

Определение траекторий разрыва и визуализация модели трещины, возникающей при ГРП

Е. В. Рабинович, П. И. Вайнмастер

В статье рассматривается оригинальный алгоритм определения траекторий распространения трещины, возникающей при обработке продуктивного пласта методом ГРП. Полученные результаты использованы для визуализации пространственной модели зоны трещиноватости.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, трещина, проппант, микроземлетрясения, фильтрация, метод естественного соседа, диаграмма Вороного.

1. Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – один из эффективных и распространенных методов интенсификации добычи нефти при разработке низкопроницаемых зон и пропластков. Суть метода заключается в формировании высокопроводимой трещины в целевом пласте, посредством которой обеспечивается приток добываемого флюида из продуктивной (нефтеносной) части пласта к забою скважины.

Неконтролируемое развитие трещины может привести к обводнению скважины и, как следствие, к убыткам. Для того чтобы снизить этот риск, специалистам по работе с месторождением необходимо знать форму, расположение и размеры трещины, возникшей в процессе гидроразрыва. Параметры трещины также необходимо знать для планирования и дальнейшей разработки месторождения.

Для получения этой информации проводится мониторинг ГРП.

Построение модели зоны трещиноватости продуктивного пласта включает в себя ряд процедур обработки исходных данных и визуализации полученного пространственного объекта. Такая модель позволяет оценить геометрические характеристики и расположение трещин.

В данной работе рассматривается процедура построения траекторий раскрытия трещин и основанная на них визуализация пространственной модели зоны трещиноватости.

2. Постановка задачи

Формирование трещины происходит при нагнетании в скважину жидкости под высоким давлением, значительно превышающим давление разрыва нефтеносного пласта. Считается, что образование трещин сопровождается малыми колебаниями на границах среды – микроземлетрясениями, которые, в свою очередь, излучают акустические волны малой энергии [1]. Для регистрации импульсных источников таких волн служат сейсмоприемники, которые осуществляют сбор и передачу данных на многоканальную сеймостанцию.

Дальнейшая обработка данных рассматривается в рамках оригинального метода наземного микросейсмического мониторинга ГРП [2, 3].

На первом этапе осуществляется предварительная обработка исходных данных. Частотно-временная фильтрация позволяет избавиться от шумов и помех, присутствующих на сейсмограммах, разделить автоколебательные и импульсные сигналы [4]. Затем сейсмограммы подвергаются обработке, в результате которой определяется «облако» источников импульсных сигналов.

Каждый источник представляется в виде узла виртуальной трехмерной сетки, размещенной внутри пласта, и характеризуется следующими параметрами: X , Y – координаты расположения источника; H – глубина расположения источника относительно поверхности земли; A – амплитуда колебания, зафиксированного в источнике; T – момент времени, в который было зафиксировано колебание.

Поскольку набор источников является избыточным (регистрируются колебания многих соседних точек пространства), применяется дополнительная пространственная фильтрация – определение локальных гипоцентров, представляющих точечные события раскрытия трещины [5]. Если исходное количество источников, расположенных в области локации размером 512×512 метров, может составлять тысячи и даже десятки тысяч, то количество локальных гипоцентров, как правило, не превышает нескольких сотен.

Задача, рассматриваемая в данной работе, состоит в определении траекторий распространения трещины на основе набора локальных гипоцентров и визуализации пространственной модели зоны трещиноватости.

3. Метод решения задачи

Известно, что скорость распространения трещин в твердых телах увеличивается вместе с ростом самой зоны трещиноватости [6]. При этом наблюдается переход от устойчивого режима к нестационарному: до некоторого момента траектория раскрытия трещины является гладкой, затем она становится шероховатой и, наконец, приобретает ветвящийся (фрактальный) характер (рис. 1).



Рис. 1. Модель траектории развития трещины

При определении траекторий развития трещин ГРП необходимо учитывать, что распространение трещины начинается от забоя скважины, поскольку именно через забой проникает разрывающая пласт жидкость. Поэтому представляется целесообразным определение траекторий в виде «ветвящихся» линий, распространяющихся в пласте коллектора в различных направлениях от забоя скважины.

В данной работе предлагается использовать оригинальный метод, основанный на выделении трехмерных секторов, расположенных вокруг забоя скважины, и построении траекторий разрыва внутри каждого из них.

Исследуемая область представляется в виде двух цилиндров: внутреннего и внешнего. Внутренний цилиндр ограничивает область вблизи забоя, характеризующуюся высокой плотностью сейсмических событий. Эта область исключается из модели зоны трещиноватости, поскольку представляет собой мощный нелинейный источник сейсмических колебаний (помех для мониторинга ГРП), амплитуда которых в сотни раз превышает амплитуды микроземлетрясений, вызванных раскрытием трещин на удалении от забоя [7]. Внешний цилиндр охватывает гипоцентры, расположенные за пределами призабойной области.

