

УДК 519.63

**РАСЧЕТ ВОЛНОВЫХ ОТКЛИКОВ
ОТ СИСТЕМ СУБВЕРТИКАЛЬНЫХ МАКРОТРЕЩИН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА**

© 2013 г. *М.В. Муратов, И.Б. Петров*

Московский физико-технический институт (Государственный университет)
max.muratov@gmail.com

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ГК № 07.514.11.4002.

Целью данной работы является исследование образования и распространения рассеянных волн, формирующих отклик трещинных структур на сейсмограмме. Начальный импульс представляет плоский волновой фронт, распространяющийся вглубь среды. В работе исследуется периодическая структура отклика рассеянной волны от системы (кластера) субвертикальных макротрещин. На основании численных экспериментов эмпирически выводятся способы оценки геометрических параметров подобных трещиноватых структур. В работе используется сеточно-характеристический метод на треугольных расчётных сетках с постановкой граничных условий на поверхности раздела среды и трещин, а также на границах области интегрирования с учетом характеристических свойств системы определяющих уравнений гиперболического типа. Данный численный метод позволяет наиболее корректно строить численные алгоритмы на границах области интегрирования и на поверхностях раздела сред (контактных границах), учитывать область зависимости решения, физику задачи (распространения возмущений по характеристическим направлениям). По этой причине этот метод представляется наиболее подходящим для численного решения динамических задач, имеющих ярко выраженный волновой характер в геологических существенно неоднородных сплошных средах, в частности, для исследуемой задачи взаимодействия сейсмических волн с трещиноватыми структурами.

Ключевые слова: численное моделирование, сейсморазведка, трещиноватые структуры, гиперболические системы уравнений, сеточно-характеристический метод, неструктурированные треугольные сетки.

**SIMULATION OF WAVE RESPONSES
FROM SUBVERTICAL MACROFRACTURE SYSTEMS
USING GRID-CHARACTERISTIC METHOD**

M.V. Muratov, I.B. Petrov

Moscow Institute of Physics and Technologies (State University)

The aim of this paper is formation and propagation of scattered waves analysis. These waves form the response of fracture patterns on seismograms. The initial pulse is a plane wavefront spreading into the medium. The periodic structure of scattered wave response from system (cluster) of subvertical macrofractures is studying in this paper. Basing on numeric simulation the

ways of this fracture patterns geometric characteristics estimation are concluded. The grid-characteristic method with triangular computational mesh is used in the paper. Boundary conditions on surfaces of fractures and on integration domain boundaries take into account the characteristic properties of the determining hyperbolic equations system. This numeric method lets make the numeric algorithms on the integration domain boundaries and the boundaries between different media the most correctly, take into account the physics of the problem. For this reason this method is the most appropriate for numeric solution of dynamic problems with pronounced wave character in heterogeneous media, in particular for analyzing problem of seismic waves interaction with fracture patterns.

Key words: numerical simulation, seismic exploration, fracture patterns, hyperbolic equation systems, grid-characteristic method, non-structured triangular meshes.

1. Введение

В настоящее время сейсморазведка является одним из наиболее надежных методов подготовки пород к глубокому бурению [1]. Проводимые при этом исследования направлены на определение структуры геологических пород, залегающих под дневной поверхностью. В силу сложности и высокой стоимости полевых экспериментов численное моделирование может быть использовано для разработки методик интерпретации данных с сейсмоприёмников.

Проблема расчетов волновых процессов в трещиноватой среде исследовалась в работах [2-8]. Для моделирования волновых откликов от трещиноватых пород применялся традиционный подход с использованием осредненных моделей или моделей с эффективными коэффициентами среды. Для этого необходимо введение некоторых эмпирических коэффициентов [3] или дополнительных гипотез [4]. В данной работе рассмотрена задача определения структуры кластера (совокупности) субвертикальных макротрещин по показаниям сейсмоприёмников, расположенных на дневной поверхности. Проведена оценка характеристик кластера, таких как его вертикальная и горизонтальная протяжённость, а также расстояние между соседними трещинами. Данные параметры могут быть использованы для оценки запасов нефти и газа при выборе методики разработки реальных месторождений.

2. Постановка задачи

2.1. Математическая модель. Сформулируем уравнения, которым, согласно [9, 10], подчиняется состояние бесконечно малого объёма сплошной линейно-упругой среды. Во-первых, это локальное уравнение движения:

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \mathbf{T}^T. \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность среды, $\mathbf{v}$ – скорость смещения, $\mathbf{T}$ – тензор напряжений Коши, ∇ – градиент по пространственным координатам.

Тензор скорости деформации $\dot{\mathbf{e}}$ имеет вид

$$\frac{1}{2}(\nabla \otimes \mathbf{v} + \mathbf{v} \otimes \nabla),$$

где $\otimes$ – оператор тензорного произведения: $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_{ij} = a_i b_j$.

Вторая группа уравнений представляет собой продифференцированный по времени закон Гука:

$$\dot{\mathbf{T}} = \lambda(\dot{\epsilon} : \mathbf{I})\mathbf{I} + 2\mu\dot{\epsilon} \quad (2)$$

или

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2\mu} \left(\dot{\mathbf{T}} - \frac{\lambda}{2K} (\dot{\mathbf{T}} : \mathbf{I})\mathbf{I} \right).$$

В этих соотношениях λ и μ – упругие постоянные Ляме, $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – коэффициент всестороннего сжатия, $\mathbf{I}$ – единичный тензор, «:» – оператор двойного скалярного умножения тензоров:

$$\mathbf{a} : \mathbf{b} = \sum_{ij} a_{ij} b_{ij}.$$

Рассмотрим приведённые нестационарные уравнения теории упругости для случая переменных x_1 и x_2 . Первая строка дает два уравнения движения, вторая – четыре реологических соотношения. Составим вектор искомых функций, также состоящий из 6 компонент $\mathbf{u} = \|v_1, v_2, v_3, T_{11}, T_{22}, T_{33}\|^T$.

Перечисленные модели твердого тела допускают запись системы уравнений динамики деформируемого твердого тела в следующем матричном виде:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_1} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x_2} = 0. \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{A}_i$ – матрицы размера 6×6 , явный вид которых в подвижной системе координат, связанной с деформируемым телом (лагранжева система),

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Данная запись является канонической формой системы уравнений, принятой в вычислительной математике для построения сеточно-характеристических разностных схем. Предполагается, что эта система является гиперболической, то есть матрицы $\mathbf{A}_i$ имеют шесть вещественных собственных значений. Для диапазона параметров задач геофизики, покрывающего почти все практически значимые случаи, это предположение выполняется.

