



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 86 за 2010 г.



Томин П.Ю.

**О применении трассеров
для выявления
особенностей среды в
межквартирном
пространстве**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Томин П.Ю. О применении трассеров для выявления особенностей среды в межквартирном пространстве // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 86. 12 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-86>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОРДЕНА ЛЕНИНА
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М. В. КЕЛДЫША

П. Ю. Томин

**О применении трассеров
для выявления особенностей среды
в межскважинном пространстве**

Москва 2010

П. Ю. Томин, О применении трассеров для выявления особенностей среды в межскважинном пространстве

Аннотация. В работе при помощи численного моделирования исследуются процессы двухфазной фильтрации в среде с особенностью в виде зоны повышенной проницаемости, соответствующей, например, области трещиноватости. Показано, что даже при очень близких значениях добычи распределение потоков флюидов может принципиально различаться. В данном случае трассерные исследования позволяют дополнить информацию о структуре межскважинного пространства. Полученные результаты демонстрируют значимость проведения подобных исследований на месторождениях сложного геологического строения и последующего использования этой информации в процессе моделирования на этапе адаптации¹.

P. Yu. Tomin, On some tracers application to the inter-well media features studying

Abstract. In the paper, studying of two-phase flows in media with features related to presence of fractured zones is carried out using numerical simulation. It is shown that in case of coincident production rates the spatial distribution of fluid flows may be significantly different. Tracer tracking allows obtaining additional information about the inter-well media structure. The results demonstrate importance of such a studying for reservoirs with complex geological structure and usage of derived information in the history matching procedure.

Содержание

Введение.....	3
Математическая модель.....	4
Разностная схема.....	4
Результаты расчетов.....	7
Заключение.....	11
Литература.....	12

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-01-00823).

При подготовке работы использовалась вычислительная система МВС-100К в МСЦ РАН.

Введение

Основным методом поддержания пластового давления является закачка воды или газа [1]. Мониторинг процесса закачки и распространения потоков может помочь в понимании структуры неоднородности пласта, так как нагнетаемые флюиды в первую очередь устремляются в зоны с повышенной проницаемостью, например, в области трещиноватости.

Важнейшую роль в наблюдении за подземным движением флюидов играют трассерные, или индикаторные, исследования [2]. Трассером, закачиваемым совместно с водой или газом, является химический или радиоактивный элемент, обладающий следующими характеристиками:

- а) свободно перемещается вместе с носителем,
- б) никак не влияет на движение носителя.

Поэтому концентрация трассера должна быть незначительной, в связи с чем можно сформулировать еще одно свойство трассера, а именно:

- в) должен обнаруживаться при низких концентрациях.

Применение разных трассеров позволяет оценить вклад конкретной скважины в добычу нагнетаемой воды.

Ключевым этапом в процессе моделирования месторождений нефти и газа является адаптация [3]. С математической точки зрения процесс адаптации модели месторождения представляет собой решение обратной задачи [4]: рассчитанные показатели сравниваются с результатами фактических замеров, параметры модели варьируются так, чтобы достичь лучшего совпадения, причем количество параметров модели гораздо больше числа замеров, которыми обычно являются данные по добыче и закачке, значения пластового давления. Таким образом, минимизируемым функционалом является невязка между рассчитанными и фактическими значениями величин. Неизвестным параметром модели является, например, проницаемость в межскважинном пространстве. С этой точки зрения подбор параметров относится к классу обратных коэффициентных задач [5], однако им не ограничивается.

Ниже при помощи прямого численного моделирования будет показано, что в некоторых случаях анализ добычи не может дать реальной картины движения флюидов. Трассерные исследования, включая математическое моделирование, могут дополнить информацию о структуре среды, тем самым сузив класс решений обратной задачи адаптации. В частности, при помощи трассерных исследований можно обнаружить трещиноватые зоны и оценить их характеристики.

Аналогично работе [6], в которой было рассмотрено влияние трещиноватости, выявляемой при помощи электроразведки, на разработку месторождения, ниже обсуждается применимость трассерных исследований с точки зрения получения дополнительной информации о структуре межскважинного пространства.

Математическая модель

Рассматривается двухфазная фильтрация воды и нефти в рамках модели, подробно обсуждаемой в [7]. Система уравнений массового баланса дополняется уравнением, описывающим движение трассеров.

