

Моделирование трещинных коллекторов: нерешенные задачи и новые

решения

Fractured reservoirs modelling: a review of the challenges and some recent solutions

Б. Бурбио (B. Bourbiaux), Р. Баске (R. Basquet), Ж. М. Даниель (J.M. Daniel), Л. И. Ху (L.Y. Hu), С. Женни (S. Jenni), А. Ланж (A. Lange) и П. Расолофосаон (P. Rasolofosaon).

Особенности течения жидкости в трещинных коллекторах известны и моделируются уже сравнительно давно (Barenblatt *et al.*, 1960; Warren and Root, 1963), но до недавнего времени для эксплуатационного исследования коллекторов не существовало общепринятых методик и программ учета полевых данных о естественной трещиноватости. Решающую роль в развитии средств такого учета сыграло появление прямой информации о трещинах, в частности – внутрискважинных изображений. Непредсказуемые изменения уровня добычи на многих месторождениях, связанные с недоучетом эффектов трещиноватости, также усиливали потребность лучше характеризовать распределение трещин в разных масштабах и включать важные элементы этой информации в модели месторождений. Не так давно на гигантском месторождении Middle East Carbonate оказалось, что основные пути потока между нагнетательными и добывающими скважинами проходят по зонам трещиноватости и интервалу super-K, не выделяемым по данным сейсморазведки (Cosentino *et al.*, 2001).

Таким образом, современная тенденция в исследованиях трещинных месторождений состоит в интегрировании полной информации о трещинах в процесс моделирования течения жидкости. Далее на примерах моделирования трещиноватости по оригинальной технологии рассмотрены основные черты таких методик (Bourbiaux *et al.*, 2002). Эта технология включает следующие этапы:

- определение строения сети трещин с ограничениями, вводимыми на основе анализа, интерполяции и экстраполяции данных о трещинах, полученных по скважинам и по данным сейсморазведки, а также по обнажениям;
- оценка гидродинамических свойств этой естественной сети трещин по данным о течении жидкости;
- выбор подходящих средств моделирования с учетом роли трещин и разломов разного масштаба и уточнение параметров модели путем калибровки геологической модели по данным о течении
- моделирование особенностей течения жидкости в коллекторе на основе физических представлений о многофазных механизмах перехода жидкости из матрицы породы в трещины

Далее эти шаги рассмотрены и проиллюстрированы на основе представительной модели. Также рассмотрены возникающие методики дальнейшего учета сложного строения трещин и особенностей течения жидкости в трещинных коллекторах.

Построение геологической модели разломов и трещин

Моделирование по предлагаемому методу, описанному в работе (Cacas *et al.*, 2001) и излагаемому далее, начинается с тщательного геологического анализа информации о естественной трещиноватости, известной по скважинам, по данным сейсморазведки и по обнажениям. Общая схема процесса интеграции приведена на рис. 1.

Хотя геологи дают детальную классификацию трещин на основе различных черт тектоники и механизмов напряжения и сдвига, инженерам по эксплуатации приходится игнорировать или объединять участки, имеющие малое или близкое влияние на течение жидкости. На практике это обычно заканчивается разделением на две основных категории: крупных трещин или разломов, видимых в данных сейсморазведки, и мелких или рассеянных трещин, наблюдаемых в скважинах

По результатам такого анализа в разных масштабах, стохастическими методами, с учетом ограничений, налагаемых результатами измерений и общими закономерностями развития трещиноватости, строится модель трещиноватой зоны.

На рис. 2 и 3 показаны типичные, включающие крупные и мелкие трещины, картины разномасштабной сети трещин, полученные по нашим программам моделирования трещиноватости. На рис. 2 показана модель крупных трещин, заметных в данных сейсморазведки, а на рис. 3 – сеть мелких трещин, которую можно построить в любом месте коллектора.

- **Крупные трещины (разломы).** На практике наилучшие данные для построения таких моделей дает трехмерная сейсморазведка. Ее данные сначала используются для выявления разломов, рассматриваемых как «детерминированные» структуры. Кроме того, анализируя

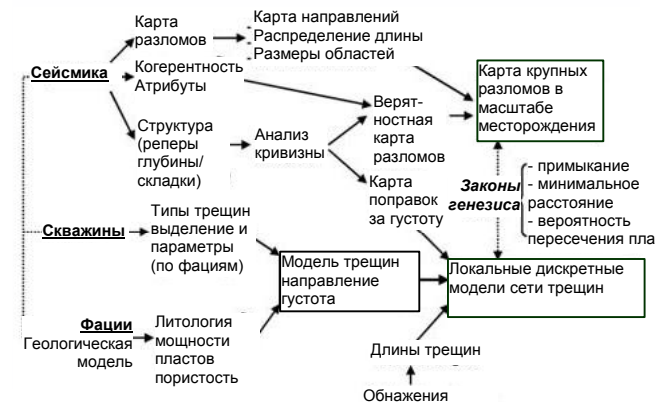


Рис. 1. Геологическое моделирование разномасштабных трещин (разломов и стыков): общая идея

*Institut Francais du Pétrole, 1 & 4 Avenue Bois-Preau, 92852 Reuil Malmaison CEDEX.
E-mail: bernard.bourbiaux@ifp.fr

различные амплитудные сейсмические атрибуты, например когерентность, можно построить карты вероятности наличия более мелких разломов. Такие карты вероятности используются как ограничения при «экстраполяции» в ходе стохастического моделирования сети более мелких трещин. Другие ограничения на модель этого уровня берутся по карте «детерминированных разломов и представляют собой статистические оценки направления и фрактальные параметры их пространственного распределения.