2.2. Граничные условия. В данной работе использовались три типа условий для границы области интегрирования: свободная граница, рассеивание и скольжение. Рассмотрим их подробнее.

Свободная граница. Данное условие означает, что на этой границе отсутствует действие какой-либо силы. Задаётся оно следующим способом:

$$\mathbf{T}\mathbf{u} = \mathbf{0}. \quad (4)$$

Волновой фронт полностью отражается на данном типе границы. Поэтому это граничное условие удобно использовать на верхней границе интегрирования, которая представляет собой дневную поверхность. Также логично задавать это условие на границах пустых трещин.

Рассеивание. Это условие представляет затухание волнового фронта на границе. Этого можно добиться, приравняв инвариант Римана нулю:

$$\mathbf{\Omega}\mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

где $\mathbf{\Omega}$ – матрица из собственных векторов решаемой системы.

Такое условие удобно использовать для границы, в сторону которой распространяется волновой фронт. Таковой в рассматриваемых задачах являлась нижняя граница.

Скольжение. Данное условие означает нулевую скорость в направлении колебаний волны и нулевую силу в перпендикулярном направлении. Для продольной волны эти условия:

$$\mathbf{T}\mathbf{u} = \mathbf{n}(\mp \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} - \rho V_p \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n}, \quad \mathbf{v} \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (6)$$

где V_p – скорость распространения продольной упругой волны в среде.

В рассматриваемых задачах это условие использовалось на боковых границах области интегрирования.

2.3. Начальное состояние. В данной работе начальное состояние было представлено плоской волной, распространяющейся с поверхности вглубь среды. Плоская волна задается в виде сглаженной ступеньки:

$$\mathbf{u}_0(x, y) = \begin{cases} \mathbf{U}_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(y - y_0)\right), & y \in \left[y_0, y_0 + \frac{\lambda}{2}\right], \\ \mathbf{0}, & y \notin \left[y_0, y_0 + \frac{\lambda}{2}\right]. \end{cases} \quad (7)$$

Длина волны начального импульса составляет $\lambda = 40$ м. Амплитуда скорости – $U_0 = 0.05$ м/с. Отсчет начальных координат брался от поверхности: $y_0 = -30$ м.

2.4. Характеристика моделей геологической среды. Вмещающая среда для исследуемых моделей систем макротрещин была принята близкой по механическим характеристикам к карбонатным породам со скоростью продольных волн $V_p = 4300$ м/с, поперечных волн $V_s = 2400$ м/с и плотностью $\rho = 2.4$ г/см³. Рассчитываемая область интегриро-

вания прямоугольной формы имела физические размеры в ширину до 7000 м и в глубину 4000 м. Макротрещины (их центры) располагались на глубине 2000 м, их базовая высота $h=100$ м.

Для решения первой из сформулированных во введении задач – определение состава и характера волнового отклика от системы (кластера) однонаправленных субвертикальных макротрещин – были подготовлены модели двух типов: а) кластер в полупространстве с вышеуказанными параметрами среды для получения отклика от него в чистом виде и б) трехслойная среда с кластером макротрещин во втором слое. Параметры среды в слоях приняты равными:

- в первом слое: $V_p=4300$ м/с, $V_s=2400$ м/с, $\rho=2.4$ г/см³, $h=1100$ м.
- во втором слое: $V_p=4400$ м/с, $V_s=2450$ м/с, $\rho=2.45$ г/см³, $h=1100$ м.
- в третьем слое: $V_p=4500$ м/с, $V_s=2500$ м/с, $\rho=2.45$ г/см³, $h=1600$ м.

Схематически эти модели геологической среды представлены на рис.1.

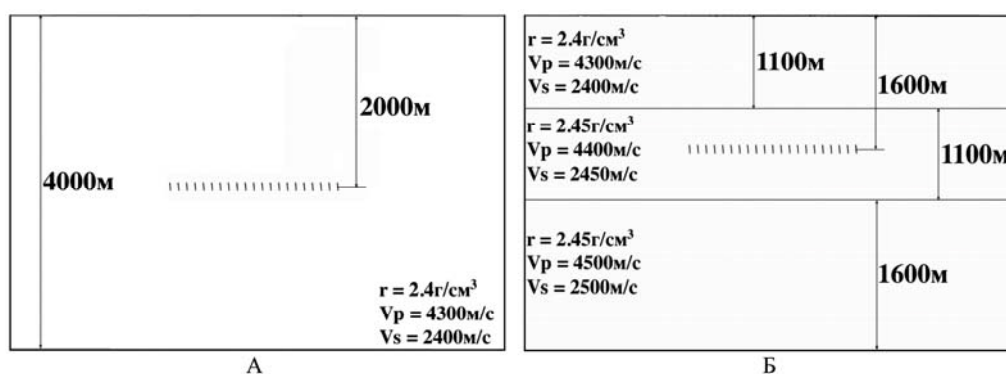


Рис.1. Модели геологической среды для численных расчетов волновых откликов системы макротрещин, А – однослойная среда, Б – трехслойная.

Результаты представлялись в виде серии волновых картин для фиксированных моментов времени и в виде сейсмограмм – записи сигналов на дневной поверхности.

Были определены такие параметры системы трещин, как горизонтальная протяженность L , вертикальная протяженность h и расстояние между трещинами d . Схема расположения трещин представлена на рис.2. Угол наклона трещин мал и равен 5 градусам, L варьировалось в интервале от 1000 м до 3000 м, h – от 50 до 200 м, а d – от 75 до 300 м. Отдельно рассчитывались случаи с газонасыщенными с флюидонасыщенными трещинами.

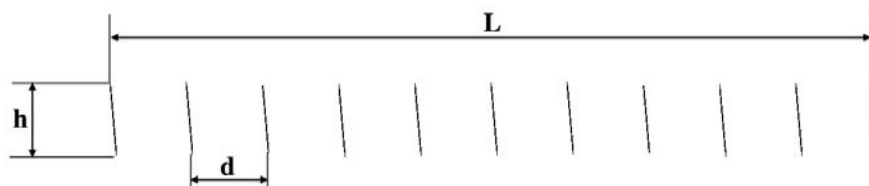


Рис.2. Схема расположения трещин, варьируемые параметры.