Эволюция массовой концентрации трассера C , движущегося вместе с водой, описывается уравнением переноса

$$\frac{\partial(Cm\rho_w S_w)}{\partial t} + \operatorname{div}(C\vec{F}_w) = CQ_w, \quad (1)$$

где m — пористость, ρ_w — плотность, S_w — насыщенность (объемная концентрация), \vec{F}_w — поток, Q_w — источник. \vec{F}_w и Q_w получаются из решения основной системы и не зависят от C . Здесь и далее индекс w обозначает воду, o — нефть.

Выписанные во введении свойства позволяют рассмотреть расщепление задачи по физическим процессам фильтрации и переноса и решать уравнение распространения трассеров независимо от общей системы. Соответственно, влияние движения одного трассера на другой также незначительно, в связи с чем возможно независимое рассмотрение произвольного числа трассеров, например, аналогичное уравнение может быть записано для наблюдения распространения воды из водоносного пласта.

Разностная схема

Основной задачей при моделировании распространения трассеров является отслеживание движения фронта концентрации.

Известно [8, 9, 10], что методы первого порядка аппроксимации обладают большой дисперсией и приводят к значительному размытию фронта. В связи с этим для количественного исследования распространения трассеров численными методами необходимо использовать схемы более высокого порядка.

Основная проблема построения методов второго порядка и более — нефизические осцилляции решения, возникающие из-за немонотонности схемы. С. К. Годунов показал [8] невозможность построения монотонной линейной схемы порядка больше первого.

Решением проблемы является использование схем с лимитерами [9], базирующихся на принципе TVD — невозрастания полной вариации. Такие схемы решают проблемы монотонности, однако не дают схему второго порядка в норме C : порядок аппроксимации уменьшается в точках экстремума, при этом сохраняясь в области с исключенными окрестностями точек экстремума. Расширением таких схем на двумерный и трехмерный случаи, для которых отсутствует однозначное определение понятия монотонности, является класс квазимонотонных схем. Одним из важнейших критериев, применяемых при построении подобных схем для исключения дополнительных нефизических осцилляций решения, является критерий минимальности шаблона [10].

Полноценное рассмотрение данного вопроса, однако, выходит за рамки данной работы.

С точки зрения аппроксимации по времени более предпочтительными [11] для практических расчетов являются полностью неявные схемы, являющиеся безусловно устойчивыми и позволяющие считать с шагом по времени, соответствующим шагу решения основной системы. Среди класса явных схем следует отметить методику high-throughput [12], дополняющую классическое условие устойчивости Куранта условием ожидаемого изменения неизвестной, которая позволяет использовать большие шаги по времени с сохранением преимуществ явных схем, а именно: меньшая по сравнению с неявными схемами численная дисперсия, линейная зависимость количества операций от числа узлов и легкая возможность распараллеливания.

Другим методом решения рассматриваемого уравнения является использование каскадного алгоритма [13]. Ячейки упорядочиваются по значениям «потенциала» $\Phi = p - \rho gz$ (рис. 1), p — давление, ρ — плотность, g — ускорение свободного падения, z — глубина. Из принципа аппроксимации против потока следует, что значение концентрации в ячейке будет зависеть только от значений в ячейках с большим потенциалом. Последовательно, ячейка за ячейкой, решая уравнение (1), находим значения концентрации во всей области, выражая ее для каждой ячейки напрямую через уже известные значения в других ячейках в силу линейности уравнения относительно C . В нелинейном случае необходимо решить одномерное уравнение, например, используя метод Ньютона или метод касательных.