○ *Мелкие трещины.* Важный начальный шаг состоит в анализе и выделении различных типов трещиноватости по изображениям скважин и по керну. Типы выделяются по среднему направлению, связанному с особенностями геологического и/или тектонического строения. Другим параметром классификации является фациальный состав пород. Этот параметр выражает наличие трещиноватости в определенной фации или группе фаций, что связано с ее специфическими механическими свойствами. После выделения типов трещиноватости и фаций с определенной трещиноватостью строятся геологические модели, описывающие распределение параметров трещиноватости – направления и густоты – для каждого типа в каждой фации; в качестве опорной модели используется модель матрицы. В нашем примере сеть рассеянных трещин образована двумя типами систематических разрывов и по трещиноватости в ней выделяется две фации. В одном из типов густота трещин определяется фациальным составом и искривленностью коллектора, а в другом – фациальным составом и расстоянием от разломов. В конце концов, для любого места коллектора на основе параметров модели трещиноватости можно составить модель сети мелких трещин.

Трехмерная сеть трещин, показанная на рис. 2, построена для части пласта размером около 2 км и включает как крупные разломы, выделяемые по данным сейсморазведки, так и мелкие трещины. Заметим, что такие картины можно получить для сложнопостроенных коллекторов с крутыми углами падения и/или сбросами.

С такими программами, располагая достаточными данными по фациальному составу и строению, геолог может предоставить инженеру по эксплуатации близкую к действительности модель трещин и разломов различного масштаба. Но такая дискретная модель сети трещин (ДМСТ; Discrete Fracture Network - DFN – model) не используется непосредственно при моделировании течения жидкости на месторождении; перед этим она будет упрощена с применением процедур гомогенизации, описанных ниже. Поэтому может возникнуть вопрос о ее ценности. На самом деле, как показано в следующем разделе, ДМСТ применяется для оценки гидравлических свойств трещин по имеющимся данным прямым измерениям, например по скважинным испытаниям. Интерпретация этих данных и с использованием ДМСТ дает, по сравнению с обычными способами анализа (например, по анизотропии потока), дополнительную информацию о течении жидкости в коллекторе. Кроме того, в таких моделях сохраняется связь с геологическими представлениями, лежащими в основе модели трещиноватости. Такая связь необходима для оценки влияния типов трещиноватости на течение и для планирования дальнейшего сбора геологических данных, полезных для оценки процессов переноса жидкости.

Нерешенные задачи. Несмотря на достигнутый в последнее время прогресс, все еще остается место для улучшения этих моделей, которые все еще часто плохо обусловлены. Причины этого, в частности, таковы:

- ограниченное количество информации, которую дают немногочисленные скважины, пересекающие сеть трещин
- недостаток информации о трещинах крупных, но еще неразличимых в данных сейсморазведки.
- низкая точность определения свойств трещин, особенно длины, открытости и проводимости

Анализ сейсмической анизотропии – один из самых многообещающих способов определения направления трещин и интенсивности потока между скважинами (Rasolofosaon, 2005). При наличии качественных немигрированных сейсмических данных, опираясь на скважины и применяя современные средства обработки, анизотропию амплитуд можно определить в нескольких точках коллектора. Основное направление сейсмической

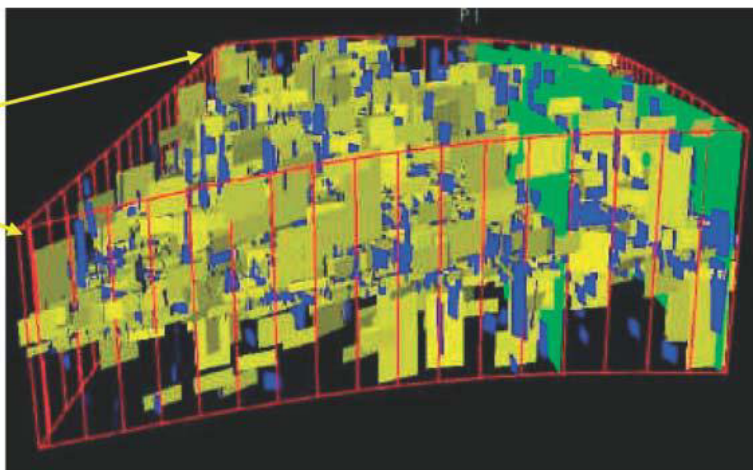
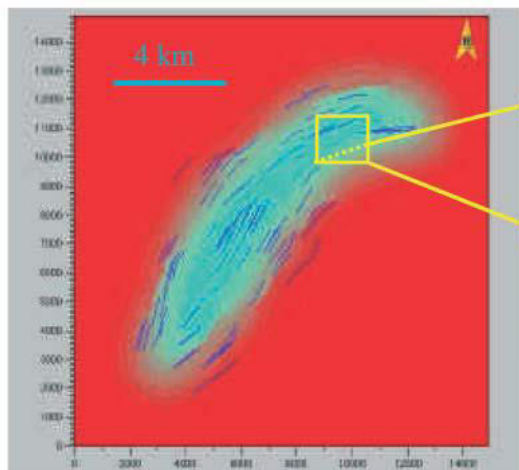


Рис. 2. Сеть разломов, пересекающих коллектор в целом.

Рис. 3. Дискретная модель всей сети трещин при данном положении коллектора: мелкие трещины даны желтым и синим, разломы – зеленым.

