

DOI: [10.7242/1999-6691/2018.11.3.19](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.3.19)

УДК 532.546:519.6

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТРАССЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ТРЕЩИНЫ

Т.Ф. Киреев^{1,2}, Г.Т. Булгакова¹¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Российская Федерация² ООО «Уфимский научно-технический центр», Уфа, Российская Федерация

Трассерные исследования проводятся для изучения фильтрационной неоднородности межскважинного пространства. Результаты их интерпретации могут выступать в качестве исходных данных для моделирования физико-химических способов увеличения нефтеотдачи. Классическая количественная интерпретация предполагает довольно грубое допущение – считается, что каналы фильтрации, по которым движется трассер, полностью изолированы от пласта. В данной работе предлагается альтернативный метод интерпретации результатов трассерных исследований, основанный на представлении высокопроницаемых каналов фильтрации в виде дискретных трещин, соединяющих забои добывающих и нагнетательных скважин. Для описания движения трассера используется численное решение уравнения конвективного переноса. Учитываются перетоки между трещиной и пластом, поэтому метод лишен указанного недостатка классической методики. Интерпретация результатов трассерных экспериментов заключается в построении модели участка пласта и определении его фильтрационных параметров из решения обратной задачи. Проведена верификация модели, исследована корректность постановки обратной задачи, осуществлено сравнение предлагаемого и классического подходов к интерпретации, проанализирована динамика прорыва воды по трещине к добывающей скважине. На примере с двумя трещинами показано, что квазирешение обратной задачи существует и непрерывно зависит от входных данных. Выявлено, что при отсутствии перетоков между трещиной и пластом результаты интерпретации с помощью обсуждаемого и классического методов близки, а наличие перетоков может увеличить оцениваемый объем трещин в 200 и более раз. Показано, что из-за перетоков между трещиной и пластом прорыв воды по трещине в добывающую скважину может полностью отсутствовать.

Ключевые слова: трассерные исследования, индикаторные исследования, высокопроницаемые каналы, дискретная модель трещины, утечки из трещины, обратная задача

INTERPRETATION OF INTERWELL TRACER TESTS USING DISCRETE FRACTURE MODEL

T.F. Kireev^{1,2} and G.T. Bulgakova¹¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation² UNTC LLC, Ufa, Russian Federation

Well-to-well tracer tests are used for getting knowledge about the flow behavior in the reservoir. The results of interpretation of these tests are especially important when enhanced oil recovery techniques that use expensive fluids such as surfactants, micellar fluids, or polymers are modeled. The classical method of quantitative interpretation assumes that the tracer filtration channels are completely isolated from the formation. In this paper, an alternative method for interpreting the results of well-to-well tracer tests is proposed. High-permeability channels are represented as discrete fractures that connect producing and injection wells. A numerical solution of the convective transport equation is used for modeling the tracer flow. The flows between the fracture and the reservoir are fully resolved, so the above-described drawback of the classical technique is overcome. The interpretation is carried out by constructing a reservoir model and determining the model parameters by solving the inverse problem. The model is verified, the well-posedness of the inverse problem is analyzed, and the comparison of the method with the classical interpretation method is performed. Using two fractures as an example, it is shown that the quasi-solution of the inverse problem exists and continuously depends on the input data. The interpretation results with this method are shown to be similar to the results of the classical interpretation in the absence of crossflows between the fracture and the reservoir. It was found that the presence of crossflows can increase the estimated fracture volume by 200 or more times. It is also shown that the crossflows between the fracture and the formation can completely prevent water breakthrough along the fracture into the production well.

Key words: interwell tracer tests, well-to-well tracer tests, high-permeability layer, discrete fracture model, fracture leakage, inverse problem

1. Введение

Трассерные (или индикаторные) исследования проводятся следующим образом: в нагнетательную скважину закачивается раствор специального вещества (трассер), затем производится отбор проб жидкости с добывающих скважин, и по результатам лабораторного анализа проб строятся графики зависимости концентрации трассера в отборах жидкости от времени. Совместное использование геолого-геофизических данных и результатов подобных экспериментов позволяет повысить достоверность знаний о строении нефтяной залежи и количественно оценить емкостные и фильтрационные параметры трещиноватых и пористых пластов [1, 2].

На практике к трассерному методу прибегают, как правило, для определения маршрута продвижения воды к скважинам с преждевременным обводнением продукции. Если это обводнение связано с холостой циркуляцией нагнетаемой воды, то возникает необходимость в проведении мероприятий по изоляции высокопроницаемых каналов фильтрации в пласте [3]. Наиболее рентабельными являются технологии с закачкой водоизолирующих химических составов в водонасыщенные интервалы продуктивного

пласта [3]. Результаты интерпретации трассерных исследований выступают в качестве исходных данных при моделировании таких физико-химических способов увеличения нефтеотдачи. Кривые концентрации трассера в отборах жидкости с добывающих скважин, или кривые отклика, можно анализировать с трех различных точек зрения.

Во-первых, проводить качественную интерпретацию, то есть по кривым отклика определять наличие высокопроницаемых каналов и трещин между скважинами, связанность различных слоев между собой, направленность фильтрационных потоков в пласте. Кроме того, с помощью интегрирования кривой отклика по времени рассчитывается накопленный отбор трассера, который позволяет вычислить распределение объема нагнетаемой воды по соседним добывающим скважинам. С позиции этой точки зрения можно применять классическую методику количественной интерпретации [1, 2]. Согласно ей каждому пику кривой отклика $C(t)$ соответствует канал с параметрами:

$$k = \frac{2\mu L^2}{(t_1 + t_2) \Delta p}, \quad (1)$$

$$V = Q_{inj} \frac{(t_1 + t_2)}{2M_{total}} \int_{t_1}^{t_2} C(t) Q(t) dt, \quad (2)$$

где k — проницаемость канала; μ — вязкость жидкости; L — расстояние между скважинами; $C(t)$ — кривая отклика (массовая концентрация трассера в отборе жидкости с добывающей скважины); t_1 и t_2 — соответственно время начала и конца пика на кривой $C(t)$; Δp — перепад давления между нагнетательной и добывающей скважинами; V — объем канала; Q_{inj} — приемистость нагнетательной скважины; M_{total} — масса закачанного трассера; $Q(t)$ — дебит добывающей скважины.