3. Численный метод решения задачи

3.1. Сеточно-характеристический метод для численного решения динамических уравнений механики деформируемого твердого тела (расчет параметров во внутренних точках области интегрирования). Используемая система уравнений при замене переменных распадается на N независимых скалярных уравнений переноса (N – количество уравнений в системе):

$$\dot{\mathbf{v}} + \Lambda \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \xi} = 0 \quad (\mathbf{v} \equiv \Omega \mathbf{u}).$$

Одномерные уравнения переноса решаются с помощью метода характеристик [11, 12] (см. рис.5). Из узла m временного слоя $(n+1)$, в котором ищется решение, опускаются характеристики. Из точки пересечения характеристики со слоем $n(n(\tilde{x}))$ соответствующая компонента вектора $\mathbf{v}$ переносится в точку ξ_m^{n+1} :

$$v_i^{n+1}(\xi_m) = v_i^n(\xi_m - \lambda_i \tau).$$

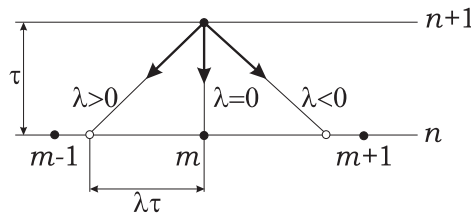


Рис.3. Сеточно-характеристический метод.

Если характеристика не попадает точно в расчетный узел, то решение в точке $\tilde{x}$ ищется с помощью метода интерполяции. Выбор порядка интерполяции на предыдущем слое обуславливает степень аппроксимации сеточно-характеристической разностной схемы. В [11] приводится вывод сеточно-характеристических схем первого и второго порядков аппроксимации.

После того как все компоненты $\mathbf{v}$ перенесены, восстанавливается само решение:

$$\mathbf{u}^{n+1} = \Omega^{-1} \mathbf{v}^{n+1}.$$

Данный численный метод показал пригодность для рассматриваемого класса задач сейсмики в [13-19].

3.2. Расчет искомых функций в точках, принадлежащих контактному границам. Контактная граница – линия внутри области интегрирования, разделяющая две части тела с различными механическими параметрами ρ , λ , μ . Построим численный метод расчета граничных узлов, лежащих на этой линии.

Сеточно-характеристический метод в узле (m, l) на границе области интегрирования даёт для данной двумерной динамической системы уравнений гиперболического типа в частных производных 4 линейных условия, которые можно представить в виде

$$\mathbf{L}_4 \mathbf{u}_{ml}^{n+1} = \mathbf{g}_4.$$

Здесь $L_4(m, l, \tau, \mathbf{u}^n, \mathbf{r}^n)$ – матрица 6×4 , $\mathbf{g}_4(m, l, \tau, \mathbf{u}^n, \mathbf{r}^n)$ – столбец 1×4 . Для свободной границы граничные условия имеют вид $T_{nn} = 0$, $T_{n\tau} = 0$.

Расчет контактной границы, соответственно, требует решения системы из 12 таких уравнений (4 – верхняя часть контактной границы, 4 – нижняя плюс 4 условия). В данной работе используется условие свободного скольжения:

$$v_n^+ = v_n^-, \quad T_{nn}^+ = T_{nn}^-, \quad T_{n\tau}^+ = T_{n\tau}^- = 0.$$

Здесь переменные со знаками плюс и минус соответствуют характеристикам материала на разных сторонах контактной границы; $\mathbf{n}$ – нормаль к поверхности границы; $T_{nn}^\pm$, $T_{n\tau}^\pm$ – нормальные и касательные составляющие напряжения, $v_n^\pm$ – нормальные скорости к контактной границе. Данное условие использовалось в модели бесконечно тонкой флюидонасыщенной трещины, узлы которой содержат двойные наборы искомых сеточных величин, поскольку значения скоростей и напряжений в общем случае не совпадают на разных границах трещины. В случае газонасыщенной трещины ставятся 4 условия, соответствующие свободной контактной границе:

$$T_{nn}^\pm = T_{n\tau}^\pm = 0.$$

3.3. Расчетная сетка. В качестве расчетной сетки используется треугольная неструктурированная сетка (рис.4). Это позволило сделать расчетный модуль универсальным при задании сложных конфигураций слоев и границ.

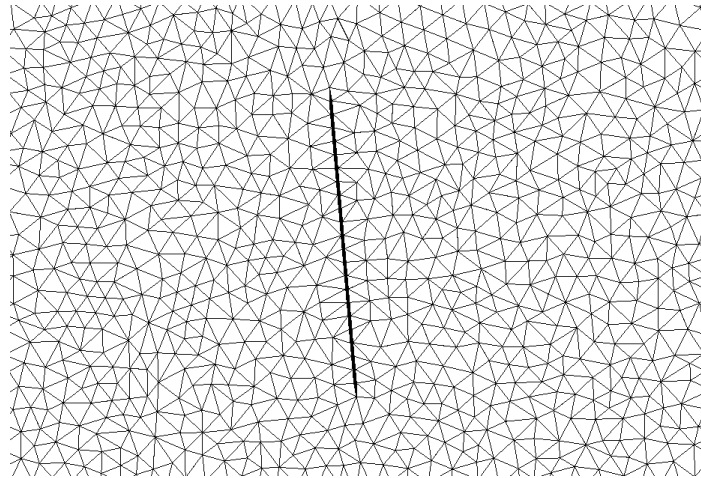


Рис.4. Пример расчетной сетки.

4. Результаты численного моделирования

4.1. Численное исследование образования волнового отклика трещинных структур. На рис.5 изображен процесс образования отклика одиночной газонасыщенной трещины [20]. На рисунке (а) плоский волновой фронт проходит верхний конец трещины, на нем происходит отражение и образуется сферическая волна (в геологии такую

волну называют дифрагированной). Видны ее продольная и обменная составляющие. На рисунке (b) начинают образовываться отраженные от стенок трещины волны. Рисунок (c) представляет полную картину отклика, на нем 1, 2 – продольная и обменная волны, образованные в результате отражения от конца трещины, 3, 4 – продольная и обменная отраженные от стенки трещины волны.

Аналогично газонасыщенным трещинам на рис.6 представлены двумерные волновые картины образования отклика для флюидонасыщенных трещин. В этом случае продольные отклики менее заметные и основные представления получаются из обменной части отклика.