анизотропии может быть связано с наличием механических нарушений сплошности породы, что наблюдается при наличии однотипной анизотропной сети открытых трещин. Результаты анализа сейсмической анизотропии обязательно следует сопоставить со скважинной информацией о наличии и направлении трещин в местах, где имеются данные по обоим вопросам, чтобы проверить их соответствии и обеспечить достоверность результатов анализа анизотропии на больших удалениях от скважин. Более того, если сейсмические данные откалибровать по скважинам, степень сейсмической анизотропии может нести информацию о пространственных изменениях густоты трещинной сети. Тем не менее, хотя анализ сейсмической анизотропии становится значимой частью исследования трещиноватости, интерпретация сильно зависит от особенностей конкретного месторождения и является по большей части качественной по ряду причин:

- разрешение сейсмических данных по глубине примерно на два порядка ниже, чем у данных по керну и каротажу скважин, что ведет к неоднозначности в интерпретации сейсмической анизотропии в терминах трещиноватости.
- теоретические модели, увязывающие скорости волн и их амплитуды с геометрическими и/или механическими параметрами трещинной сети еще не сформулированы и/или не параметризованы.

Таким образом, основной проблемой при широком использовании сейсмических данных при исследовании трещиноватости в настоящее время является количественная оценка неточности информации о трещинах, получаемой путем анализа сейсмической анизотропии.

Для дальнейшего уточнения стохастических моделей трещиноватости можно использовать закономерности геомеханики и формирования трещин. Для имитации тектонических процессов применяется физическое моделирование (Daniel, 2004) с регистрацией переходных процессов в реальном времени. Путем моделирования экспериментов на моделях с детальной дискретизацией можно воспроизвести временные и пространственные особенности линейных разрывных структур (линеаментов). Такие эксперименты полезны, в частности, для уточнения ограничений при расчете крупных разломов, не проявляющихся напрямую в сейсмических данных, но связанных с линеаментами.

В заключение следует отметить, что потребности практики эксплуатации коллекторов заставляют продолжать исследования по моделированию трещиноватости и, тем самым, способствуют интеграции материалов по динамике процессов в ранние стадии процесса моделирования трещиноватости. Развитие процесса в этом направлении рассматривается в конце данной работы как обобщение рассмотренных в ней примеров – стадий единого процесса.

Следуя методике, представленной во введении, рассмотрим вопросы оценки гидравлических (геометрических и статических) параметров геологической модели трещиноватой зоны.

Гидравлические характеристики геологической модели трещиноватой зоны

В ходе оценки поведения потока жидкости инженерам по эксплуатации приходится проверять геометрию «статической» модели разломов и трещин, предоставляемой геологами и устанавливать неизвестные параметры, например, проницаемость.

Для этого разработана и запатентована программа моделирования на основе нашей платформы моделирования. В ней можно моделировать статические и динамические

скважинные испытания на основе ДМСТ, построенной геологом, и сравнивать их с результатами полевых измерений (Sarda *et al.*, 2002). Особенности программы являются оптимальная дискретизация ДМСТ, при которой используется минимальное число ячеек, образуемых пересечениями трещин, а также точное моделирование перетоков жидкости между матрицей и трещинами (рис. 4). В каждом узле сети трещин Предусмотрен учет фактического распределения размеров и формы блоков матрицы, поскольку задание соответствия узлов сети трещин определенным блокам матрицы, из которых жидкость может поступать в узел, производится путем особой обработки геологического разреза (изображения). Программа применима и в сильно сжимаемых средах, то есть на трещинных месторождениях газа (Basquet *et al.*, 2004). Кроме того, предусмотрен «двойной механизм проводимости», что позволяет моделировать течение жидкости через матрицу там, где трещин мало или их нет вообще (Lange *et al.*, 2004). Это значит, что с этой программой можно охарактеризовать любой коллектор, пересеченный трещинами или разломами, в том числе – с закрытой трещиноватостью, что встречается довольно часто.

Продолжая рассмотрение нашего модельного примера, проведено моделирование скважинного испытания на скважине, расположенной в трещиноватой зоне в 200 м от разлома, на базе геологически значимой модели (рис. 3), представляющей собой дискретное представление разломов и трещин. Полученный график (рис. 5) показывает последовательность режимов течения жидкости, соответствующих вкладам трещин и матрицы, а также воздействию разлома. Последний устанавливает гидравлическую связь с удаленными частями зоны трещиноватости, а также с границами коллектора. Этот пример иллюстрирует возможности ДМСТ при анализе гидравлических свойств сложно построенных трещинных коллекторов с трещинами различного размера. Аналитические решения, применяемые в обычных методах анализа, не могут учитывать столь сложное строение.

Нерешенные задачи. Оценка течения жидкости по разломам и трещинам на ранних стадиях затруднена, поскольку обычно значительная часть дебета скважины определяется всего несколькими трещинами. Это значит, что сеть проницаемых разломов и трещин будет сильно отличаться от статического геологического изображения той же сети трещин. Таким образом, как показано ниже,

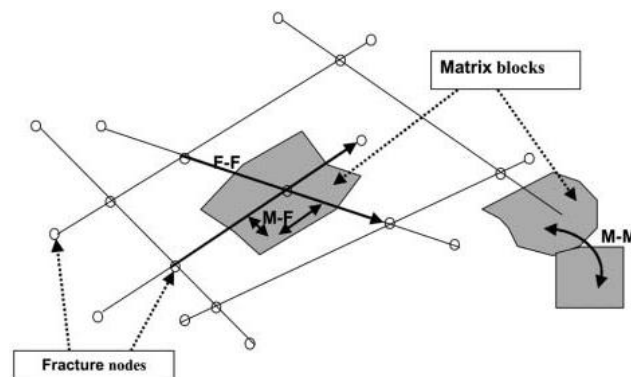


Рис. 4. Разбиение ДМСТ и соответствие блоков матрицы узлам сети трещин.



