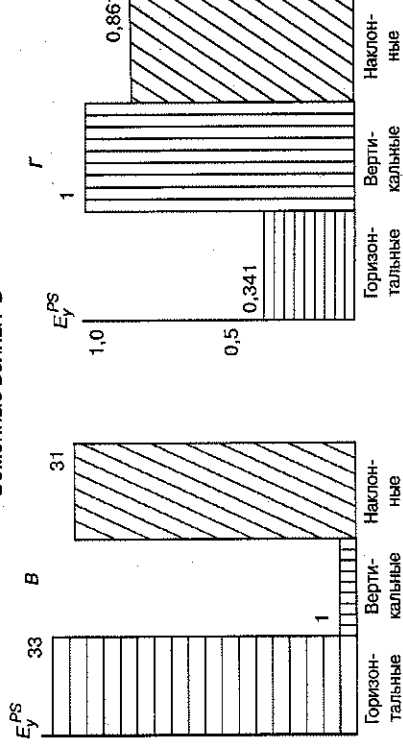


Рис. 6. Осреднённые значения относительных уровней энергии продольных и обменных волн для газо- (а, в) и водонасыщенных (б, г) трещин при их горизонтальной, вертикальной и наклонной направленности

## 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.

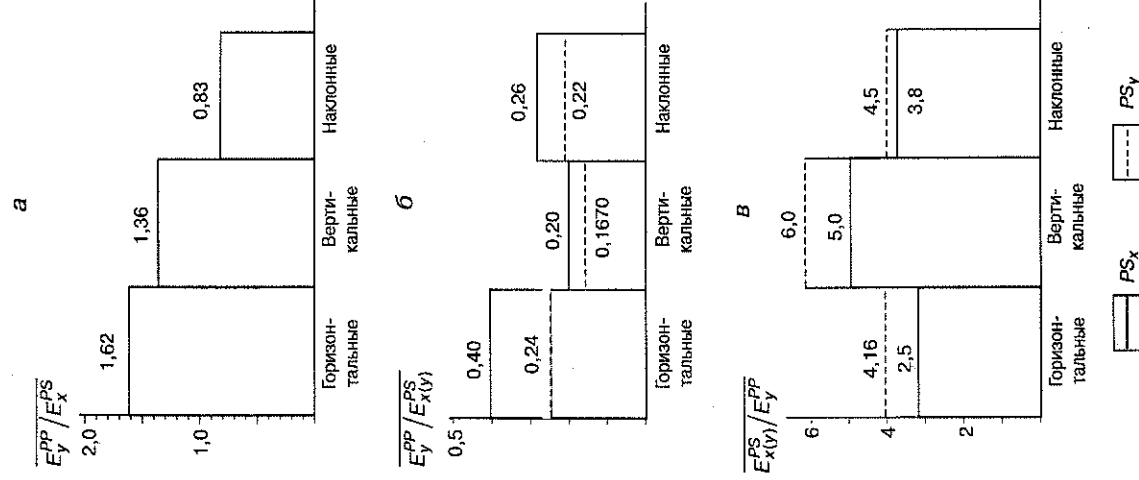


Рис. 7. Отношения энергий продольных (PP) и обменных (PS) волн для газонасыщенных (сухих) трещин (а), для заполненных водой трещин (б) и превышение энергии обменных волн при X- и Y-регистрации над энергией продольных PP-волн при водонасыщении (в)

При газонасыщении в основном доминируют продольные волны. После заполнения водой соотношение резко (в  $5 \pm 1$  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  $5 \pm 1$  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:  $E_y^{PP} \cong E_x^{PS} > E_y^{PS}$ .