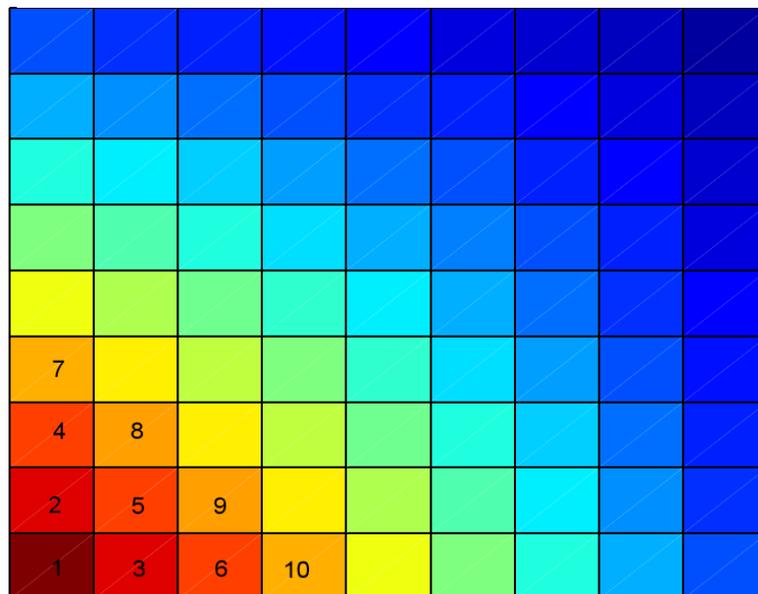


Рис. 1. Пример упорядочивания ячеек по потенциалу

В работе [14] предложен оригинальный метод для расчета закачки флюида, отличающегося по составу от пластового, в частности, содержащего некоторые примеси. При этом свойства, такие как вязкость или относительные фазовые проницаемости, зависят от концентрации этой примеси. Основная идея метода заключается в предположении сегрегации исходной и закачиваемой воды,

причем примесь переносится исключительно со вторым типом. Таким образом, сегрегация определяет не только свойства, как было предложено в работе [15], но и влияет на перенос. В [14] на ряде задач при использовании данного метода показано значительное уменьшение дисперсионных эффектов, связанных с влиянием фронта концентрации на фронт насыщенности. Однако в рассматриваемом здесь случае предполагается отсутствие влияния трассера на движение флюидов, поэтому применение метода сегрегации теряет смысл.

Выбор того или иного типа аппроксимации не является однозначным и диктуется видом конкретной задачи и поставленными перед исследованием целями. Целью данной работы является лишь исследование применимости трассеров для идентификации особенностей структуры среды в межскважинном пространстве, таких как, например, трещиноватые зоны. Поэтому, принимая во внимание все вышесказанное, для решения уравнения переноса трассеров выбрана полностью неявная схема первого порядка по пространству и времени.

Как и в [7], неизвестные отнесем к центрам ячеек расчетной сетки, потоки — к граням. Разностная схема в методе конечных объемов с использованием двухточечной аппроксимации потока [11] для уравнения (1) имеет вид

$$\hat{C}_i \hat{M}_i - C_i M_i + \tau \left(\sum_j \hat{F}_{ij} \hat{C}_{ij}^{up} - \hat{C}_s \hat{Q}_{wi}^M \right) = 0, \quad (2)$$

где i — номер ячейки в их сплошной нумерации, C_i — концентрация в i -й ячейке, $M_i = (m \rho_w S_w V)_i$ — масса воды, V — геометрический объем ячейки, \hat{F}_{ij} — поток между ячейками i и j , $Q_{wi}^M = Q_{wi} V_i$ — массовый источник, τ — шаг по времени, « $\hat{}$ » обозначает неявный слой. Для величин \hat{C}_{ij}^{up} и \hat{C}_s используется снос против потока, то есть

$$\hat{C}_{ij}^{up} = \begin{cases} \hat{C}_i, & \hat{F}_{ij} \geq 0, \\ \hat{C}_j, & \hat{F}_{ij} < 0. \end{cases}$$

$$\hat{C}_s = \begin{cases} C_i^{inj}, & Q_w^M \geq 0, \\ \hat{C}_i, & Q_w^M < 0, \end{cases}$$

C_i^{inj} — концентрация трассера в закачиваемом флюиде.

При выполнении условия консервативности $\hat{F}_{ij} = \hat{F}_{ji}$ разностной схемы для основной системы, схема для концентрации трассера также консервативна.

На основе расщепления задачи по физическим процессам, полученная система (2) решается независимо от основной системы уравнений с уже известными массой \hat{M}_i , потоками \hat{F}_{ij} и источником \hat{Q}_{wi}^M .