Рис. 5. Моделирование скважинного испытания на трещинном коллекторе, пересеченном разломами в рамках дискретной (геологической) модели ($t_{эф}$ — время начала откачки)

основным направлением развития в ближайшие годы будет интегрирование в процесс моделирования трещиноватости всех имеющихся данных о течении жидкости. В этой связи в ближайшее время следует ожидать развития программ моделирования на базе ДМСТ, основанных на «статических» геологических моделях. Должна возрасти вычислительная эффективность таких программ, чтобы за разумное время проводить моделирование данных в различных масштабах, в том числе — в масштабах регионального коллектора, для нескольких скважин, с учетом перетоков и передачи давления, а также распространения маркеров, дающего основную информацию об открытости и анизотропии сети трещин и разломов. Для этого в настоящее время разрабатываются методы моделирования, в которых сочетаются упрощенные однородные модели трещиноватости на удалении от скважин и дискретные модели вблизи скважин.

Несмотря на все усилия, направленные на извлечение всей информации из данных о течении жидкости на ранних этапах эксплуатации, определение гидравлических параметров сети разломов и трещин обычно оказывается неполным и/или неточным. Данные по добыче за все время эксплуатации месторождения позволяют постепенно дополнять, исправлять и уточнять модель сети трещин и разломов на месторождении с точки зрения движения жидкости. Учет данных о течении в геологической модели трещиноватости может оказаться сложным, так как данные по истории эксплуатации чаще всего содержат данные о добыче как из однофазных, так и многофазных пластов. Поэтому, наряду с обычной информацией по эксплуатации коллекторов, важными оказываются и данные 4D сейсморазведки, которые дают информацию непосредственно о крупных неоднородностях потока, связанных, возможно, с проницаемыми разломами или зонами трещиноватости.

Построение достоверной модели течения жидкости в масштабах месторождения

Сложные ДМСТ, полученные по геологическим данным, пригодны для моделирования течения жидкости в зоне

влияния скважины, но, из-за явных вычислительных ограничений, не могут быть напрямую использованы при моделировании многофазного течения жидкости в масштабах месторождения. Расчеты в масштабах месторождения требуют упрощенного представления фактического геологического строения трещиноватой среды. Процедура упрощения зависит (i) от соотношения размеров трещин и ячеек сети модели, (ii) от непрерывности и открытости каждой среды, и (iii) от соотношения времени взаимодействия между средами с временами движения жидкости в данной среде.

Если в любой точке и в любой момент времени между различными средами, составляющими модель, существует квазистатическое равновесие по флюидонасыщенности, давлению и составу жидкости, то трещиноватая среда может быть представлена однородной эквивалентной средой. Такие условия течения существуют в ряде сильно трещиноватых сред или при слабой дифференциации трещин и матрицы, а также при добыче из однофазного коллектора.

В иных условиях равновесие между матрицей и трещинами нарушается при изменении параметров трещин и условий течения, и каждую из сред следует моделировать по отдельности. Это значит, что однородная среда с усредненными параметрами трещин и матрицы не может передать особенности течения в данной среде. Известная модель двух сред с разными пористостями и проницаемостями (dual-porosity dual-permeability model) была предложена в 1960 г. в работе (Barenblatt et al., 1960), и затем переформулирована в предположении, что матрица и трещины ведут себя как две отдельных эквивалентных сплошных среды. В 1963 г. Уоррен и Рут (Warren and Root, 1963) предложили упрощенную версию этой модели — модель двух сред с разными пористостями и одинаковой проницаемостью (dual-porosity single-permeability model). В этой модели предполагается, что матрица состоит из блоков конечного размера, которые могут обмениваться жидкостью по сети трещин в любой точке коллектора. Уоррен и Рут приняли также хорошо известное представление блоков матрицы в виде одинаковых параллелепипедов, что упростило описание перетоков между матрицей и трещинами. На практике, однако, часто встречаются несплошные сети трещин в матрице с высокой проницаемостью. В таких случаях необходимо применять подход с различными проницаемостями, и на локальном уровне представление матрицы блоками конечного размера становится неправомерным.

Для работы в рамках моделей однородной среды и ли двух сред требуется генерализовать параметры течения жидкости в трещинах и в матрице, представляя их, соответственно, как единую среду или как отдельные среды. До недавнего времени процедур генерализации в масштабах месторождения не было. Недавно авторами реализована такая процедура для модели с разной пористостью (Bourbiaux et al., 1998). Она включает определение (i) эквивалентной проницаемости трещин по однофазным расчетам потока в рамках геологической ДМСТ на уровне ячейки, (ii) размеров эквивалентных блоков с помощью обработки изображения, аналогичной упрощенному представлению перетоков между матрицей и трещинами. Применение таких процедур к большим, полным, моделям месторождений, содержащим до нескольких миллионов ячеек, требует эффективных методов присваивания значений эквивалентных параметров каждой ячейке. Недавно авторами разработан метод интерполяции

для нескольких переменных, который дает некоторую гибкость при работе со сложными большими моделями трещиноватости.