Во втором случае применяются более сложные математические модели, например, при генерации простейших аналитических кривых отклика и последующем их наложении на фактические кривые [4]. Сложные отклики при этом разбиваются на несколько простых аналитических откликов.

Наконец, с третьей точки зрения можно использовать численные симуляторы, базирующиеся на методе конечных объемов или методе трубок тока. Большинство коммерческих симуляторов позволяет учитывать наличие трассера в воде с различной степенью сложности [5].

Одним из недостатков классической методики [1, 2] является предположение о том, что каналы с низким фильтрационным сопротивлением (каналы НФС) изолированы от пласта. Таким образом, потери трассера из-за перетоков между каналами НФС и пластом не учитываются, что может привести к сильной недооценке объема такого канала [6].

В данной работе описывается способ интерпретации трассерных исследований, основанный на численном решении уравнения конвективного переноса трассера. Считается, что каналы НФС представляют собой дискретные вертикальные трещины, соединяющие забои добывающих и нагнетательных скважин. Предлагаемый подход лишен главного недостатка классической методики и дает более наглядное описание структуры межскважинного пространства, что упрощает последующее проведение численного моделирования процесса изоляции каналов НФС. По сравнению с коммерческими численными симуляторами применяется более простая гидродинамическая модель, позволяющая находить решение обратной задачи за приемлемое время (не более 5 секунд в экспериментах, представленных в данной статье). Отсутствие сжимаемости флюидов, многофазных, капиллярных и гравитационных эффектов в модели снижает уровень нелинейности обратной задачи и таким образом повышает устойчивость ее решения.

В Приложении к статье проанализировано влияние массообмена между дискретной трещиной и пластом на динамику прорыва воды по трещине к добывающей скважине.

2. Предлагаемая математическая модель переноса трассера

При построении математической модели течения воды и переноса трассера в пласте и в трещинах принимаются следующие предположения:

- свойства пласта слабо меняются вдоль вертикальной оси;
- гравитационные эффекты отсутствуют;
- пласт плоский и двумерный;
- первоначально в пласте и трещинах содержится только чистая вода;
- вода несжимаема;
- трассер способен растворяться в воде;
- трассер полностью адсорбируется в пласте;
- трассер не адсорбируется в трещинах.

Предположение об адсорбции трассера в пласте вводится для того, чтобы кривая отклика всегда имела единственный пик, в противном случае часть трассера, движущаяся по пласту, будет образовывать второй пик, что усложнит процесс интерпретации.

Для описания течения воды и переноса трассера в пласте и в трещинах используются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{u} &= 0, \\ \phi \frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div} C \mathbf{u} + q C \delta_{well} &= 0, \\ \mathbf{u} &= -\frac{k}{\mu} \operatorname{grad} p, \\ q &= \lim_{r \rightarrow +0} \int_{S(r)} (\mathbf{u}, \mathbf{n}_{S(r)}) ds. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение прямой задачи движения трассера заключается в отыскании при $t > 0$ модельных кривых отклика — функций $C(t)$, в точках расположения добывающих скважин при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}_\Gamma} \right|_\Gamma &= 0, \\ p \delta_{well} &= p_{bh}, \\ C(t=0) &= 0, \\ C(t) \delta_{well, inj} &= \begin{cases} C_{inj}, & t \in (0, t_{inj}], \\ 0, & t \in (t_{inj}, +\infty). \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Для учета адсорбции трассера в пласте вводится дополнительное условие:

$$C(t)|_\Omega = 0. \quad (5)$$

В уравнениях (3)–(5) использованы следующие обозначения: \mathbf{u} — вектор скорости фильтрации воды; ϕ — пористость породы; C и C_{inj} — концентрация трассера во всей области (в пласте и в трещинах) и в нагнетаемой воде; t и t_{inj} — текущее время и время закачки трассера; q — дебит (расход) воды; $\mathbf{n}_{S(r)}$ — вектор нормали к $S(r)$ (сфере радиуса r , локализованной в точке расположения скважины); \mathbf{n}_Γ — вектор нормали к Γ , где Γ — внешняя граница пласта; δ_{well} и $\delta_{well, inj}$ — дельта-функции Дирака (их размерность $1/\text{м}^3$), локализованные, соответственно, в точках расположения добывающих и нагнетательных скважин и в точке расположения нагнетательной скважины, в которую производится закачка трассера; k — проницаемость породы; μ — вязкость воды; p и p_{bh} — пластовое давление и фиксированное забойное давление скважины; Ω — область пласта с исключенными трещинами.

3. Пространственная дискретизация

Для численного описания геометрии пласта и трещин применяется двумерная неструктурированная сетка Вороного [7] и дискретная модель трещины [8]. Трещины представляются в виде набора прямоугольных ячеек (Рис. 1а), ширина которых принимается равной ширине раскрытия трещины (от 0,001 мм до 10 см). Каждая ячейка трещины может быть соединена с подобной ей или с ячейкой пласта, благодаря чему учитываются перетоки воды из трещины в пласт и обратно (Рис. 1б).

Для представления вертикальных скважин используется измельченная радиальная сетка, которая позволяет соединить забой скважины с произвольным количеством трещин (Рис. 2а). Забой скважины считается отдельной расчетной ячейкой (Рис. 2б), диаметр которой совпадает с диаметром ствола скважины (около 10 см), поэтому нет необходимости прибегать к аналитическим зависимостям для описания притока к скважине, таким, например, как формула Писмана [9].

Уравнения движения трассера решаются на этой сетке методом конечных объемов с помощью двухточечной аппроксимации потоков [10]. Расчетная сетка является ортогональной, поскольку в ячейках за узловые точки принимаются точки-генераторы диаграммы Вороного; это свойство увеличивает точность аппроксимации потоков между ячейками [7, 10].