Для пояснения дальнейших действий и упрощения формулировок представлен вид сверху на внутренний и внешний цилиндры (рис. 2). Гипоцентры на рис. 2 представлены красными точками; черная точка в центре – ствол скважины.

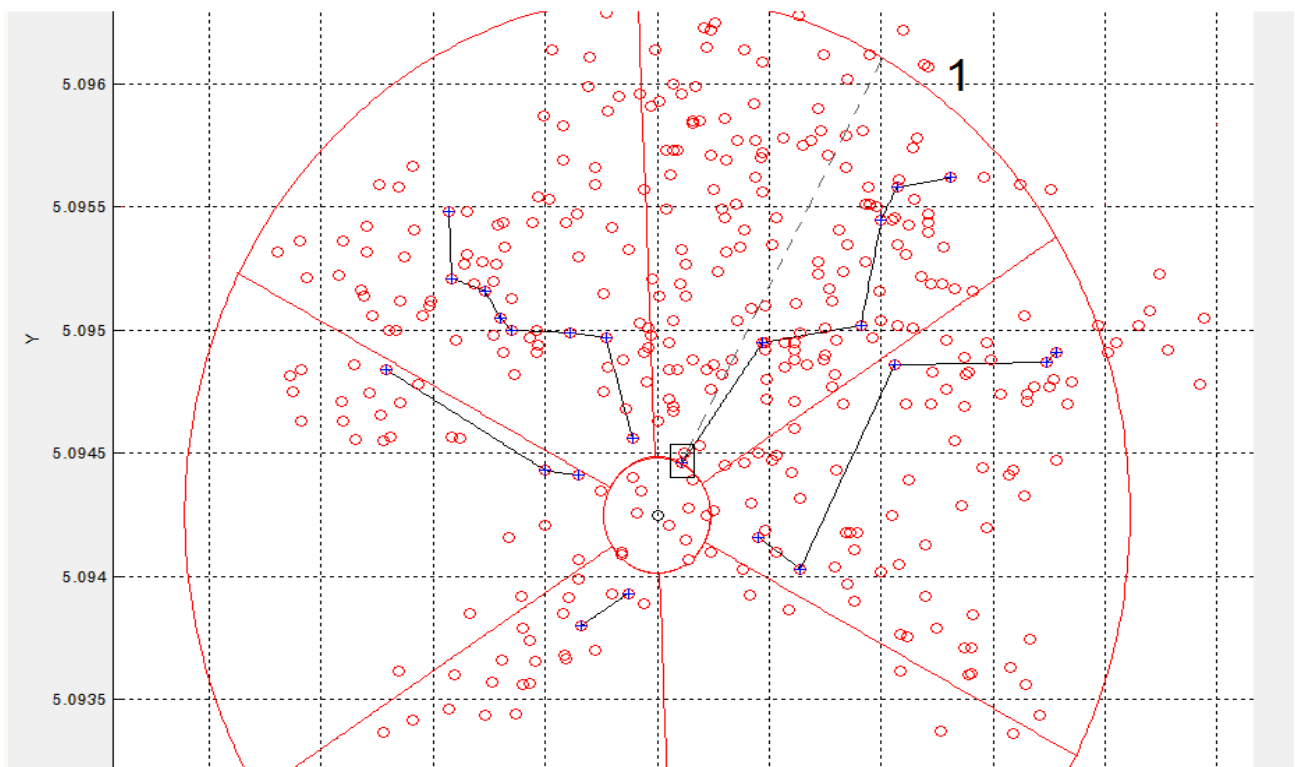


Рис. 2. Направления распространения трещин внутри секторов (вид сверху)

Обработка целевой области начинается с построения первой траектории. Для этого осуществляется поиск «базовой» точки – гипоцентра, находящегося за пределами либо на границе внутреннего цилиндра и имеющего наибольшую амплитуду A . Считается, что высокая амплитуда колебаний фиксируется в момент прорыва породы разрывающей жидкостью (на начальном этапе гидроразрыва). На рис. 2 выбранная «базовая» точка выделена черным прямоугольником.

Прежде чем приступать к расчету первой траектории, следует разделить внешний цилиндр на секторы. Будем считать, что отрезок прямой, проведенный из центра рассматриваемой области (другими словами, от забоя) к «базовой» точке и продленный до границы внешнего цилиндра, образует центральную линию первого сектора. На рис. 2 эта линия проведена серым пунктиром.