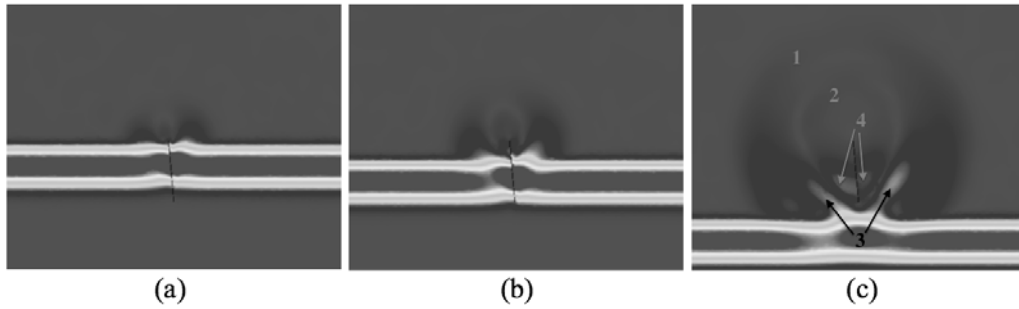


Рис.5. Образование отклика газонасыщенной трещины.

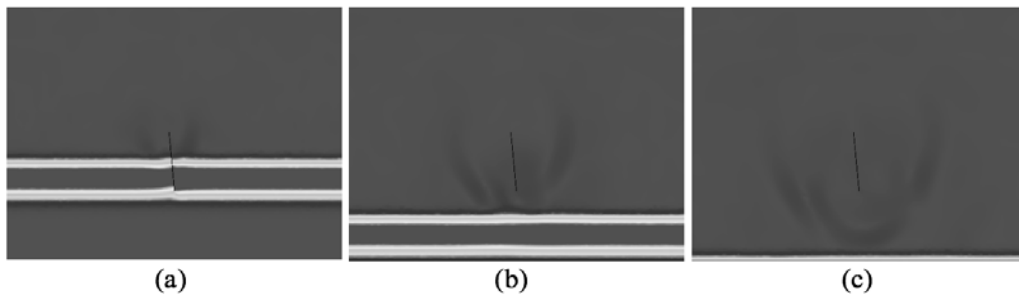


Рис.6. Образование отклика флюидонасыщенной трещины.

Рассмотрим взаимное влияние трещин на отклик. Для этого сначала исследуем образование отклика системы двух параллельных субвертикальных трещин. Как и в случае с одной трещиной, рассмотрим отдельно газонасыщенные и флюидонасыщенные трещины. На рис.7, 8 видно, что отраженные волны от каждой трещины многократно отражаются на соседней трещине. Таким образом, формируется многократно отраженный на концах трещин отклик, распространяющийся к дневной поверхности. Этот отклик имеет периодическую структуру.

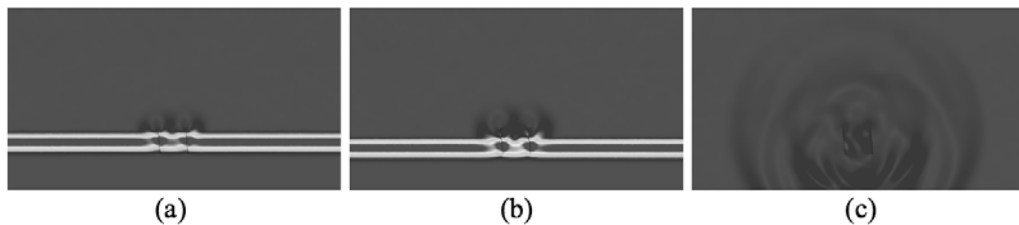


Рис.7. Образование отклика на системе двух газонасыщенных трещин.

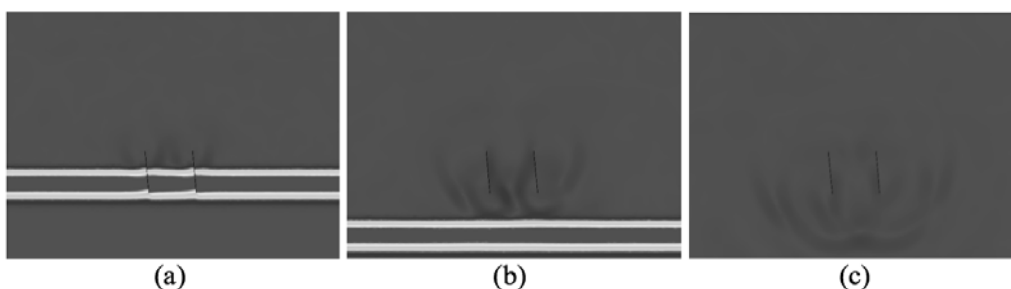


Рис.8. Образование отклика на системе двух флюидонасыщенных трещин.

В случае большего числа трещин в системе наблюдается более сложный волновой процесс многократного отражения и дифракции. На рис.9 этот процесс изображен для случая кластера, состоящего из 11 газонасыщенных трещин с расстоянием между ними 100 м, а на рис.10 представлен аналогичный расчет для флюидонасыщенных трещин. Видно, что в случае газонасыщенных трещин решающую роль в выявлении кластера играют продольные волны, а в случае флюидонасыщенных – поперечные (обменные). Но в обоих случаях эти волны имеют периодический характер. Период таких волн, очевидно, зависит от числа трещин и расстояния между ними.

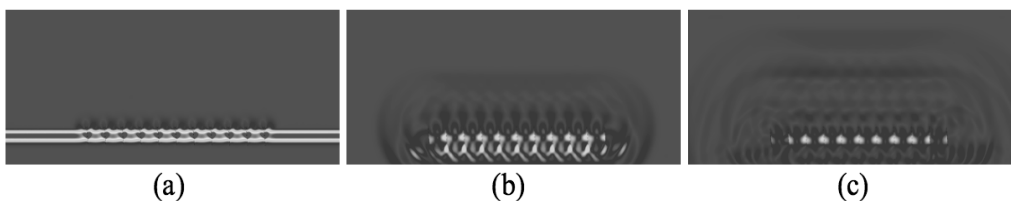


Рис.9. Образование отклика на кластере газонасыщенных трещин.