Результаты расчетов

Рассматривается двухфазная фильтрация воды и нефти в трехмерной области размерами $200 \times 200 \times 10$ м (рис. 2), глубина кровли — 2000 м. Глубина водонефтяного контакта 2008 м, давление на кровле в начальный момент составляет 200 бар. Разностная сетка равномерная и прямоугольная, размеры $20 \times 20 \times 10$. В области расположены три скважины. Добывающие скважины PRD1 и PRD2 имеют перфорации в ячейках (15, 5, 3) и (5, 15, 3) соответственно. Пять перфораций закачивающей скважины INJ1 находятся в ячейках $(5, 5, i)$, $i = 4, \dots, 8$. Такую конфигурацию можно рассматривать как элемент пятиточечной схемы разработки [1]. Добывающие скважины работают в режиме с фиксированным забойным давлением, равным 150 бар, приемистость нагнетательной скважины равна $100 \text{ м}^3/\text{сут}$, максимальное забойное давление — 250 бар. Рассчитываются 5 лет разработки.

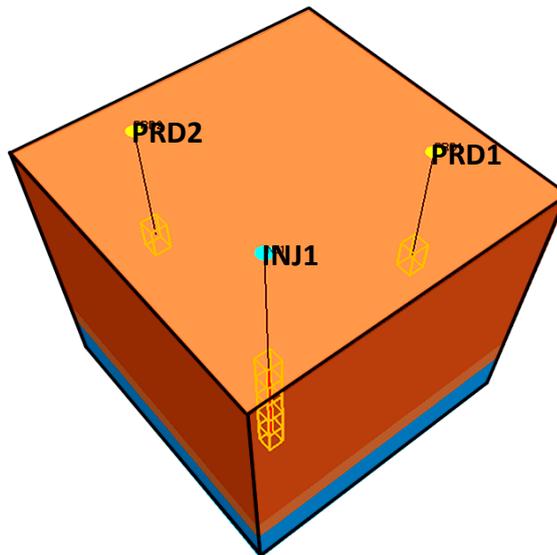


Рис. 2. Вариант без особенностей

В базовом варианте без особенностей проницаемость по всей области постоянна и равна

$$\hat{K} = \begin{pmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K}{1000} \end{pmatrix}, \quad \text{где } K = 5 \text{ мД.}$$

Далее рассматриваются два варианта с модификацией поля проницаемости вблизи добывающей скважины PRD1. В первом случае (рис. 3) в столбце ячеек (16, 5) с 4 по 10 слой задается

$$\hat{K} = 20 \begin{pmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & K \end{pmatrix}.$$