Если N – это общее количество секторов, на которые разделяется внешний цилиндр, и все секторы имеют одинаковый размер, то угол между двумя прямыми, ограничивающими любой из секторов, равен:

$$\Phi = 360 / N . \quad (1)$$

Для определения границ первого сектора необходимо отложить влево и вправо прямые, образующие с центральной прямой углы $\Phi/2$ и $-\Phi/2$ соответственно. На рис. 2 первый сектор обозначен соответствующей цифрой. Построение остальных секторов осуществляется по часовой стрелке.

После того как границы секторов обозначены, производится расчет первой траектории разрыва. Начиная с «базовой» точки, осуществляется отбор гипоцентров, отражающих последовательное распространение трещины. При поиске гипоцентров учитывается несколько важных условий. Во-первых, все гипоцентры должны лежать внутри текущего сектора. Во-вторых, каждая следующая точка должна лежать как минимум не ближе к забою, чем предыдущая (известно, что сейсмическая волна не распространяется в обратном направлении) и

быть при этом ближайшей к ней среди всех остальных таких точек. В-третьих, времена появления в гипоцентрах сейсмических событий должны последовательно возрастать. В-четвертых, амплитуда вовлекаемых в построение точек должна превышать заданный порог.

Порог амплитуды Amp определяется следующим образом:

$$Amp = \text{median}(\mathbf{A}) \times \text{coeff}Amp, \quad (2)$$

где $\text{median}()$ – функция вычисления медианы выборки; $\mathbf{A}$ – массив амплитуд всех гипоцентров рассматриваемой области; $\text{coeff}Amp$ – коэффициент завышения, позволяющий регулировать величину порога и, как следствие, количество гипоцентров, вовлекаемых в процедуру поиска. Данный параметр выбирается пользователем алгоритма и отвечает за «строгость» отбора гипоцентров.

Для гипоцентров, выбранных в процессе поиска внутри сектора, сохраняется информация, позволяющая восстановить траекторию раскрытия трещины. Пренебрегая параметром глубины H (толщина трещины составляет несколько миллиметров, в то время как её ширина и длина превышают сотни метров), для точки с координатами x , y рассчитываются следующие характеристики:

1) полярная координата

$$R = \sqrt{(x - \text{well_}x)^2 + (y - \text{well_}y)^2}, \quad (3)$$

где $\text{well_}x$ и $\text{well_}y$ – координаты забоя скважины;

2) угловая координата

$$\psi = \text{atan}(y/x) \times 180/\pi, \quad (4)$$

где $\text{atan}()$ – функция арктангенса;

3) время T появления события в точке.

По достижении внешней границы цилиндра поиск завершается. Выбранные гипоцентры соединяются отрезками, образуя ломаную линию, задающую направление распространения трещины в рамках сектора. На рис. 2 выбранные гипоцентры представлены красными точками с синими крестами внутри.

На завершающем этапе осуществляется восстановление «ветвистой» структуры траектории. Каждый из выбранных на первом этапе гипоцентров представляется новой «базовой» точкой, и процесс поиска рекурсивно повторяется. Таким образом, определяются новые гипоцентры, образующие ответвления от первоначально рассчитанной траектории. Далее операция рекурсивно повторяется для каждого из найденных гипоцентров и т.д. Шаг за шагом реализуется древовидная («ветвистая») структура.

Чтобы избежать включения избыточных гипоцентров, на данном этапе учитывается ещё один параметр – «плотность» гипоцентров. Под «плотностью» понимается параметр, характеризующий количество источников микроземлетрясений, которые были объединены в рассматриваемый гипоцентр на этапе пространственной фильтрации. Этот параметр должен превышать заданную пороговую величину d :

$$d = \text{mean}(\mathbf{D}) \times \text{coeff}D, \quad (5)$$

где $\text{mean}()$ – функция, вычисляющая среднее арифметическое выборки; $\mathbf{D}$ – массив, содержащий характеристики плотности всех гипоцентров; $\text{coeff}D$ – коэффициент завышения, настраиваемый пользователем.

Построение траектории завершается, когда в секторе не останется гипоцентров, не охваченных процедурой рекурсивного поиска. В результате часть гипоцентров оказывается отвергнутой из-за несоответствия критериям поиска, описанным выше.

Таким образом, по итогам работы с каждым сектором мы получаем ветвящуюся траекторию распространения трещины в данном направлении.

На рис. 3 представлены все траектории, обнаруженные в процессе работы алгоритма.