При наличии сети разломов и трещин разного размера возникает вопрос о возможности замены такой сети эквивалентной однородной средой. Оказывается, что максимальный размер ячейки модели трещиноватости, при котором сеть проявляется как анизотропная сплошная среда, обычно гораздо больше разрешения модели течения жидкости, то есть размера ячейки модели течения. В таком случае при генерализации следует учитывать направленность потока, обусловленную крупными проницаемыми объектами (Cosentino et al., 2001; Basquet et al., 2004).

Путем применения этой процедуры к нашей модели месторождения (рис. 6), геологическая модель трещин и разломов была в три этапа преобразована в модель течения с двумя средами. Сначала были рассчитаны значения эквивалентной проницаемости и размеры эквивалентных блоков, которые проинтерполировали на все месторождение. Далее, с учетом направления течения и ориентации сетки модели, были определены коэффициенты связи (transmissivities) между ячейками. Наконец, коэффициенты связи для разломов были пересчитаны в эквивалентные значения проницаемости, которые прибавили к проницаемости сети мелких трещин, и, тем самым, определили вклад «трещинной» проницаемости в модель течения с двумя средами.

Нерешенные задачи. Слияние крупных разломов и сети мелких трещин в единую трещиноватую среду может приводить к ошибкам в расчете потоков, особенно при наличии нескольких крупных разломов, перенаправляющих поток между скважинами в многофазной среде. Поэтому будущее моделирования трещинных коллекторов видится в переходе к разномасштабным моделям течения жидкости на месторождении, сочетающим дискретное представление крупных объектов, определяющих течение и одну или несколько эквивалентных сред. Для применения к месторождениям в целом такие гибкие модели должны обеспечивать точный расчет потоков при минимальных вычислительных затратах. Следуя этой тенденции, авторы (Henn et al., 2004) разработали разномасштабную модель, основанную на (i) применении концепции разделения при расчете потоков внутри разломов, избегая тем самым необходимости разбивать эти тонкие объекты по вертикали, и (ii) на оценке связи между разломами и вмещающей средой без сгущения сетки вблизи разломов с сохранением предсказательной силы модели (рис. 7).

Моделирование многофазного перемещения жидкости в модели месторождения с несколькими средами

Во многих порово-трещинных коллекторах уровень добычи и извлекаемость запасов определяются, в долгосрочной перспективе, перетоками между матрицей и трещинами в многофазной среде, связанными с истощением и/или применением вторичных или третичных методов повышения отдачи. Поэтому средства моделирования трещинных коллекторов должны включать надежные формулы и алгоритмы, позволяющие верно передавать физику фазовых переходов между средами, составляющими модель – матрицей, трещинами и/или разломами. В общей постановке эта задача сложна, поскольку течение жидкости может определяться разнообразными физическими механизмами, в том числе давлением, капиллярными эффектами, силой тяжести, вязкими эффектами, диффузией и теплопроводностью.

При моделировании перетоков между матрицей и трещинами подход с одной средой гораздо менее гибок, чем подход с двумя средами. По сути, в моделях с единой пористостью для передачи одновременно как движения жидкости по трещинам, так и обмена с матрицей ячейкам присваиваются значения неких псевдопараметров, особенно относительной псевдопроницаемости (k_{fr}). Поскольку псевдопараметры зависят от всех факторов (к тому же, переменных во времени), определяющих движение жидкости между матрицей и трещинами, то их значения обычно нельзя определить, кроме некоторых особых случаев (Van Lingen et al., 2001). Эти трудности объясняют переход к моделям двух сред с разными пористостями, а при моделировании крупных потоков – и с разными проницаемостями.

Благодаря раздельному представлению течения по каждой среде, концепция двух пористостей обеспечивает лучшее понимание и моделирования взаимодействия потоков в обеих средах. Остается, тем не менее, трудность, связанная с формулами, описывающими перетоки между матрицей и трещинами, поскольку в таких моделях матрица обычно не дискретизируется.

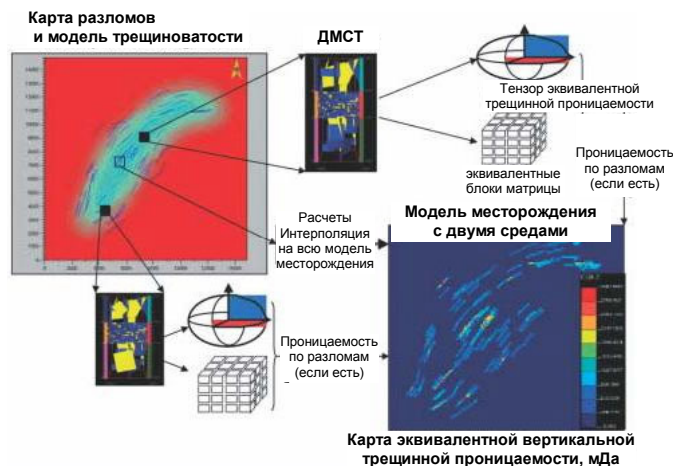


Рис. 6. Переход от геологической модели трещин и разломов к модели течения жидкости с двумя средами с разной пористостью: генерализация гидравлических свойств сети трещин – распространение значений эквивалентных параметров двух сред на всю модель месторождения.