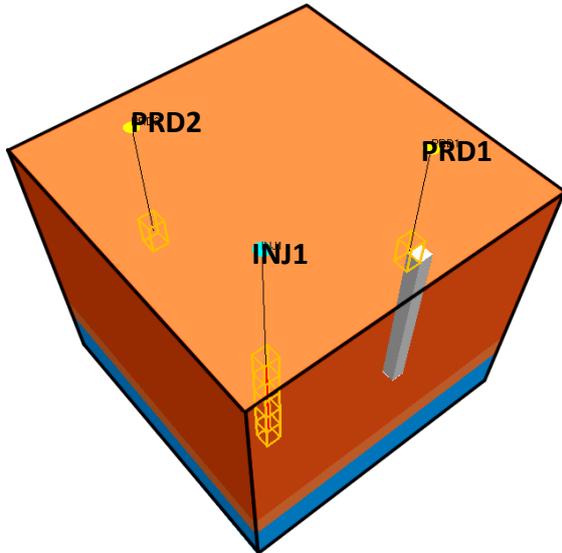


Рис. 3. Вариант 1

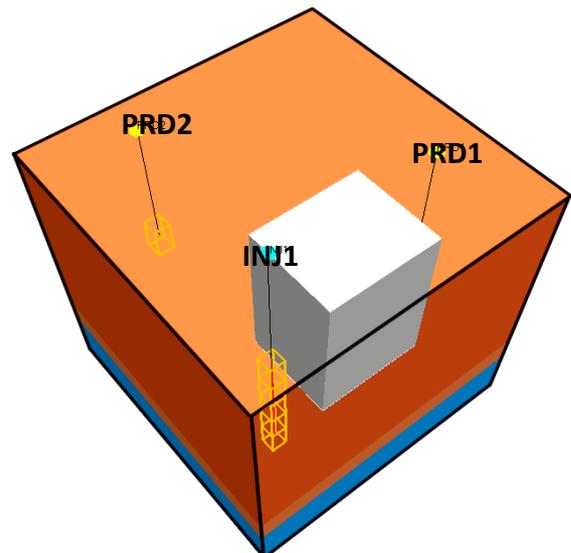


Рис. 4. Вариант 2

Во втором случае (рис. 4) в блоке ячеек (7:13, 3:8, 1:5) задается

$$\hat{K} = \begin{pmatrix} 100K & 0 & 0 \\ 0 & 100K & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K}{10} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, в обоих случаях областью повышенной проницаемости моделируется трещиноватая зона, напрямую не связанная со скважиной, что налагает дополнительные трудности в ее прямом обнаружении.

Пусть $q_\alpha(t)$ — мгновенный поток флюида α . Добычей за интервал времени от T_1 до T_2 называется величина

$$Q_\alpha^{T_1 \rightarrow T_2} = \int_{T_1}^{T_2} q_\alpha(t) dt.$$

Обводненностью называется отношение

$$W_{\text{cut}}(t) = \frac{q_w(t)}{q_w(t) + q_o(t)}.$$

Ниже приведены графики добычи воды с временным интервалом месяц и обводненности для двух добывающих скважин во всех трех вариантах. «Осцилляции» добычи связаны с разницей числа дней в месяце.