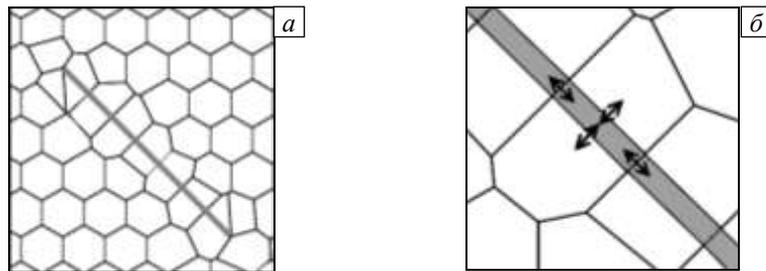


Рис. 1. Расчетная сетка для пласта с трещиной: (а) – сетка вокруг трещины, (б) – увеличенное изображение сетки вблизи трещины (серым цветом обозначены ячейки трещины, черными стрелками – возможные направления течения воды между ячейками)

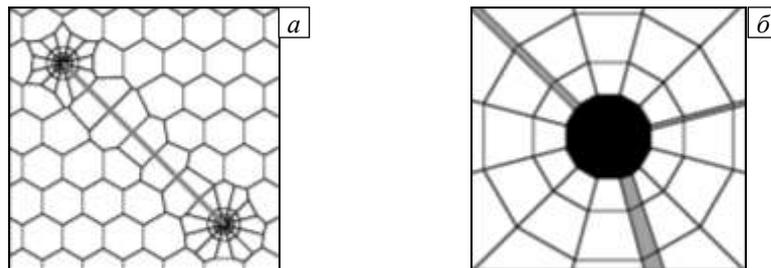


Рис. 2. Расчетная сетка для пласта с трещиной, проходящей между двумя скважинами: (а) – сетка вокруг трещины и скважин, (б) – схематическое изображение соединения забоя скважины с трещиной (серым цветом обозначены ячейки трещины, черным – ячейка забоя скважины)

4. Верификация модели

Для верификации предложенной модели переноса трассера была рассмотрена прямоугольная область пласта с двумя скважинами, между которыми проходила трещина с проницаемостью 100 мкм^2 и шириной раскрытия 1 см (показана на рисунке 3а). Проницаемость пласта равнялась $0,05 \text{ мкм}^2$, толщина пласта — 10 м, расстояние между скважинами — 800 м, забойные давления скважин — 15 и 25 МПа. Аналогичная задача рассматривалась в коммерческом гидродинамическом симуляторе на декартовой расчетной сетке (Рис. 3б). При решении уравнений в обоих расчетах использовалась одинаковая величина временного шага — 10 часов. В нагнетательную скважину было закачено 10 м^3 раствора трассера с концентрацией 30 кг/м^3 .

На рисунке 4 изображены кривые отклика, зарегистрированные на добывающей скважине. Максимальное абсолютное отклонение концентрации трассера составило 1,5%, а отклонение накопленной концентрации трассера — 0,15%. Таким образом, предложенную модель можно считать приемлемой для решения задачи переноса трассера.

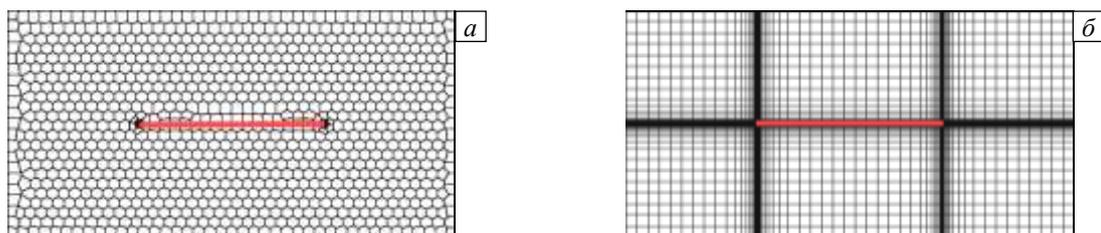


Рис. 3. Сетки для верификации модели переноса трассера в задаче с трещиной (показана горизонтальной линией), соединяющей две скважины: (а) – для расчета по предложенной модели, (б) – для расчета в коммерческом симуляторе (темные участки – места сгущения сетки)

Несмотря на то, что концентрация трассера в нагнетаемом растворе меняется скачкообразно, форма кривой отклика на рисунке 4 не имеет разрывов. Такое «размазывание» кривой отклика возникает по трем причинам: во-первых, скорость движения трассера в каждой точке трещины разная, поскольку трещина имеет конечную проводимость; во-вторых, происходит переток трассера из трещины в пласт; в-третьих, использованная расчетная схема обладает численной дисперсией. Первые две причины связаны с физикой процесса, а третья обусловлена вычислительными погрешностями; важная задача определения влияния каждой из них на вид кривой отклика остается открытой. В разделе 6 данной работы будет показано, что решение обратной задачи с помощью дискретной модели трещины довольно близко к решению, полученному с помощью классического метода интерпретации [1, 2], и, таким образом, в проведенных экспериментах численная дисперсия не оказывает существенного влияния на точность решения прямой и обратной задач.

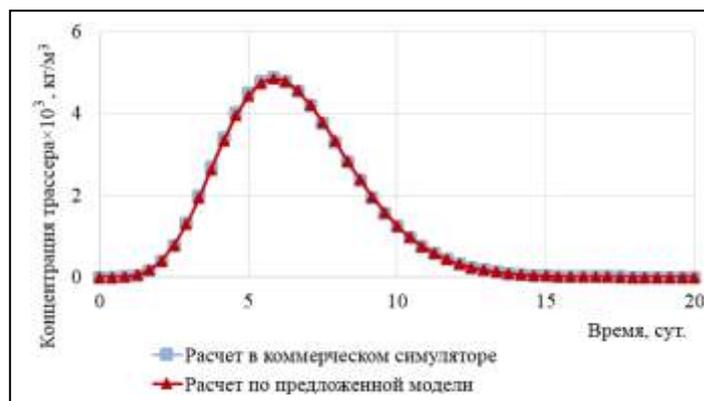


Рис. 4. Кривые отклика из расчетов по предложенной модели и с помощью коммерческого симулятора