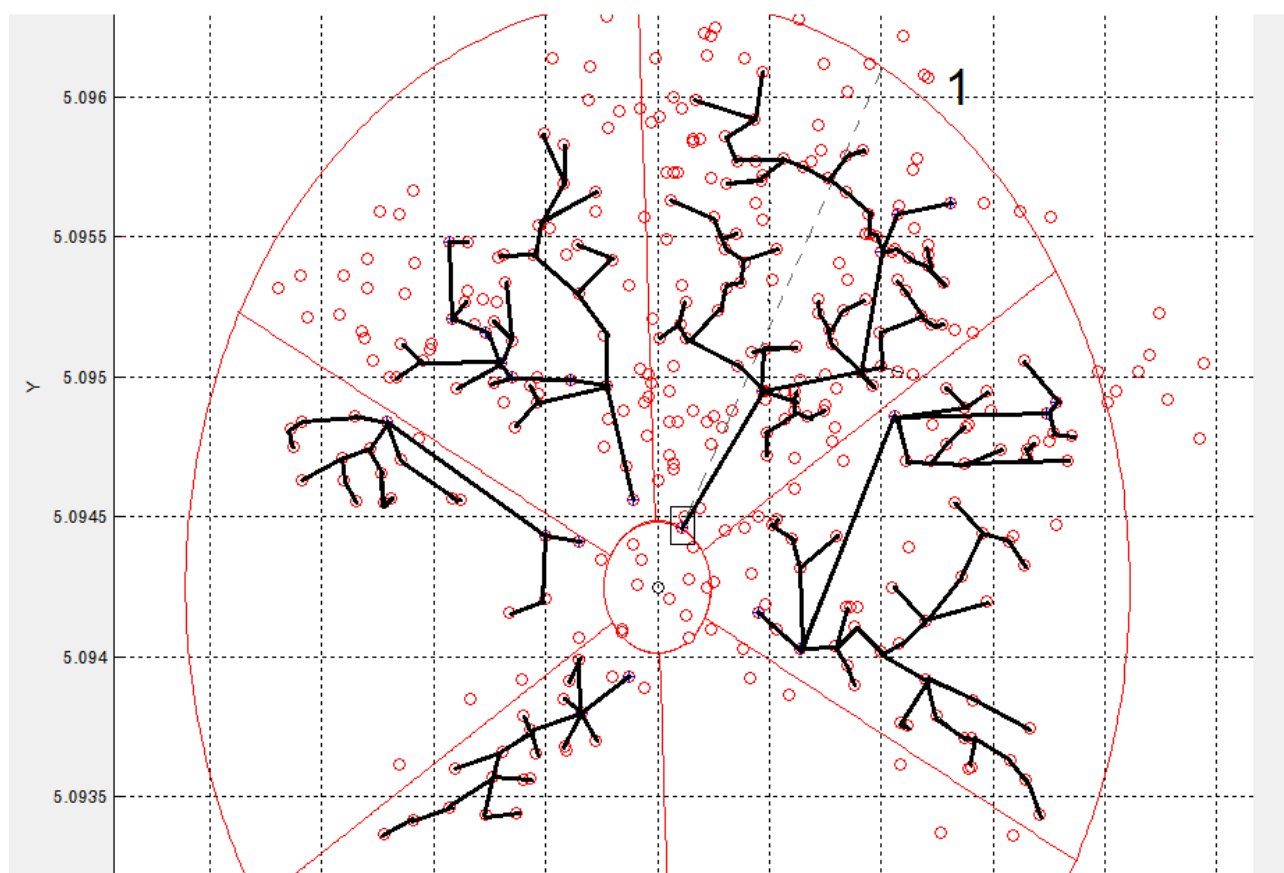


Рис. 3. Траектории раскрытия трещины ГРП (вид сверху)

На основе гипоцентров, вошедших в каждую из построенных траекторий (рис. 3), осуществляется построение пространственной модели зоны трещиноватости.

Каждый гипоцентр представляет собой узел виртуальной трехмерной сетки, нанесенной в области пласта. Для множества выбранных узлов выполняется построение диаграммы Вороного: каждый узел виртуальной сетки сопоставляется с ячейкой, все элементы которой являются более близкими к рассматриваемому узлу, чем к любому другому. На рис. 4 представлен фрагмент такой диаграммы.

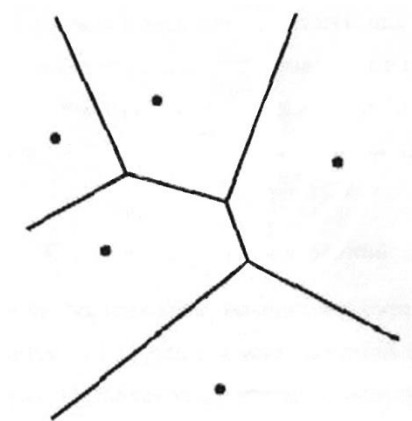


Рис. 4. Фрагмент диаграммы Вороного

Поскольку узлы, содержащие гипоцентры, могут находиться достаточно далеко друг от друга, необходимо заполнить промежутки между ними, выбрав промежуточные узлы (другими словами, осуществив интерполяцию исходных данных) с равномерным шагом. Для реализации этой цели выбран метод ближайшего соседа.