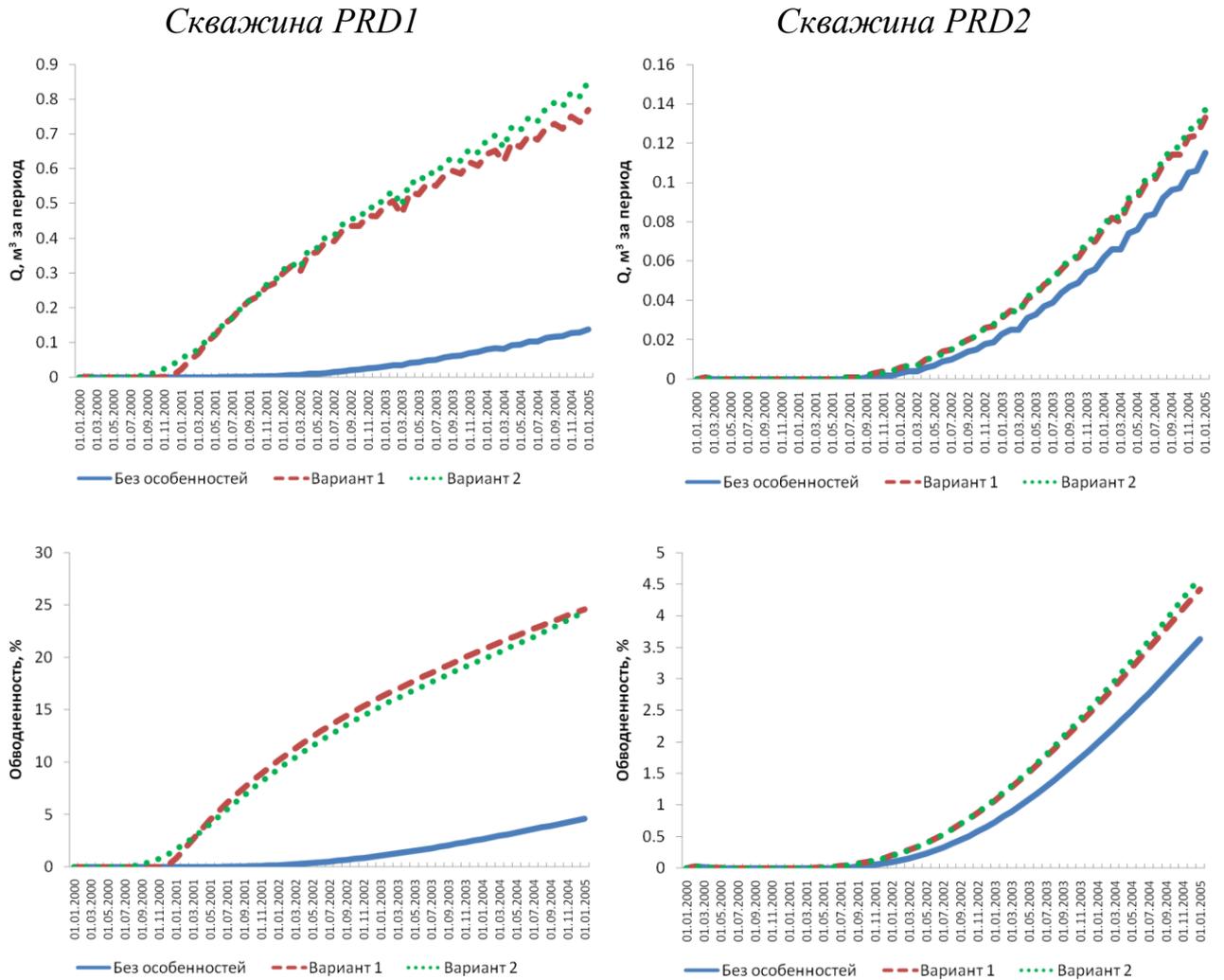


Рис. 5. Показатели разработки: добыча воды и обводненность

Показатели для вариантов 1 и 2 (рис. 5) оказываются очень близки друг к другу, как качественно, так и количественно, однако, как будет показано ниже, добываемая вода в каждом из них имеет свою природу.

В варианте без особенностей в силу симметрии задачи добыча по скважинам PRD1 и PRD2 полностью совпадает.

На рис. 6 представлено распределение добычи воды по ее типу. Обозначено: INJ — вода от закачивающей скважины, RES — вода, изначально находящаяся в пласте. Видно, что в этом случае основной приток воды из скважины приходится на пластовую.

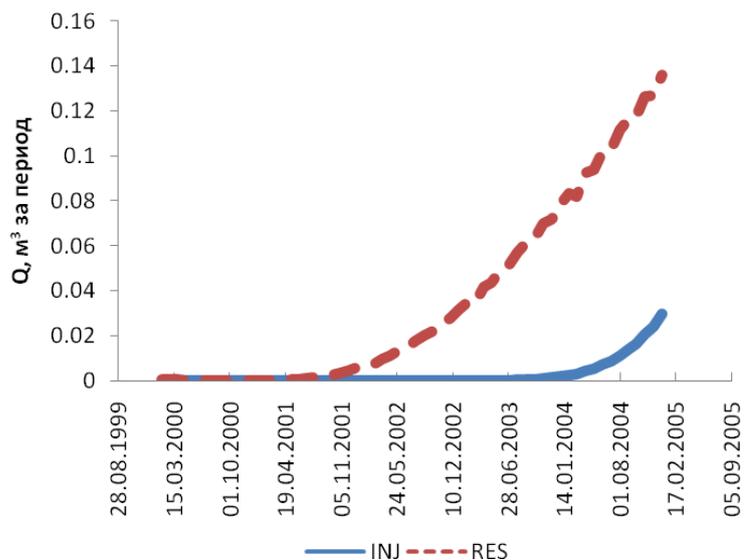


Рис. 6. Вариант без особенностей: скважины 1, 2

Рассмотрим далее Вариант 1 (рис. 7).