5. Решение обратной задачи

Интерпретация результатов трассерных исследований заключается в построении модели участка пласта и определении фильтрационных параметров этого участка с помощью решения обратной задачи. Предполагается, что трассер закачивается в одну нагнетательную скважину, а отбор проб производится на нескольких соседствующих с ней добывающих скважинах. Между нагнетательной скважиной и всеми взаимодействующими с ней добывающими скважинами проводятся трещины, вскрывающие всю толщину пласта. Для каждой добывающей скважины задана фактическая кривая отклика, и, таким образом, между трещинами и фактическими кривыми отклика устанавливается взаимно-однозначное соответствие. Каждая трещина характеризуется двумя параметрами: проницаемостью и шириной раскрытия. Обратная задача заключается в отыскании неизвестных параметров модели — векторов проницаемости \mathbf{k} и ширины \mathbf{w} — по имеющимся фактическим кривым отклика.

Обратные задачи такого рода могут оказаться некорректными. Для преодоления подобных затруднений в настоящее время разработано большое число регуляризирующих алгоритмов [11], с успехом применяющихся при контроле и управлении различными технологическими процессами. Все они основаны на том или ином способе учета априорной информации, позволяющей сузить область, в которой ищется решение обратной задачи. Априорная информация качественного характера, в предлагаемом здесь подходе — знание допустимых физических границ значений \mathbf{k} и \mathbf{w} — позволяет применить метод квазирешения [11]. За решение обратной задачи принимается вектор (\mathbf{k}, \mathbf{w}) , доставляющий минимум функционалу невязки

$$F(\mathbf{k}, \mathbf{w}) = \alpha \sum_i \left(\frac{\int_t C_{sim}(i, t, \mathbf{k}, \mathbf{w}) dt}{\int_t C_{fact}(i, t) dt} - 1 \right)^2 + (1 - \alpha) \sum_i \left(\frac{t}{\arg \max_t (C_{sim}(i, t, \mathbf{k}, \mathbf{w}))} - 1 \right)^2, \quad \alpha \in (0, 1)$$

на множестве, которое может рассматриваться как класс корректности для данной задачи. Здесь: α — параметр; i — индекс добывающей скважины, для которой имеется фактическая кривая отклика; $C_{fact}(i, t)$ — фактическая кривая отклика i -й скважины; $C_{sim}(i, t, \mathbf{k}, \mathbf{w})$ — модельная кривая отклика скважины i . По существу найденный вектор (\mathbf{k}, \mathbf{w}) будет являться квазирешением обратной задачи.

Проверка условной корректности постановки обратной задачи осуществлялась на трех наборах зашумленных синтетических кривых отклика, которые генерировались с помощью решения прямой задачи. В качестве шума использовался белый шум с нормальным распределением. Степень зашумленности кривой отклика вычислялась как относительное отклонение площади под графиком исходной и зашумленной кривых отклика, вычисленное в процентах. Минимизация целевой функции проводилась методом локальной оптимизации Нелдера–Мида [12].

На рисунке 5 показаны расчетная область пласта, расположение скважин и трещин. Рисунок 6 содержит синтетические кривые отклика с ненулевой степенью зашумленности и соответствующие решения обратной задачи. В таблице 1 приведены: исходные параметры трещин, на основе которых генерировались синтетические входные данные; параметры трещин, полученные в результате решения обратной задачи; использованные интервалы поиска параметров трещин и начальные приближения для этих параметров. Номера трещин совпадают с номерами добывающих скважин, с которыми они соединены.

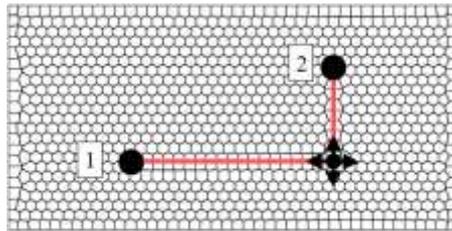


Рис. 5. Расчетная сетка для проверки условной корректности обратной задачи: цифрами указаны номера скважин, линиями обозначены трещины, черными точками – добывающие скважины, черной точкой со стрелками – нагнетательная скважина