Согласно этому методу значения в промежуточных узлах трехмерной сетки определяются как взвешенное среднее по значениям в ближайших к ним известных узлах:

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^N [\lambda_i(x, y) \times F(x_i, y_i)], \quad (6)$$

где $F(x_i, y_i)$ – значения в ближайших известных узлах сетки; $\lambda_i(x, y)$ – веса узлов, определяемые с помощью диаграммы Вороного. Весом узла является доля площади, которую соответствующая ячейка заимствует у ближайших соседей.

На рис. 5 приведен пример диаграммы Вороного для новой конфигурации: Q – промежуточный (новый) узел виртуальной сетки; белые ячейки соответствуют уже существующим узлам; заштрихованные области – заимствованные фрагменты для новой ячейки.

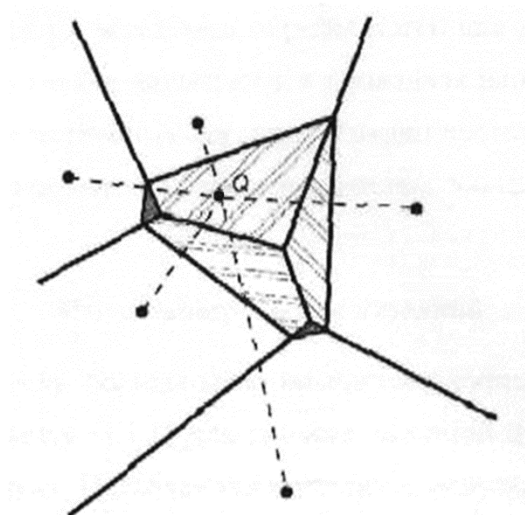


Рис. 5. Пример диаграммы Вороного (Q – узел новой конфигурации)

Диаграмма Вороного имеет тесную связь и взаимоднозначное соответствие с триангуляцией Делоне. Если соединить рёбрами точки, области Вороного которых граничат друг с другом, полученная структура будет являться триангуляцией Делоне. Визуализация такой структуры с помощью средств компьютерной графики образует окончательную пространственную модель зоны трещиноватости.

На рис. 6–8 приведено изображение модели трещины, построенной с помощью описанного алгоритма. В качестве исходных данных использован набор гипоцентров сейсмической активности, найденных в области локации размером 512×512 метров в ходе основного этапа ГРП продолжительностью 40 минут. Яркость элементов поверхности пропорциональна амплитуде колебаний и косвенно отражает толщину трещины. Важно отметить, что толщина трещины составляет несколько миллиметров, в то время как вся зона трещиноватости распространяется на сотни метров в горизонтальной плоскости.

Фрактальные «листья» модели (см. рис. 8) представляют собой участки трещины, построенные в границах выделенных секторов. Черным прямоугольником на рис. 8 обозначено расположение фрагмента, представленного в укрупненном виде на рис. 9.

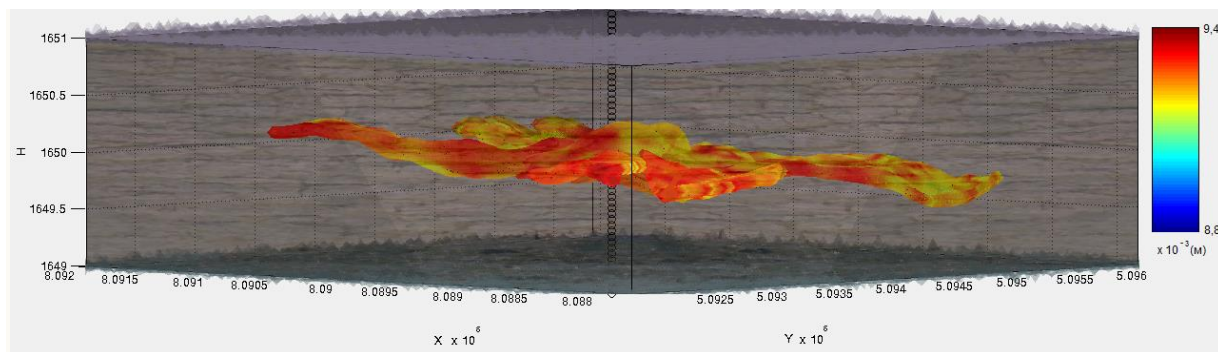


Рис. 6. Модель зоны трещиноватости пласта (3D)