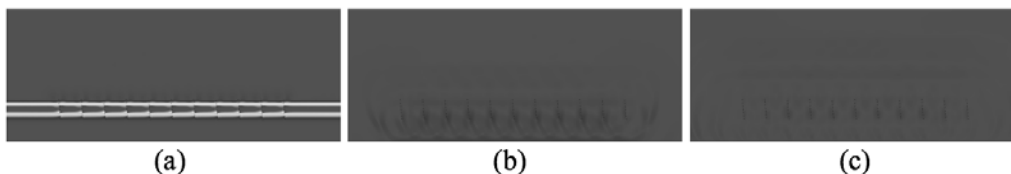


Рис.10. Образование отклика на кластере флюидонасыщенных трещин.

4.2. Зависимость отклика от величины горизонтальной протяженности кластера. Было проведено численное моделирование образования отклика от кластеров с различными значениями горизонтальной протяженности L в интервале от 1000 м до 3000 м. Вертикальная протяженность бралась равной $h=100$ м, а расстояние между трещинами – $d=100$ м. На рис.11 представлены результаты такого расчета в виде сейсмограмм для $L=2000$ м для случая газонасыщенных трещин, а на рис.12 – для флюидонасыщенных. На этих сейсмограммах также отмечено положение самой системы трещин. Видно, что волновой фронт отклика состоит из плоской многофазной части посередине и сферических волн по бокам. Оказалось, что горизонтальная протяженность приблизительно равна ширине плоской части фронта. Погрешность ее определения увеличивается вместе с глубиной залегания и для практически важной глубины 2000 м, исследованной в данной работе, равна 10-15%.

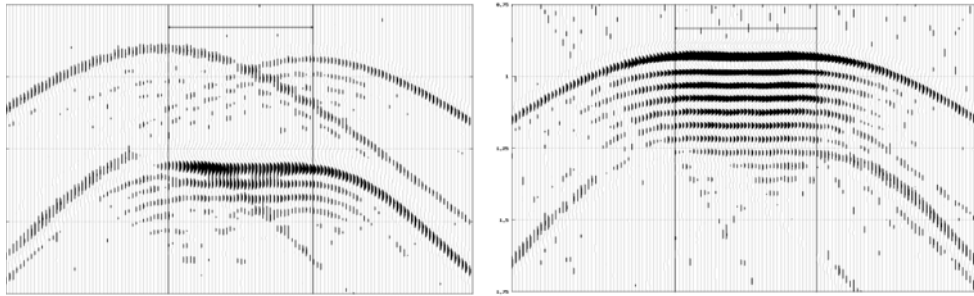


Рис.11. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $L = 2000\text{м}$.

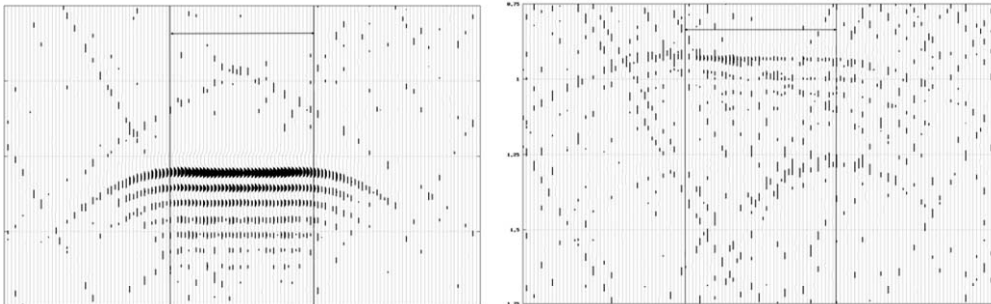


Рис.12. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $L = 2000\text{м}$.

4.3. Зависимость отклика от величины вертикальной протяженности кластера. Моделирование волнового отклика кластера трещин при различных значениях вертикальной протяженности структуры h в интервале от 50 м до 200 м показало зависимость периода сферической волны, распространяющейся от краев кластера от данного параметра. Некоторые результаты этих численных экспериментов для случая газонасыщенных трещин представлены на рис.13–15. Также видно, что при больших h пропадает многофазность плоской части фронта, так как период волнового отклика становится сравнимым с временем затухания многофазного фронта. На рис.16 изображен график зависимости периода волны отклика от высоты кластера. Видно, что зависимость можно считать линейной на рассматриваемом интервале высот. Наклон графика зависит от глубины залегания трещин, а также от упругих характеристик вмещающей среды.

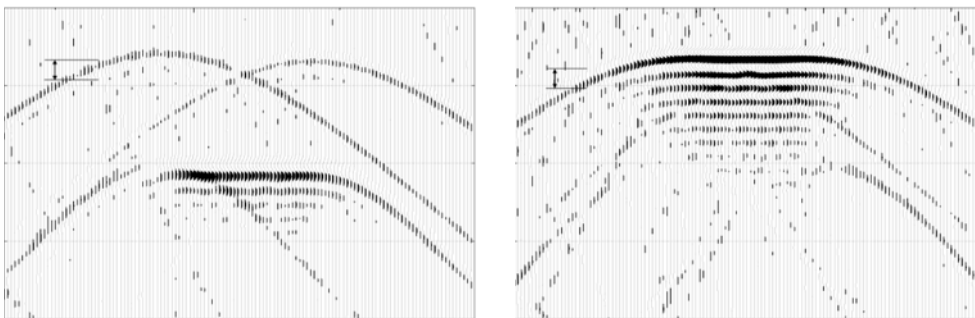


Рис.13. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $h = 50\text{ м}$.

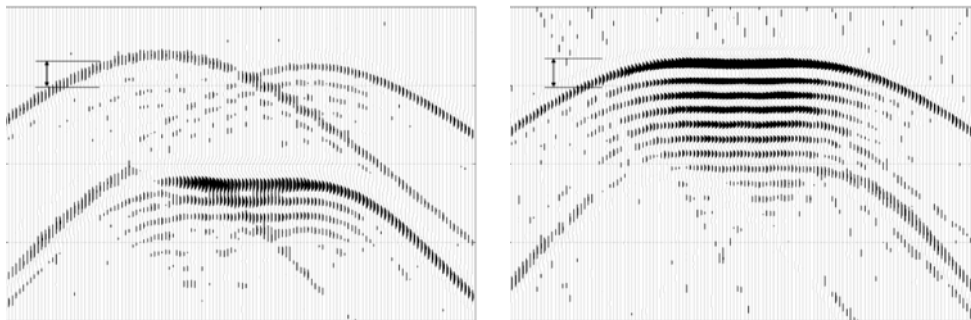


Рис.14. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $h = 100$ м.