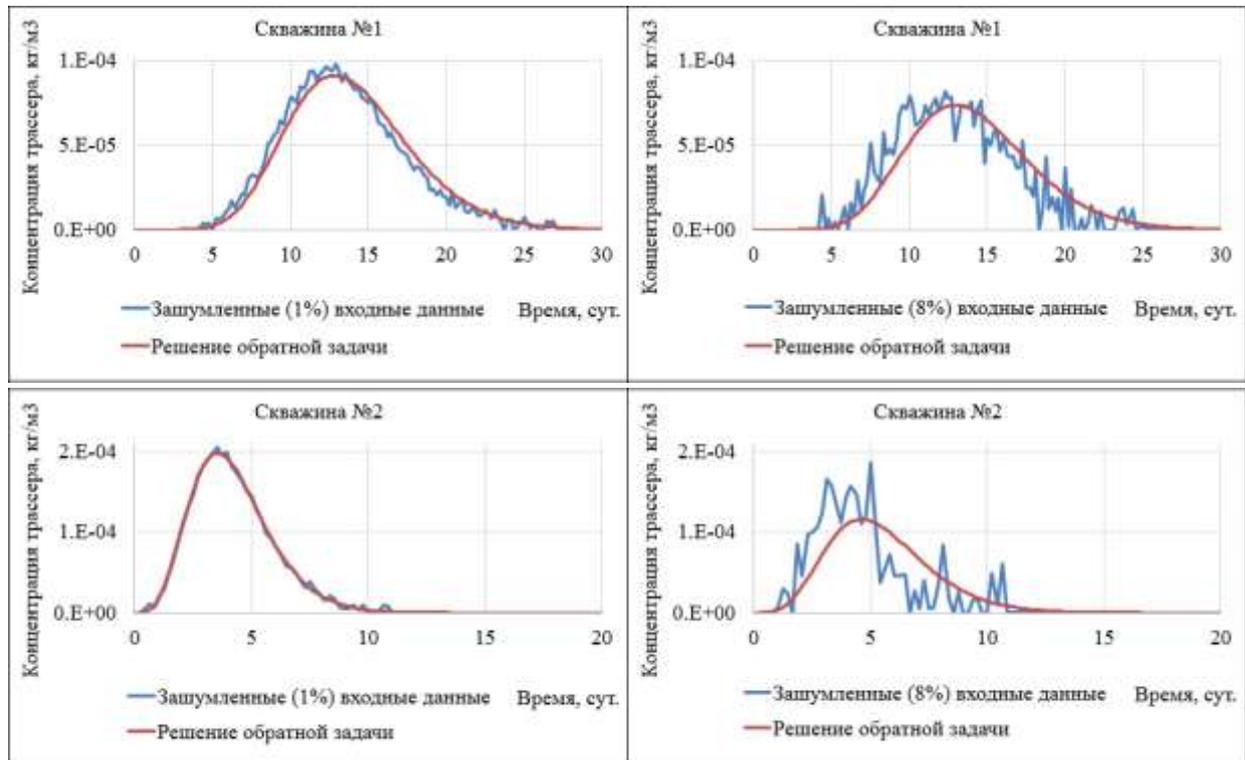


Рис. 6. Кривые отклика при проверке условной корректности обратной задачи

Таблица 1. Параметры трещин, полученные в ходе проверки условной корректности обратной задачи

Параметры	Номер трещины и исходные параметры трещин			
	Трещина №1, проницаемость, мкм ²	Трещина №2, проницаемость, мкм ²	Трещина №1, ширина, мм	Трещина №2, ширина, мм
Параметры	100	50	10	5
Интервал поиска	(0,1; 1000)	(0,1; 1000)	(0,01; 50)	(0,01; 50)
Начальное приближение для решения обратной задачи	500	500	25	25
Решение обратной задачи по синтетическим входным данным без наложения шума	100,14	50,23	9,97	4,95
Решение обратной задачи по зашумленным (1%) синтетическим входным данным	95,84	50,17	10,43	4,9
Решение обратной задачи по зашумленным (8%) синтетическим входным данным	94,9	37,2	10,08	6,29

Из таблицы 1 видно:

- значения параметров трещин, полученные из решения обратной задачи по синтетическим входным данным без наложения шума, практически совпадают с исходными (отклонение не более 1%);
- отклонение вычисленных значений параметров трещин от исходных величин увеличивается с ростом степени зашумленности синтетических данных.

Таким образом, в данном эксперименте квазирешение обратной задачи существует и непрерывно зависит от входных данных. На единственность квазирешения указывает тот факт, что начальные приближения для параметров трещин находились на достаточно большом отдалении от исходных значений, а интервалы поиска параметров практически полностью охватывают допустимые физические границы соответствующих величин (Табл. 1).

6. Сравнение предлагаемого и классического подходов

Для сравнения описанного и классического подходов проведена интерпретация трассерных исследований на опытном участке пласта, содержащем одну нагнетательную и три добывающих скважины (Рис. 7). На рисунке 8 показаны модельные и фактические кривые отклика. Видно, что координаты вершин пиков и площади под графиками близки друг к другу.

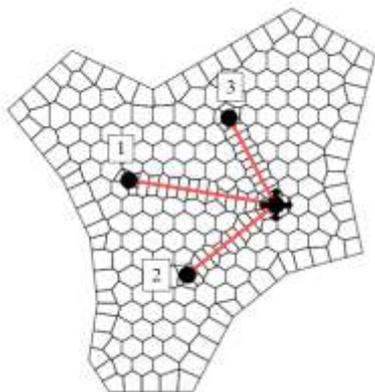


Рис. 7. Расчетная сетка и взаимное расположение скважин для расчета на опытном участке пласта; цифрами обозначены номера скважин, линиями – трещины, черными точками – добывающие скважины, черной точкой со стрелками – нагнетательная скважина