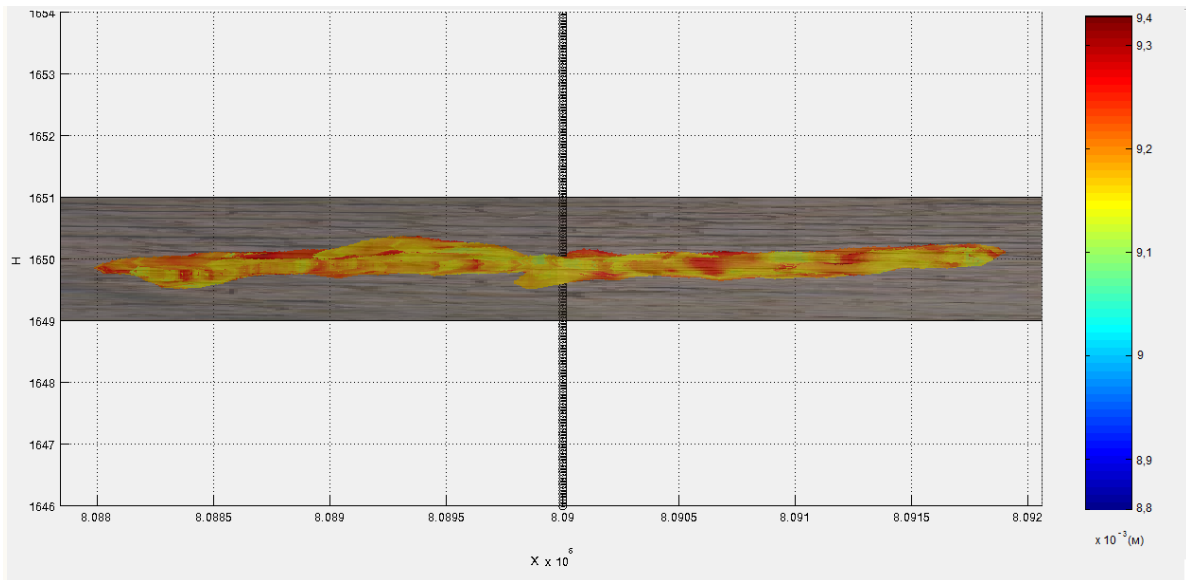


Рис. 7. Модель зоны трещиноватости пласта (вид сбоку)

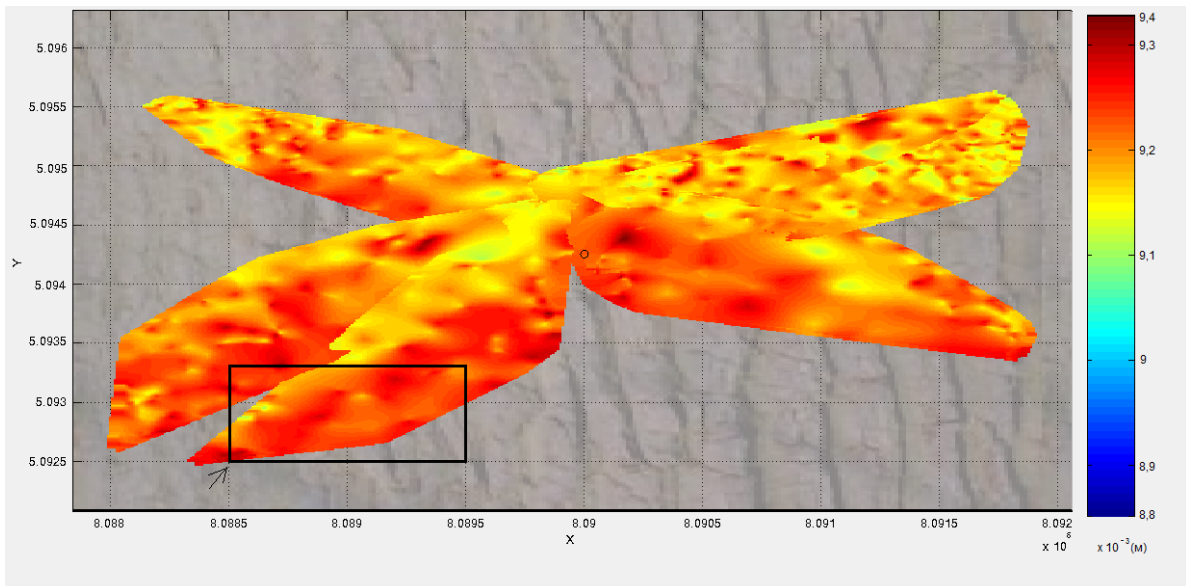


Рис. 8. Модель зоны трещиноватости пласта (вид сверху)