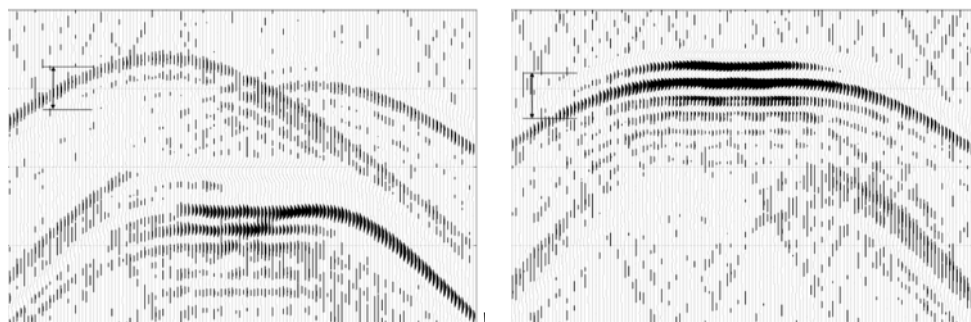


Рис.15. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $h = 200$ м.

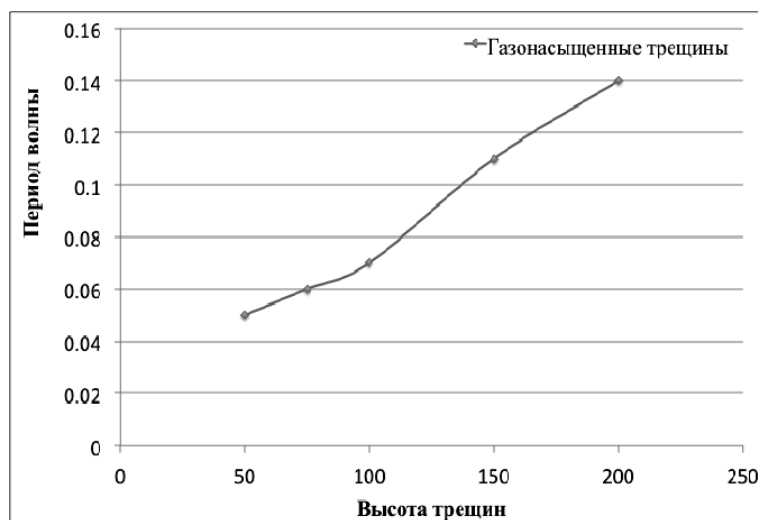


Рис.16. График зависимости периода волны по бокам отклика от высоты трещин кластера.

Аналогичные результаты в виде сейсмограмм для случая флюидонасыщенных трещин представлены на рис.17–19. На рис.20 изображен график зависимости на основании этих расчетов.

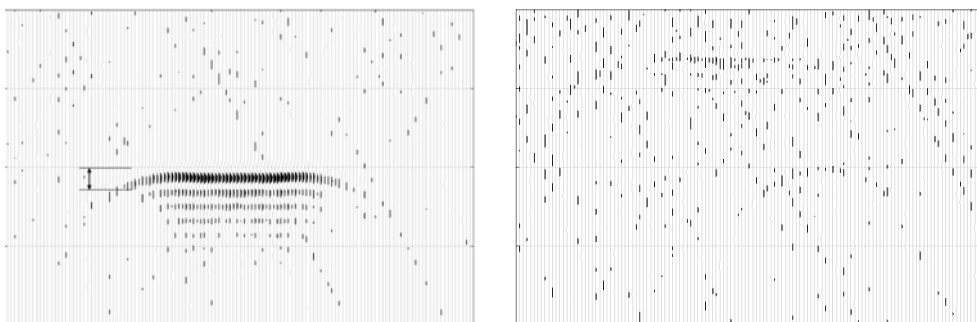


Рис.17. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая флюидонасыщенных трещин при $h = 50$ м.

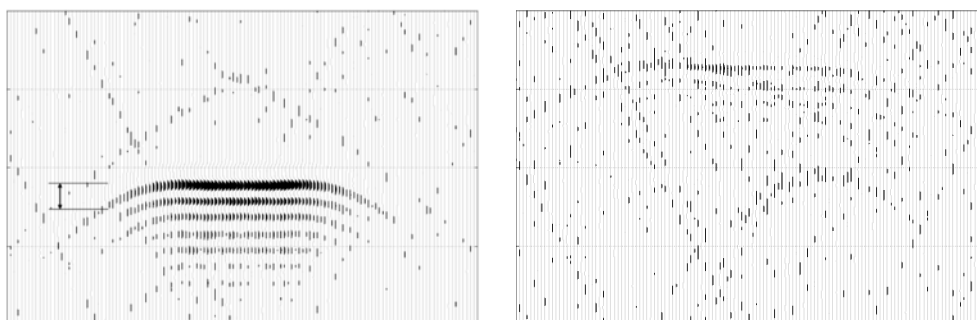


Рис.18. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая флюидонасыщенных трещин при $h = 100$ м.

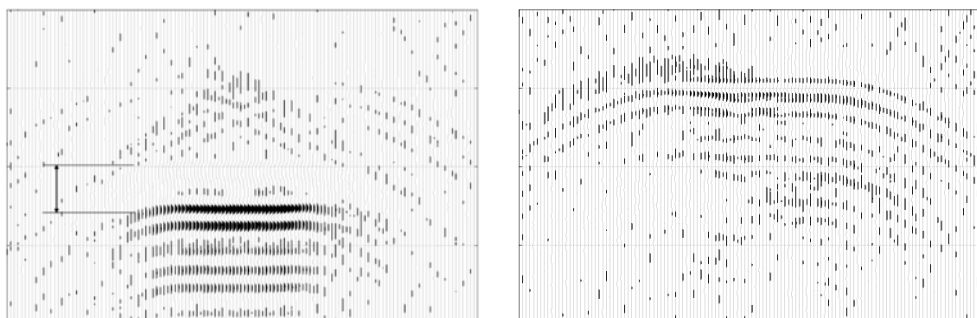


Рис.19. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая флюидонасыщенных трещин при $h = 200$ м.

4.4. Зависимость отклика от расстояния между трещинами системы. Как было сказано в разделе 4.1, значения периодов многофазности плоской части фронта отклика кластера трещин зависят от расстояния между трещинами. Были проведены расчеты образования отклика при разном расстоянии между трещинами d в интервале от 75 м до 300 м и установлена зависимость периода многофазности от межтрещинного расстояния. На рис.21, 22 представлены некоторые результаты этих расчетов для случаев газонасыщенных трещин в виде сейсмограмм.