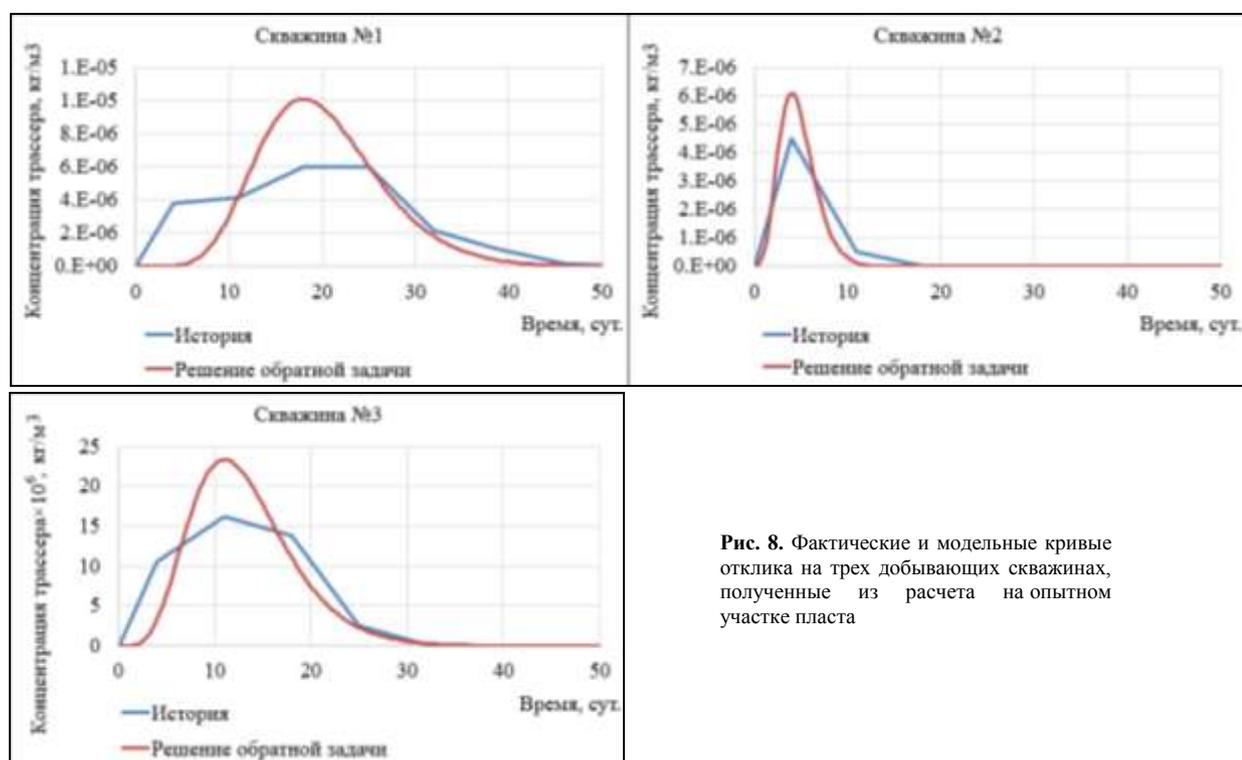


Рис. 8. Фактические и модельные кривые отклика на трех добывающих скважинах, полученные из расчета на опытном участке пласта

Таблица 2. Параметры каналов НФС, вычисленные с помощью классического метода [1, 2] по формулам (1) и (2)

Номер канала НФС	Проницаемость, мкм^2	Объем, м^3
1	4241	0,64
2	10573	0,03
3	3171	0,61

В таблице 2 приведены параметры каналов НФС, вычисленные на основе классического подхода к интерпретации [1, 2] по формулам (1) и (2). В таблицах 3, 4 представлены параметры трещин, вычисленные предложенным методом интерпретации. Объемы трещин в таблицах 3 и 4 вычислялись как произведение ширины раскрытия, длины и высоты трещины. Номера трещин и каналов НФС совпадают с номерами добывающих скважин, с которыми они соединены.

По данным таблицы 2 видно, что проницаемость канала №2 выше проницаемости двух других каналов. Это связано с тем, что пиковая концентрация трассера достигла добывающей скважины №2 раньше,

Таблица 3. Параметры трещин, вычисленные с помощью дискретной модели трещины (без перетоков между трещиной и пластом)

Номер трещины	Проницаемость (мкм ²)	Ширина (мм)	Объем (м ³)
1	4060	0,019	0,27
2	10396	0,001	0,01
3	2973	0,031	0,29

чем двух других скважин (Рис. 8). Кроме того, канал №2 имеет относительно маленький объем (0,03 м³) из-за низкого значения накопленного отбора трассера на скважине №2, что хорошо просматривается на рисунке 8 (величина отбора пропорциональна площади под графиком кривой отклика).

Из таблиц 2 и 3 следует, что результаты классической интерпретации довольно близки к результатам интерпретации с помощью дискретной модели трещины без учета перетоков между трещиной и пластом: проницаемости отличаются не более чем на 5%, а объемы — на 50%. Ввиду радикального отличия использованных методов интерпретации отклонение в 50% можно считать допустимым. Описанное наблюдение указывает на то, что проведенные расчеты верны (в частности, численная дисперсия не оказывает существенного влияния на результат) и постановка обратной задачи корректна.

Сравнивая содержимое таблиц 3 и 4, можно заключить, что учет перетоков между трещиной и пластом сильно влияет на вычисленные объемы трещин — они возрастают не менее чем в 200 раз. Такое различие связано с тем, что существенная часть трассера по мере движения по трещине перетекает в пласт.

Таблица 4. Параметры трещин, вычисленные с помощью дискретной модели трещины (с перетоками между трещиной и пластом)

Номер трещины	Проницаемость (мкм ²)	Ширина (мм)	Объем (м ³)
1	7962	4,35	62,6
2	13960	1,92	21,0
3	4798	4,83	46,4

7. Заключение

Предложен метод интерпретации трассерных исследований, основанный на представлении высокопроницаемых каналов фильтрации в виде дискретных трещин, соединяющих забои добывающих и нагнетательных скважин. Проведена верификация модели и построен устойчивый алгоритм решения обратной задачи. На примере с двумя трещинами показано, что квазирешение обратной задачи существует и непрерывно зависит от входных данных.

Показано, что при отсутствии перетоков между трещиной и пластом результаты интерпретации с помощью представленного метода близки к результатам классической интерпретации, а наличие перетоков увеличивает оцениваемый объем трещин в 200 и более раз. Последнее наблюдение согласуется с результатами, полученными в работе [6].

Установлено, что если в действительности добывающая и нагнетательная скважины соединены друг с другом некоторой сетью вертикальных трещин с проницаемыми стенками, то классический метод интерпретации может дать заниженную и неадекватную оценку объема этих трещин.

Сделанные выводы можно распространить и на случаи, когда высокопроницаемые каналы представляют собой горизонтальные пропластки с вертикальными перетоками. Хотя в горизонтальных пропластках линии тока трассера между скважинами будут иметь не линейный, а радиальный характер, специфика влияния перетоков на оцениваемый объем трещин останется прежней.

Работа выполнена при поддержке ООО «Уфимский НТЦ» и РФФИ (проект № 17-41-020226-р_а).