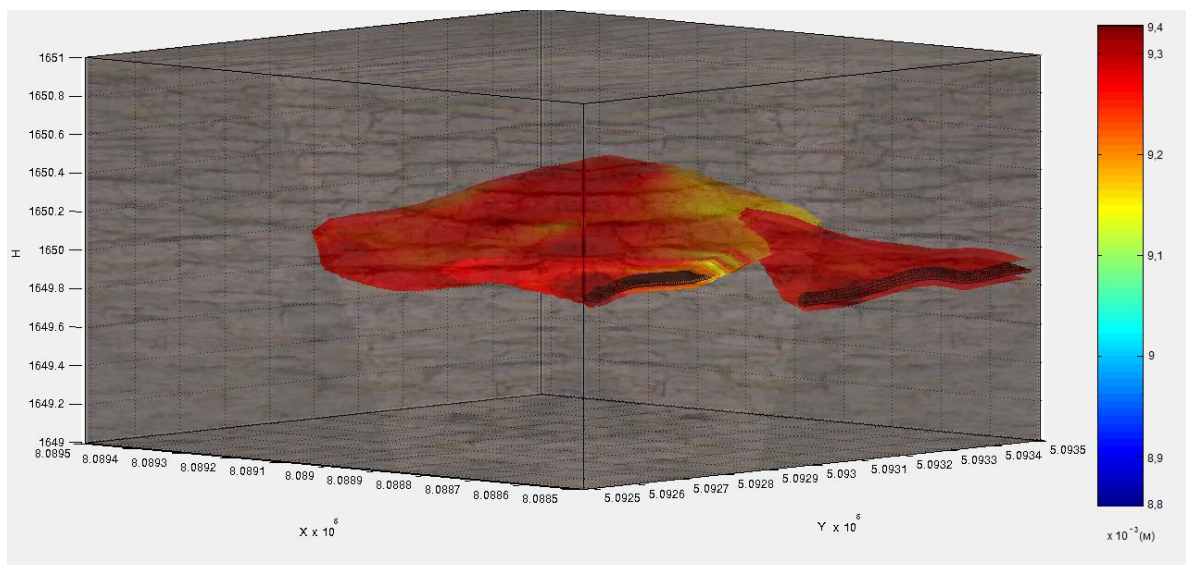


Рис. 9. Фрагмент модели зоны трещиноватости пласта (3D)

Была произведена оценка быстродействия алгоритма в зависимости от настраиваемых пользователем коэффициентов $coeffAmp$ и $coeffD$. Зависимость времени вычислений от указанных коэффициентов оказалась близкой к линейной (см. пример для $coeffD$ на рис. 10).

Рекомендуемое значение параметров – в интервале (1.45; 1.65). Предельное (наименьшее) рекомендуемое значение – 1.45 (при меньшем значении наблюдаются избыточные гипоцентры с малыми энергетическими характеристиками).