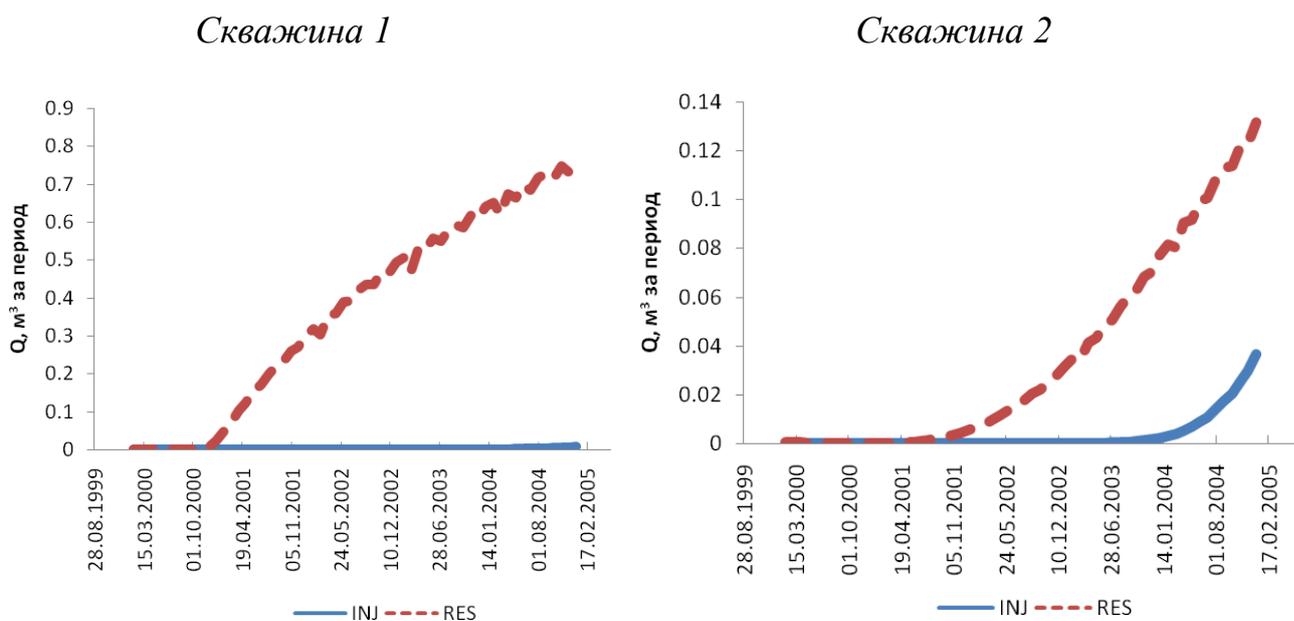


Рис. 7. Вариант 1

Видно, что добыча по скважине 2 изменилась по сравнению с исходным вариантом слабо, в то время как характер добычи на первой скважине изменился принципиально: основную роль играет поток пластовой воды.

Перейдем к варианту 2 (рис. 8).