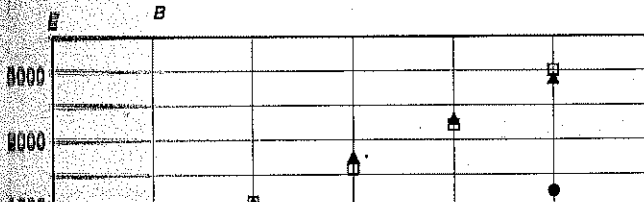
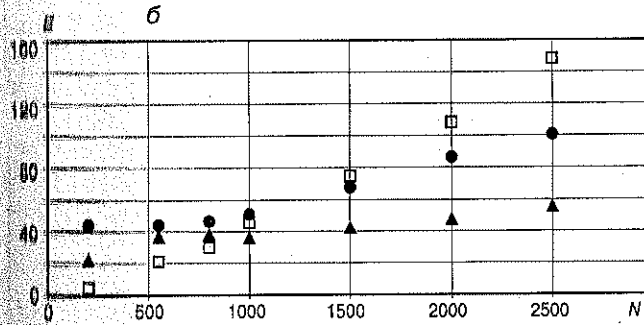
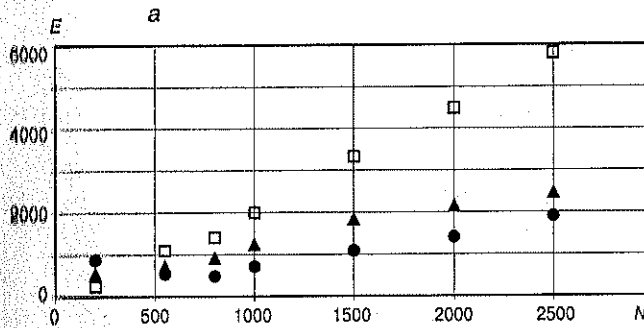
Для наклонных водонасыщенных трещин:

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

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.

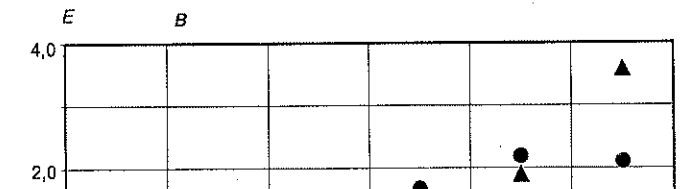
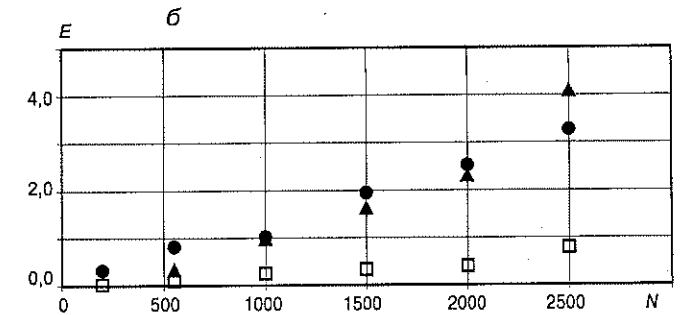
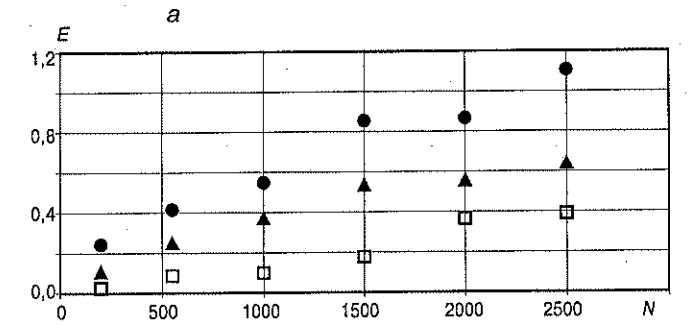




Таблица 2

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 ( $N$ ).