Литература

1. Чернокожев Д.А. Совершенствование технологии индикаторных исследований для оценки фильтрационной неоднородности межскважинного пространства нефтяных пластов / Дисс... канд. техн. наук: 25.00.10. Дубна, 2008. 141 с.
2. Соколовский Э.В., Соловьев Г.Б., Тренчиков Ю.И. Индикаторные методы изучения нефтегазоносных пластов. М.: Недра, 1986. 157 с.
3. Захаров В.П., Исмаилов Т.А., Телин А.Г., Силин М.А. Регулирование фильтрационных потоков водоизолирующими технологиями при разработке нефтяных месторождений. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2010. 225 с.
4. Abbaszadeh-Dehghani M., Brigham W.E. Analysis of well-to-well tracer flow to determine reservoir layering // J. Petrol. Tech. 1984. Vol. 36, No. 10. P. 1753-1762. DOI
5. Agca C., Pope G.A., Sepehrnoori K. Modeling and analysis of tracer flow in oil reservoirs // J. Petrol. Sci. Eng. 1990. Vol. 4, No. 1. P. 3-19. DOI

6. Ильясов А.М., Булгакова Г.Т. Моделирование течения вязкой жидкости в магистральной вертикальной трещине с проницаемыми стенками // ММ. 2016. Т. 28, № 7. С. 65-80.
7. Palagi C.L., Aziz K. Use of Voronoi grid in reservoir simulation // SPE Adv. Tech. 1994. Vol. 2, No. 2. P. 69-77. DOI
8. Karimi-Fard M., Durlofsky L. J., Aziz K. An efficient discrete-fracture model applicable for general-purpose reservoir simulators // SPE Journal. 2004. Vol. 9, No. 2. P. 227-236. DOI
9. Peaceman D.W. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir Simulation with nonsquare grid blocks and anisotropic permeability // SPE Journal. 1983. Vol. 23, No. 3. P. 531-543. DOI
10. Киреев Т.Ф., Булгакова Г.Т., Хатмуллин И.Ф. Моделирование полимерного заводнения с использованием сетки Вороного // Вычисл. мех. сплош. сред. 2018. Т. 11, № 1. С. 15-24. DOI
11. Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. М.: Наука, 1978. 206 с.
12. Nelder J.A., Mead. R. A simplex method for function minimization // Comput. J. 1965. Vol. 7, No. 4. P. 308-313. DOI

References

1. Chernokozhev D.A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii indikatornykh issledovaniy dlya otsenki fil'tratsionnoy neodnorodnosti mezhskvazhinogo prostranstva neftyanykh plastov* [Improvement of the technology of indicator studies for assessing the filtration heterogeneity of the interwell space of oil reservoirs]. PhD Dissertation, Dubna, 2008, 141 p.
2. Sokolovskiy E.V., Solov'yev G.B., Trenchikov Yu.I. *Indikatornyye metody izucheniya neftegazonosnykh plastov* [Tracer methods for studying oil and gas reservoirs]. M.: Nedra, 1986, 157 p.
3. Zakharov V.P., Ismagilov T.A., Telin A.G., Silin M.A. *Regulirovaniye fil'tratsionnykh potokov vodoizoliruyushchimi tekhnologiyami pri razrabotke neftyanykh mestorozhdeniy* [Regulation of filtration flows by waterproofing technologies in the development of oil fields]. M.: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2010, 225 p.
4. Abbaszadeh-Dehghani M., Brigham W.E. Analysis of well-to-well tracer flow to determine reservoir layering. *J. Petrol. Tech.*, 1984, vol. 36, No. 10, pp. 1753–1762. DOI
5. Agca C., Pope G.A., Sepehrnoori K. Modeling and analysis of tracer flow in oil reservoirs. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 1990, vol. 4, No. 1, pp. 3-19. DOI
6. Ilyasov A.M., Bulgakova G.T. Modelirovaniye techeniya vyazkoy zhidkosti v magistral'noy vertikal'noy treshchine s pronitsayemymi stenkami [Modeling of viscous fluid flow in a vertical main fracture with permeable walls]. *Matematicheskoye modelirovaniye – Mathematical modeling*, 2016, vol. 28, No. 7, pp. 65-80.
7. Palagi C.L., Aziz K. Use of Voronoi grid in reservoir simulation. *SPE Advanced Technology Series*, 1994, vol. 2, No. 2, pp. 69-77. DOI
8. Karimi-Fard, M., Durlofsky, L. J., Aziz, K. An efficient discrete-fracture model applicable for general-purpose reservoir simulators. *SPE Journal*, 2004, vol. 9, No. 2, P. 227-236. DOI
9. Peaceman D.W. Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir Simulation with nonsquare grid blocks and anisotropic permeability. *SPE Journal*, 1983, vol. 23, No. 3, pp. 531-543. DOI
10. Kireev T.F., Bulgakova G.T., Khatmullin I.F. Modeling of polymer flooding using Voronoi grid. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2018, vol. 11, No. 1, pp. 15-24. DOI
11. Ivanov V.K., Vasin V.V., Tanana V.P. *Teoriya lineynykh nekorrektnykh zadach i eye prilozheniya* [Theory of linear ill-posed problems and its applications]. M.: Nauka, 1978. 206 p.
12. Nelder J.A., Mead. R. A simplex method for function minimization. *Comput. J.*, 1965, vol. 7, No. 4, pp. 308-313. DOI

Приложение. Динамика прорыва воды по трещине в добывающую скважину

Принято считать, что высокопроницаемые каналы между скважинами всегда вызывают преждевременный прорыв воды в добывающую скважину. Для проверки этого тезиса выполнено моделирование прорыва воды по дискретной трещине в добывающую скважину с помощью решения задачи двухфазной фильтрации по линейному закону Дарси:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_w}{B_w} \right) \right] + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_w}{B_w} \right) + q_w \delta_{well} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_o}{B_o} \right) \right] + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_o}{B_o} \right) + q_o \delta_{well} = 0,$$

$$S_w + S_o = 1,$$

$$\mathbf{u}_w = - \frac{kk_{rw}}{\mu_w} \text{grad } p,$$

$$\mathbf{u}_o = - \frac{kk_{ro}}{\mu_o} \text{grad } p,$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}_\Gamma} \right|_\Gamma = 0,$$

$$p \delta_{well} = P_{bh},$$

$$S_w(t=0) = 0,$$

$$S_w \delta_{well, inj} = 1.$$

Используются следующие обозначения: s_w и s_o — водо- и нефтенасыщенность соответственно; B_w, B_o — объемные коэффициенты воды и нефти; u_w, u_o — скорости фильтрации воды и нефти; q_w, q_o — дебит (расход) воды и нефти; k_{rw}, k_{ro} — относительные фазовые проницаемости воды и нефти; μ_w, μ_o — вязкости воды и нефти. Все остальные обозначения аналогичны обозначениям раздела 2.