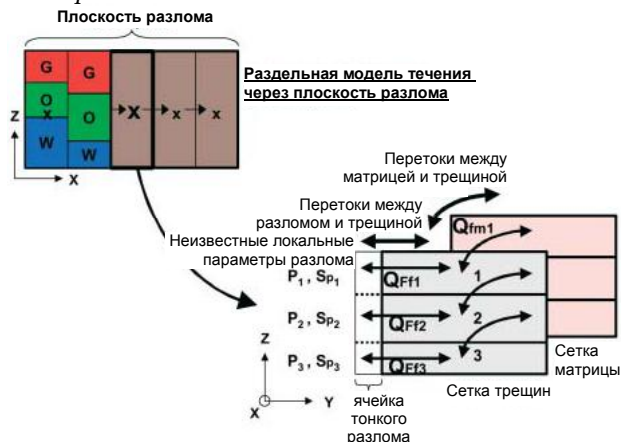


Рис. 7. Увязка явной модели и модели с двумя средами при разномасштабном моделировании трещинного коллектора

Следует удовлетворить двум условиям: во-первых, должен быть верным расчет равновесного (по давлению, насыщенности и составу) состояния блоков матрицы, и, во-вторых, переходные процессы при перетекании из блока в блок (если происходит задержка по сравнению с течением в трещиноватой среде) также должны быть рассчитаны верно. До сих пор большинство способов моделирования течения в многофазной среде основаны на вариантах уравнений квазистационарного состояния (КСС), предложенных Уоренном и Руттом в 1963 г. при истолковании замеров давления в ходе скважинного испытания на трещинном коллекторе. Это уравнение вводит линейное соотношение между общим удельным (на единицу объема матрицы) потоком из матрицы в трещину q , и перепадом давлений $p_m - p_f$ между матрицей и трещиной, представленными отдельными сплошными средами:

$$q = \sigma \frac{k_m}{\mu} (p_m - p_f) \quad (1)$$

где k_m - проницаемость однофазной матрицы, μ - вязкость жидкости, а σ - так называемый форм-фактор, зависящий от размера и формы блоков матрицы.

В разных вариантах уравнений КСС используются разные выражения для форм-фактора и/или псевдофункции для многофазной среды. Однако область применимости этих вариантов обычно ограничена конкретными значениями параметров коллектора и предположениями о физических механизмах движения жидкости и ее предшествующих состояниях. В самом деле, при течении в многофазной среде (рис. 8) работают как «направленные» механизмы, прежде всего сила тяжести, наряду с вязкостью, влияющей на течение по трещинам в средах с близкими значениями проницаемости матрицы и трещин, так и диффузные – капиллярные эффекты, давление, иногда – диффузия и/или теплоперенос. Более того, в смешанных нефтегазовых процессах следует учитывать термодинамические связи при фазовых переходах, например при конденсации или испарении нефтяной фазы матрицы

Зная об этих трудностях, авторы предпочли подход Куандаля-Сабатье (Quandalle and Sabathier, 1987), реализованный в наших программах моделирования коллекторов. Этот подход состоит в представлении перетока между матрицей и трещиной в виде суммы вкладов каждого из действовавших физических механизмов с соответствующими масштабными множителями.

Таким образом, для данной фазы p поток из матрицы в трещину для каждой ячейки выражается в виде:

$$f_p = \frac{\Delta X \Delta Y \Delta Z}{l_x l_y l_z} \sum_{i=1}^6 \lambda_p^i \frac{2 A_i}{l_i} \Delta \Phi_p^i \quad (2)$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - размеры ячейки, l_i (l_x, l_y, l_z) - длины ребер эквивалентного параллелепипеда блока матрицы, A_i - площадь каждой из шести боковых граней блока матрицы i ($i = x-, x+, y-, y+, z-, z+$) и λ_p^i - особая функция подвижности фазы (phase mobility function). Стоит отметить, что в этой формуле не задается никакой форм-фактор; напрямую используются размеры эквивалентного блока матрицы, определенные по геологической модели трещиноватости.

$\Delta \Phi_p^i$ обозначает для фазы p разность потенциалов на грани i между трещиной и блоком матрицы, соответствующим ячейке:

$$\Delta \Phi_p^i = \Delta p + C_{cp} \Delta p_{cp} + C_{gp} G_i + C_{vp} \delta p_f \quad (3)$$

где Δp - перепад давлений соответствующей фазы между матрицей и трещиной, а Δp_{cp} перепад капиллярных давлений между средами. G_i ($i = z-, z+$) обозначает среднее значение силы тяжести, действующей на блок матрицы, а δp_f - перепад давлений в соответствующем направлении, обусловленный вязкостью. C_{cp}, C_{gp} и C_{vp} - масштабные множители, соответственно для механизмов капиллярного, гравитационного и вязкого. Присваивая этим множителям значения 0 или 1, можно оценить роль этих механизмов в перетоке между матрицей и трещиной. Кроме того, для типичной ситуации перетока под воздействием только силы тяжести и капиллярных эффектов имеются аналитические выражения масштабных множителей, позволяющие выполнить условие вертикального равновесия жидкости по окончании перетока (Sabathier et al., 1998).

Выполнив эту последовательность действий с нашим модельным примером, мы получили историю нагнетания на данном месторождении за 20 лет (рис. 9). Обе скважины, и нагнетательная, и эксплуатационная, поставлены в наиболее трещиноватой, центральной части коллектора. Отметим наличие многочисленных разломов в этой части месторождения, хотя все они расположены на некотором удалении от скважин. Карты водонасыщенности для моментов через 2 года и через 10 лет после начала нагнетания показывают, что система разломов с высокой проницаемостью быстро заполняется водой через сеть мелких трещин. Но водонасыщенность самих мелких трещин остается умеренной в течение нескольких лет в связи с тем, что перетекание нефти из матрицы в трещины происходит постепенно.