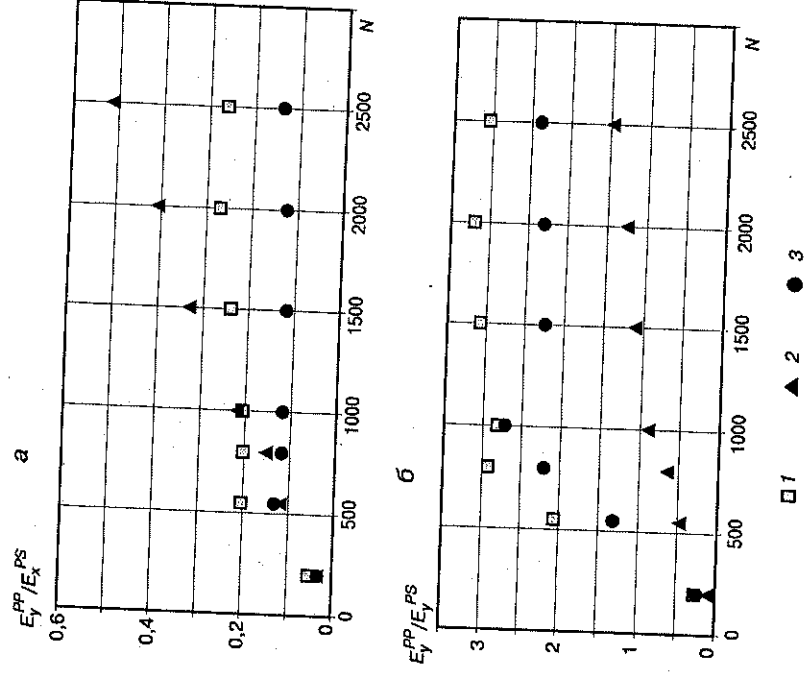


Рис. 10. Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн от плотности (числа) газонасыщенных трещин при горизонтальной (а) и вертикальной (б) регистрации обменных волн: 1 - горизонтальные, 2 - вертикальные, 3 - наклонные

Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн  $E_y^{PP}/E_x^{PS}$  и  $E_y^{PP}/E_y^{PS}$  от плотности, приведенных 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

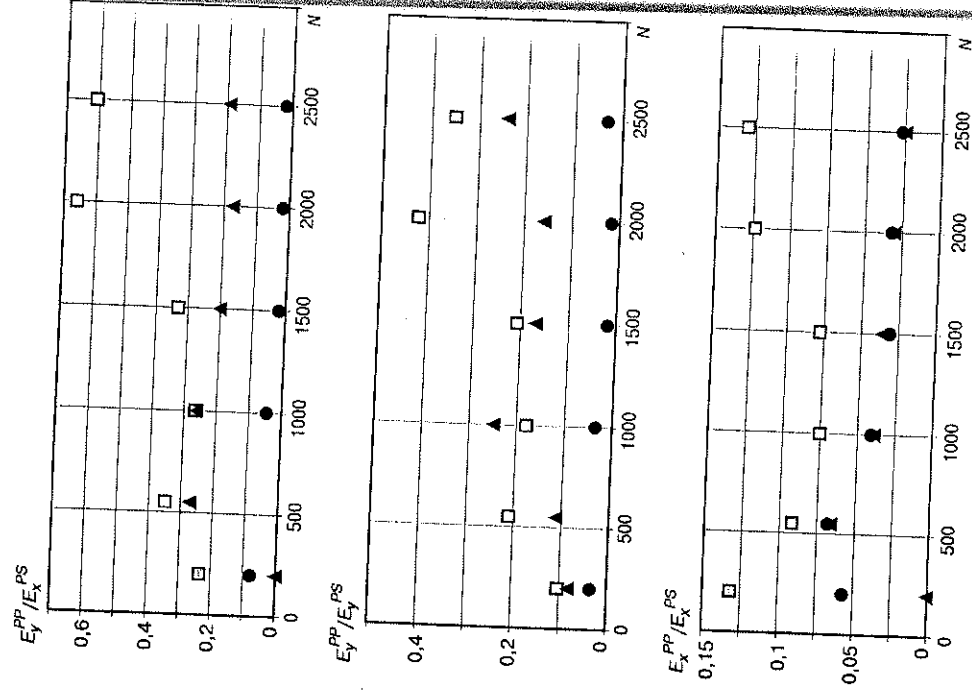


Рис. 11 Зависимости отношений энергий продольных и обменных волн от плотности (числа) заполненных водой трещин при вертикальной (Y) и горизонтальной (X) регистрации:

усл. обозначения см. на рис. 10