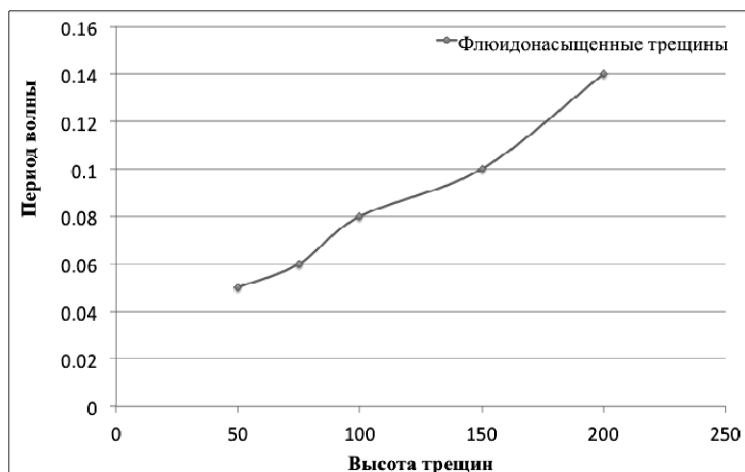


Рис.20. График зависимости периода волны по бокам отклика от высоты трещин кластера.

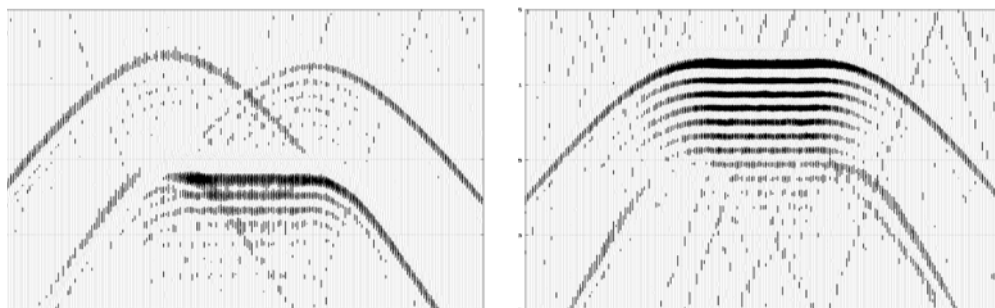


Рис.21. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $d = 100$ м.

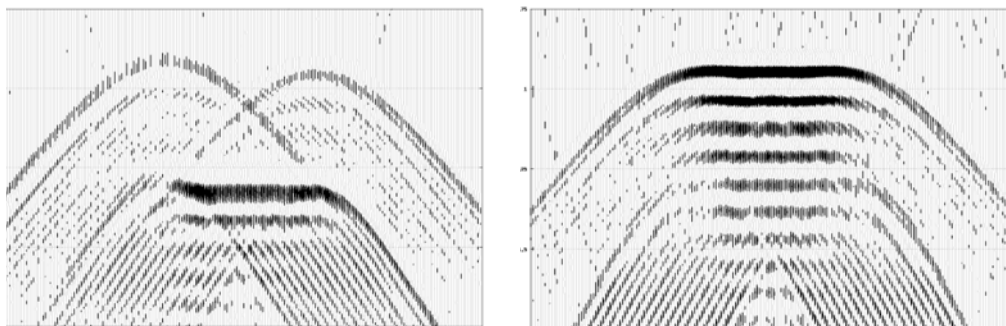


Рис.22. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $d = 200$ м.

На основании полученных с помощью математического моделирования результатов построен график зависимости периода плоского многофазного фронта отклика от расстояния между трещинами, представленный на рис.23. Видно, что зависимость можно считать линейной в исследуемых интервалах значений d . Наклон графика, как и в случае зависимости для высоты трещин, зависит от глубины залегания и свойств вмещающей среды.

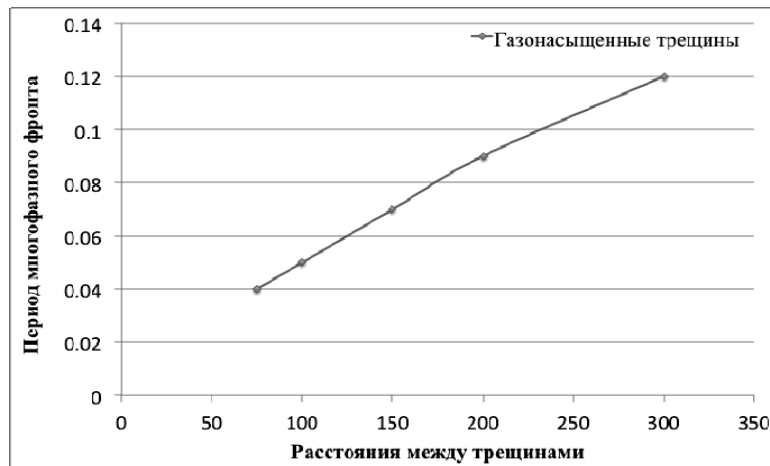


Рис.23. График зависимости периода многофазного фронта отклика от расстояния между трещинами.

Аналогичные результаты для случая флюидонасыщенных трещин представлены на рис.24, 25, 26. Здесь видна зависимость исследуемого параметра системы трещин от периода многофазного фронта обменной волны.

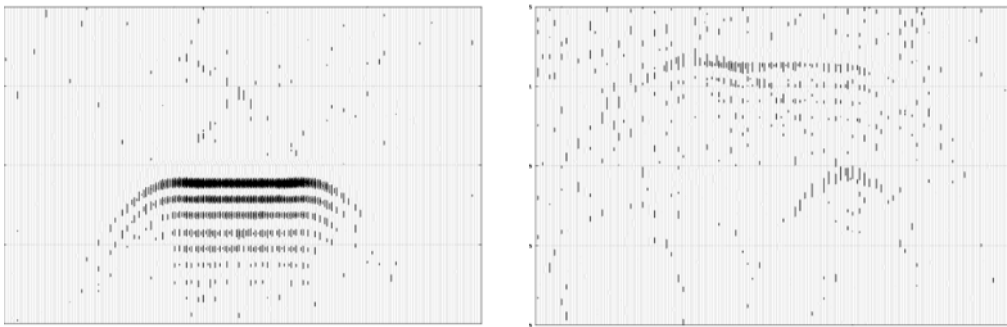


Рис.24. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая флюидонасыщенных трещин при $d = 100\text{м}$.