Нерешенные задачи. Несмотря на достигнутый в последнее время прогресс в моделировании сложных течений, особенно многофазных (Lacroix et al., 2004), вопросы расчета перетоков между матрицей и трещиной

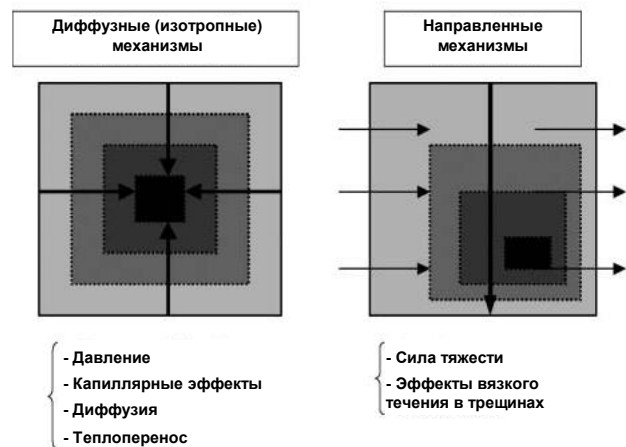


Рис. 8. Различные типы физических механизмов перетока между матрицей и трещиной.

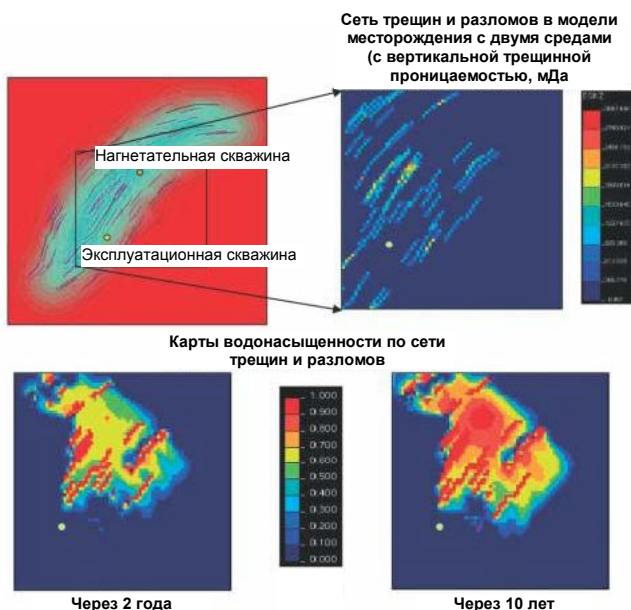


Рис. 9. Моделирование нагнетания воды на участке месторождения в рамках модели с двумя средами

при моделировании в масштабе месторождения остаются открытыми, поскольку не решены задачи генерализации на уровне блока матрицы. Возможно, следует обратиться к методам, использующим локальное моделирование перетоков с дискретизацией блоков матрицы (Famy et al., 2005), поскольку с совершенствованием компьютеров возрастают и вычислительные возможности.

Ближайшее будущее: дальнейшая интеграция

С появлением методов и средств перехода от геологических моделей трещиноватости к моделям течения жидкости открывает путь к дальнейшей интеграции этапов статического и динамического моделирования. Методика состоит в непосредственной калибровке геологических моделей трещин и разломов данными о течении жидкости (Jenni et al., 2004). Следует иметь в виду, что многие параметры геологической модели плохо определены.

Это относится, например, к положению и длине, крупных разломов, не проявляющихся в данных сейсморазведки. Поэтому обычно модели течения жидкости не полностью соответствуют данным динамических наблюдений.

Многочратная корректировка геологической модели методом проб и ошибок с последующим пересчетом модели течения жидкости вряд ли практична.

Предлагаемая методика позволяет постепенно изменять положение и/или проницаемость статистически выделенных разломов в ходе процедуры увязки с историей эксплуатации, включающей расчет многофазного течения жидкости в модели, полученной на основе геологической модели месторождения.

Таким образом, геолог и инженер по эксплуатации могут эффективно интегрировать, каждый по-своему, геологические данные и данные о течении жидкости в единую модель. Эта методика – большой шаг в такой интеграции, поскольку потому что построение модели трещин увязано теперь с динамикой месторождения.

Ключ к интеграции в рамках предложенной последовательности действий лежит в возможности постепенного изменения плохо определяемых свойств или положения геологических объектов (например, разломов) с опорой на хорошо определенные параметры геологических или геостатистических моделей (Hu, 2000).

Заключение

Благодаря новым интегрированным и гибким методам и программам моделирования, сегодня можно создать единый способ создания моделей трещинных коллекторов, начиная с геологического анализа трещиноватости, и заканчивая моделированием добычи из многофазных коллекторов. Развитие средств оценки гидравлических свойств и надежных способов генерализации, основанных на ДМСТ, стало главным достижением, позволившим объединить геологию и эксплуатацию. Теперь можно обеспечить соответствие между геологическими/статистическими наблюдениями и данными о течении/динамике.

Такой способ использует все имеющиеся данные наблюдений и измерений, которые позволяют установить наличие трещиноватости и ее влияние на добычу. Этот подход станет тем более перспективен, если данных по трещиноватости будет много, причем по всей территории месторождения. В то же время, чем больше данных, тем сложнее их интегрировать и осмыслить.

Таким образом, доступность информации по трещиноватости и возможность интегрирования данных из разных источников являются главными факторами, необходимыми для широкого внедрения интегрированного подхода к исследованию трещинных коллекторов. Значительный прогресс ожидается в следующих направлениях:

- дополнительные ограничения на модели трещин и разломов, взятые из соображений геомеханики и данных специализированных (нацеленных на изучение трещиноватости) работ 3D/4D сейсморазведки
- повышение надежности моделирования течения жидкости в масштабах месторождения за счет учета неоднородностей потока различного масштаба в смешанных моделях, объединяющих дискретные и однородные представления разломов и трещин.
- возможность непосредственно дополнять построение моделей разломов и трещин процедурами увязки с историей эксплуатации.