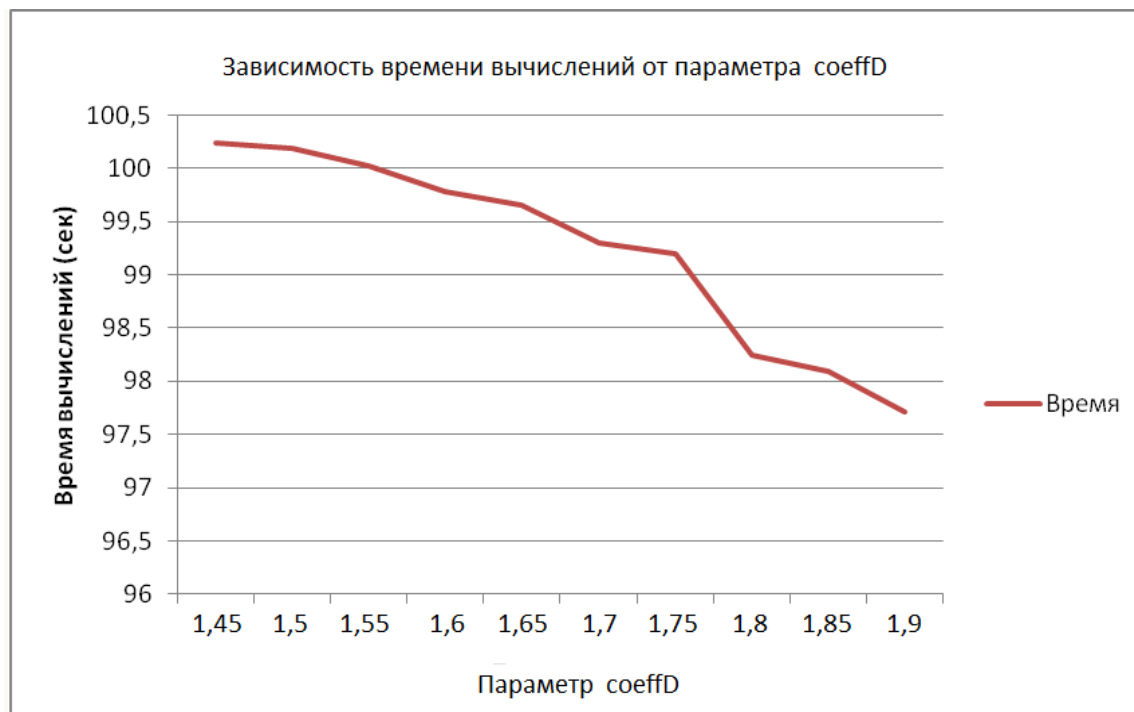


Рис. 10. Зависимость времени вычислений от параметра $coeffD$

4. Заключение

В статье предложен алгоритм определения основных траекторий развития трещин, возникающих при гидравлическом разрыве пласта. Алгоритм основан на поиске локальных гипоцентров источников микроземлетрясений. Особенностью алгоритма является выделение трехмерных секторов и построение фрагментов трещины в каждом из них.

Важными свойствами алгоритма являются гибкость и возможность настройки: пользователь может задать количество секторов, на которые разбивается исходная область, и величины завышающих коэффициентов. Большее количество секторов и низкие пороговые значения позволяют получить лучшую детализацию модели трещины. Однако такой выбор может значительно увеличить время вычислений и вернуть проблему избыточности исходных данных.

В рамках выполненного эксперимента количество секторов варьировалось от 5 до 7: при большем количестве областей наблюдалась значительная фрагментированность итоговой модели, а при меньшем – были пропущены важные геометрические особенности трещины.

Выполнена программная симуляция, подтвердившая достоверность результатов моделирования зоны трещиноватости пласта.

Литература

1. Джон К., Фредериксен Р., Хасбо К. О важности механических свойств горных пород // Нефтегазовое обозрение. 2007. № 3. С. 44–69.
2. Новаковский Ю. Л., Рабинович Е. В., Туркин А. С. Определение размеров закрепленных трещин, образующихся при гидравлическом разрыве пласта // Экспозиция Нефть Газ. 2012. № 4. С. 95–97.
3. Рабинович Е. В., Новаковский А. Ю., Туркин А. С. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУРа. 2012. № 1 (25). Ч. 1. С. 104–112.
4. Рабинович Е. В., Новаковский А. Ю., Туркин А. С. Спектральная фильтрация сейсмических сигналов, возникающих при гидравлическом разрыве пласта // Доклады ТУСУРа. 2013. № 2 (28). С. 175–179.
5. Рабинович Е. В., Вайнмастер П. И., Новаковский Ю. Л. Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта // Автоматика и программная инженерия. [Электронный ресурс] URL: http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=451:-q-q-3&catid=165:-q-q&Itemid=437 (дата обращения: 14.12.2015).
6. Шилова Т. В. Управление средой методом гидроразрыва [Электронный ресурс]. URL: http://www.misd.nsc.ru/about/teaching/educational_resources/file1.docx (дата обращения: 14.12.2015).
7. Наймарк О. Б., Плехов О. А., Уваров С. В. Экспериментальное и теоретическое исследование нелинейной динамики трещины. // Математическое моделирование систем и процессов. 1998. № 6. С. 51–58.

Статья поступила в редакцию 25.01.2016

Рабинович Евгений Владимирович

д.т.н., профессор, профессор кафедры вычислительных систем СибГУТИ и кафедры вычислительной техники НГТУ, тел. +7-952-907-25-64, email: erabinovich1952@gmail.com.

Вайнмастер Павел Иванович

аспирант кафедры вычислительной техники НГТУ, тел. +7-923-140-24-17, email: wmaster91@mail.ru.

Detection of fracture trajectories appearing while hydraulic fracturing

E. Rabinovich, P. Vaynmaster

The article describes an original algorithm of fracture trajectories detection that appears while processing the productive formation using Hydraulic fracturing (HF). The obtained results are used to construct three-dimensional graphical model of the fractured zone.

Keywords: Hydraulic fracturing, fracture, proppant, microearthquakes, filtration, method of the nearest neighbor, Voronoi diagram.