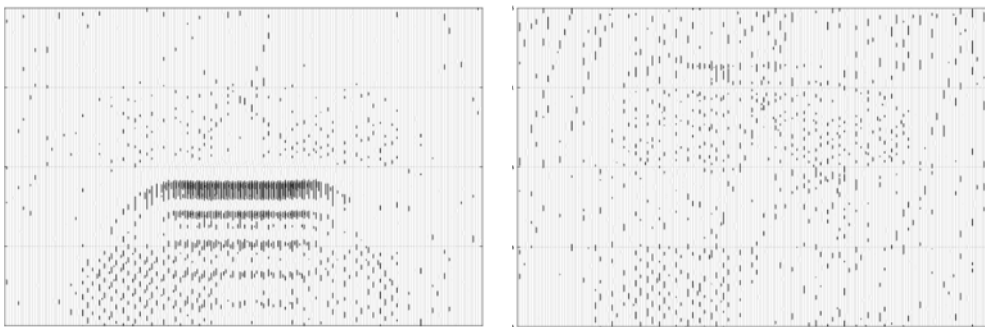


Рис.25. Сейсмограммы для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) компонент скорости для случая газонасыщенных трещин при $d = 200\text{м}$.

Также как и для случая газонасыщенных трещин, был построен график этой зависимости. В изучаемом интервале d он также линеен.

Таким образом, при увеличении расстояния между трещинами, период многофазной плоской части фронта увеличивается. При определенном значении d волны не успевают многократно дифрагироваться на трещинах кластера, так как затухают прежде, чем пройдут требуемое расстояние до трещин, тогда многофазная структура этой части отклика пропадает.

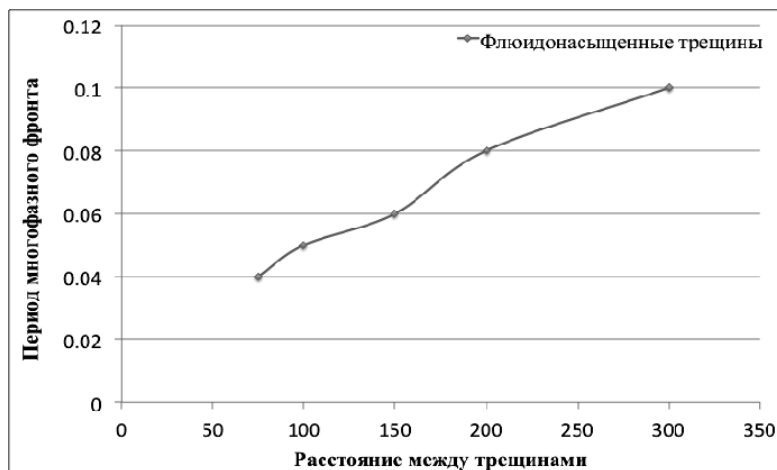


Рис.26. График зависимости периода многофазного фронта отклика от расстояния между трещинами.

Важным свойством используемой для исследования волновых процессов в существенно гетерогенных геологических сплошных средах разностной схемы является ее монотонность, поскольку в расчетах не должны появляться нефизичные немонотонности, искажающие изучаемые волновые явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка – М.: Мир, 1987.
2. Biot M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // J. Apple Physics, 1962, v.33, №4, p.1482-1498.
3. Агаханов С.Н., Квасов И.Е., Панкратов С.А. Численное исследование осредненных моделей неоднородных сред в задачах геофизики сеточно-характеристическим методом // Сборник научных трудов «Информационные технологии: модели и методы». – М.: МФТИ, 2010, с.12-21.
4. Hsu C.J., Schoenberg M. Elastic waves through a simulated fractured medium // Geophysics, 1993, v.58, №7, p.964-977.
5. Willis M.E. et al. Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered seismic energy // Geophysics, 2006, v.71, №5, p.43–51.
6. Молотков Л.А., Бакулин А.В. Эффективная модель слоистой упруго-пористой среды // ДАН, 2000, т.372, №1, с.108-112.
7. Kozlov E.A. Pressure-dependent seismic response of fractured rock // Geophysics, 1969, p.885-897.
8. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics, 1986, v.51, p.1954-1966.
9. Кондауров В.И., Фортков В.Е. Основы термомеханики конденсированной среды. – М.: МФТИ, 2002.

10. Новацкий В.К. Теория упругости. – М.: Мир, 1975, 872 с.
11. Магомедов К.М., Холодов А.С. О построении разностных схем для уравнений гиперболического типа на основе характеристических соотношений // Ж. вычислительной математики и математической физики, 1984, т.24, №5, с.722-739.
12. Левянт В.Б., Петров И.Б., Квасов И.Е. Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов // Технологии сейсморазведки, 2011, №4, с.4–29.
13. Левянт В.Б., Петров И.Б., Челноков Ф.Б. Кластерная природа сейсмической энергии, рассеянной от зоны диффузной поверхности и трещиноватости в массивных породах // Геофизика, 2005, №6, с.5–19.
14. Левянт В.Б., Панкратов С.А., Петров И.Б. Исследование характеристик продольных и обменных волн обратного отклика от зон трещиноватого коллектора // Технологии сейсморазведки, 2009, №2, с.3–11.
15. Квасов И.Е., Панкратов С.А., Петров И.Б. Численное моделирование сейсмических откликов в многослойных геологических средах сеточно-характеристическим методом // Математическое моделирование, 2010, т.22, № 9, с.13–21.
16. Квасов И.Е., Панкратов С.А., Петров И.Б. Численное исследование динамических процессов в твердой деформируемой среде с трещиной, инициируемых приповерхностным возмущением, сеточно-характеристическим методом // Мат. моделир., 2010, т.23, №11, с.109–162.
17. Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное моделирование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки с помощью высокопроизводительных ЭВМ // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2012, т.52, №2, с.330–341.
18. Петров И.Б., Холодов А.С. Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1984, т.24, №5, с.722-739.
19. Петров И.Б., Холодов А.С. О регуляризации разрывных численных решений уравнений гиперболического типа // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1984, т.24, №8, с.1172–1188.
20. Петров И.Б., Тормасов А.Г., Холодов А.С. О численном изучении нестационарных процессов в деформируемых средах многослойной структуры // Изв. АН СССР, сер.ИТТ, 1989, №4, с.89–95.

Поступила в редакцию 23.04.2012.