Есть основания надеяться, что развитие способов построения геологических моделей, увязанных с данными о течении жидкости, приведет к дальнейшему сближению представлений геологов и инженеров по эксплуатации о строении трещинных коллекторов, и снизит неопределенность модельных прогнозов во имя оптимизации добычи и прироста разведанных запасов.

Литература

Barenblatt, G.I., Zheltov, Iu P., and Kochina I.N. [1960] Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks, *J. Appl. Math.*, **24**, 1286.

- Basquet, R., Jeannin, L., Lange, A., Bourbiaux, B., and Sarda, S. [2004] Gas-Flow Simulation in Discrete Fracture- Network Models, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, October, 378-384.
- Bourbiaux, B., Cacas, M.C., Sarda, S., and Sabathier, J.C. [1998] A Rapid and Efficient Methodology to Convert Fractured Reservoir Images into a Dual-Porosity Model. *Revue de l'Institut Francais du Petrole*, 53, 6, Nov-Dec, 758-799.
- Bourbiaux, B., Basquet, R., Cacas, M.C., Daniel, J.M., and Sarda, S. [2002] An Integrated Workflow to Account for Multi-Scale Fractures in Reservoir Simulation Models: Implementation and Benefits. Paper SPE No 78489, presented at the 10th ADIPEC, Abu Dhabi, Oct. 13-16.
- Cacas, M.C., Daniel, J.M., and Letouzey, J. [2001] Nested Geological Modelling of Naturally Fractured Reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 7, S43-S52.
- Cosentino, L., Coury, Y., Daniel, J.M., Manceau, E., Ravanne, C., Van Lingen, P., Cole, J., and Sengul, M. [2001] Integrated Study of a Fractured Middle East Reservoir with Stratiform Super-K Intervals - Part 2: Upscaling and Dual Media Simulation. Paper SPE 68184 presented at the Middle East Oil Show, Bahrain, 17-20 March.
- Daniel, J.M. [2004] See <http://www.ifp.fr/IFP/en/researchindustry/explorationreservoir/Facet4D.htm>.
- Famy, C., Bourbiaux, B., and M. Quintard [2005] Accurate Modelling of Matrix-Fracture Transfers in Dual-Porosity Models: optimal sub-gridding of matrix blocks. Paper SPE 93115 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, Houston, 31 Jan-2 Feb.
- Henn, N., Quintard, M., Bourbiaux, B., and Sakthikumar, S. [2004] Modelling of Conductive Faults With a Multiscale Approach. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 59, 2, 197-214.
- Hu, L.Y. [2000] Gradual Deformation and Iterative Calibration of Gaussian-Related Stochastic Models. *Math. Geol.*, 32, 1.
- Jenni, S., Hu, L.Y., Basquet, R., de Marsily, G., and Bourbiaux, B. [2004] History Matching of Stochastic Models of Field-Scale Fractures: Methodology and Case Study. Paper SPE 90020 presented at the SPE Ann. Tech. Conf. & Exh., Houston, 26-29 September.
- See also:
<http://www.ifp.fr/IFP/en/researchindustry/explorationreservoir/Calfrac.htm>.
- Lacroix, S., Delaplace, Ph., Bourbiaux, B., and Foulon, D. [2004] Simulation of Air Injection in Light-Oil Fractured Reservoirs: Setting-Up a Predictive Dual-Porosity Model. Paper SPE 89931 presented at the SPE Ann. Tech. Conf. & Exh., Houston, 26-29 September.
- Lange, A., Basquet, R., and Bourbiaux, B. [2004] Hydraulic Characterization of Faults and Fractures Using a Dual Medium Discrete Fracture Network Simulator. Paper SPE 88675 presented at the 11th ADIPEC, Abu Dhabi, 10-13 October.
- Quandalle, Ph., and Sabathier, J.C. [1987] Typical Features of a New Multipurpose Reservoir Simulator. Paper SPE 16007 presented at the 9th SPE Reservoir Simulation Symposium, San Antonio, Tx, 1-4 Feb.
- Rasolofosaon, P.N.J. [2005] Fracture characterization in an Algerian gas reservoir using seismic azimuthal anisotropy. Presented at the 2nd North African/Mediterranean Petroleum & Geosciences Conference and Exhibition, Algiers, 10-13 April. See also <http://www.ifp.fr/IFP/en/researchindustry/explorationreservoir/FracAnis.htm>.
- Sabathier, J.C., Bourbiaux, B., Cacas, M.C., and Sarda, S. [1998] A New Approach of Fractured Reservoirs. Paper SPE 39825 presented at the *SPE Int. Pet. Conf. & Exh.*, Villahermosa, Mexico, 3-5 March.
- Sarda, S., Jeannin, L., Basquet, R., and Bourbiaux, B. [2002] Hydraulic Characterization of Fractured Reservoirs: Simulation on Discrete Fracture Models. *SPE Formation Evaluation*, April.
- Van Lingen, P., Daniel, J.M., Cosentino, L., and Sengul, M. [2001] Single Medium Simulation of Reservoirs with Conductive Faults and Fractures. Paper SPE 68165 presented at the *Middle East Oil Show*, Bahrain, 17-20 March.
- Warren, J.E. and Root, P.J. [1963] The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. *SPE Journal*, Sept, 245-255.