Для тестового двухфазного расчета применялась модель из раздела 4 с аналогичными параметрами. Фазовые проницаемости считались линейными. Вязкости воды и нефти равнялись 0,5 и 2 мПа·с соответственно. Расчет проведен для двух значений проницаемости трещины: 500 и 10 мкм². Перетоки между трещиной и пластом включены. На рисунке 9 показано поле водонасыщенности в пласте и в трещине после 500 суток заводнения. На рисунке 10 изображен график обводненности добывающей скважины.

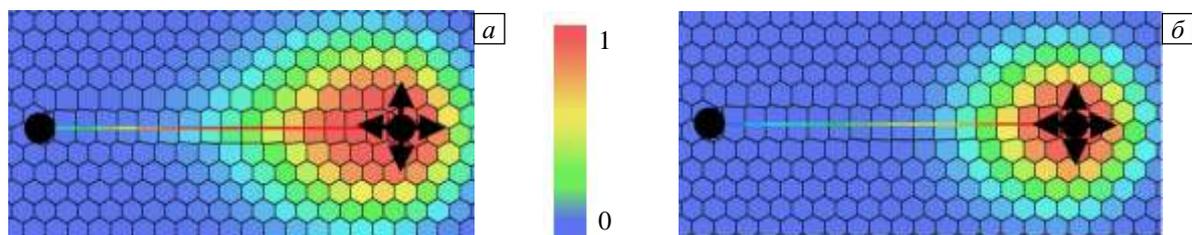


Рис. 9. Поле водонасыщенности в двухфазном расчете после 500 суток заводнения при различной проницаемости трещины, мкм²: (а) – 500; (б) – 10

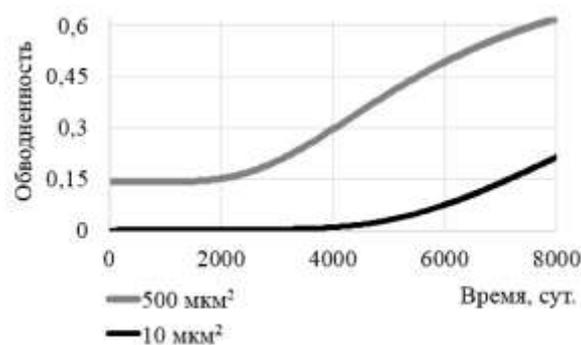


Рис. 10. Динамика обводненности добывающей скважины в двухфазном расчете для двух значений проницаемости трещины

По рисунку 9а видно, что при проницаемости трещины 500 мкм² после 500 суток заводнения вода достигает добывающей скважины; в этом случае прорыв воды по трещине происходит мгновенно и повышает обводненность добывающей скважины до значения 0,15 (см. Рис. 10).

Однако при проницаемости трещины 10 мкм² вода, движущаяся по трещине, не достигает добывающей скважины на момент 500 суток (Рис. 9б); обводненность при этом начинает расти только после 4000 суток заводнения (Рис. 10), и инициирует этот рост вода, текущая по пласту, а не по трещине. Данный эффект возникает из-за того, что давление в трещине вблизи добывающей скважины падает ниже пластового давления, нефть из пласта втекает в трещину и препятствует движению воды.

На рисунке 11 приведено поле давления в случае, когда проницаемость трещины близка к бесконечной (1000000 мкм²). Самая высокая точка поверхности указывает на расположение нагнетательной скважины, а самая низкая точка — на расположение добывающей скважины. Видно, что вблизи нагнетательной скважины давление в трещине выше давления в пласте, значит, нагнетаемая вода будет вытекать из трещины в пласт. Примерно посередине между двумя скважинами давление в трещине становится равным давлению в пласте. Вблизи добывающей скважины давление в трещине падает ниже давления в пласте, и нефть из пласта будет втекать в трещину и препятствовать движению нагнетаемой воды по трещине.

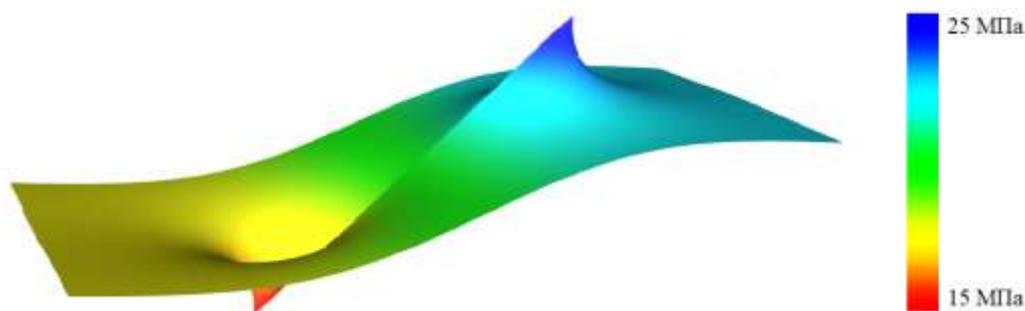


Рис. 11. Пластовое давление в двухфазном расчете при проницаемости трещины, близкой к бесконечной; вертикальная координата каждой точки поверхности отвечает давлению в этой точке

Примечательно, что на опытных участках, как правило, значения проницаемости трещин как раз составляют около 10 мкм^2 . Но даже при проницаемости 500 мкм^2 (см. Рис. 9а) водонасыщенность в трещине вблизи добывающей скважины не превышает значения 0,5, следовательно, нефть из пласта все равно будет втекать в трещину и частично блокировать прорыв воды.

Таким образом, если высокопроницаемый канал фильтрации гидродинамически связан с пластом (имеет проницаемые стенки), то прорыв воды по нему в добывающую скважину может отсутствовать. Каждой ситуации будет соответствовать некоторое минимальное значение проницаемости канала, при котором прорыв воды в добывающую скважину возможен, причем это значение может оказаться довольно большим (возможно, намного выше типичных значений проницаемости, получаемых при интерпретации трассерных исследований).

Поступила в редакцию 16.07.2018; опубликована в электронном виде 22.10.2018