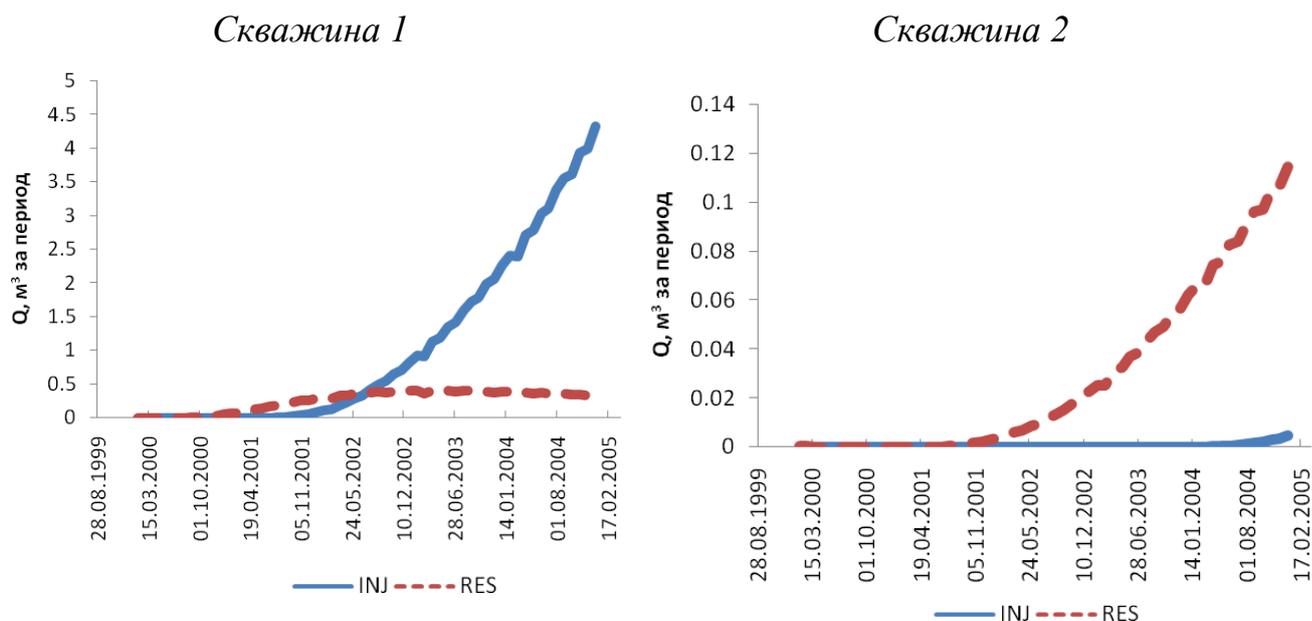


Рис. 8. Вариант 2

Опять же, скважина 2 добывает почти аналогично варианту без особенностей. По первой скважине ситуация изменилась кардинально: основная вода приходит от нагнетательной скважины.

Рассмотренный пример наглядно демонстрирует, насколько принципиальной может быть разница в характере распределения флюидов при видимой схожести по показателям добычи и закачки, которые являются основными параметрами, которые контролируются в процессе адаптации модели. Именно в подобных случаях использование индикаторных исследований может значительно дополнить картину фильтрационных течений.

Заключение

Рассмотрены аспекты применения трассерных исследований с точки зрения получения дополнительной информации о структуре среды.

Проведено прямое численное моделирование типичной задачи с наличием особенности — трещиноватой зоны, не связанной со скважиной. Показано, что несмотря на очень близкие показатели добычи воды по скважинам, реальная картина распределения потоков, получаемая по данным трассеров, оказывается принципиально разной.

Полученные результаты еще раз подтверждают высокую степень важности проведения трассерных исследований в первую очередь на месторождениях, имеющих, например, особенности в виде разломов и трещин. Соответственно при проведении адаптации модели, то есть при решении некорректной обратной задачи, моделирование распространения трассеров позволяет дополнить информацию о системе, в частности, оценить пространственное распределение и коэффициент проницаемости трещиноватых зон.

Автор выражает благодарность Д. Ю. Максимова за массу ценных замечаний и предложений при обсуждении данной работы.

Литература

1. Д. Уолкотт, Разработка и управление месторождениями при заводнении. М.: ЮКОС–Schlumberger, 2001.
2. E. Ali, C. Chatzichristos, T. Aurdal, J. Muller, Tracer Simulation to Improve the Reservoir Model in the Snorre Field. SPE 64796, 2000.
3. К. Е. Закревский, Д. М. Майсюк, В. Р. Сыртланов, Оценка качества 3D моделей. М.: ООО «ИПЦ Маска», 2008.
4. А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин, Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
5. А. Н. Наумов, Решение обратной коэффициентной задачи для уравнения фильтрации. Препринт ИПМ № 6, Москва, 2006.
6. М. Ю. Заславский, П. Ю. Томин, О моделировании процессов многофазной фильтрации в трещиноватых средах в применении к задачам адаптации модели месторождения. Препринт ИПМ № 45, Москва, 2010.
7. Н. А. Марченко, А. Х. Пергамент, С. Б. Попов, В. А. Семилетов, П. Ю. Томин, Иерархия явно-неявных разностных схем для решения задач многофазной фильтрации. Препринт ИПМ № 97, Москва, 2008.
8. S. K. Godunov, Finite-Difference Method for Computing Discontinuous Solutions to Fluid Dynamics Equations. Math. Sbornik, 47 (3), PP. 271–306, 1959.
9. А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов, Математические вопросы численного решения гиперболических уравнений и систем. М.: Физматлит, 2001.
10. Yu. V. Radvogin, N. A. Zaitsev, Multidimensional minimal stencil supported second order accurate upwind schemes for solving hyperbolic and Euler systems. KIAM RAS Preprint, N. 22, 1996.
11. X. Азиз, Э. Сеттари, Математическое моделирование пластовых систем. М: Недра, 1982.
12. C. Palagi, Generation and Application of Voronoi Grid to Model Flow in Heterogeneous Reservoirs. Ph.D. dissertation, Stanford University, 1992.
13. F. Kwok, H. Tchelepi, Potential-based reduced Newton algorithm for nonlinear multiphase flow in porous media. J. Comput. Phys, 227, PP. 706–727, 2007.
14. A. M. AlSofi, M. J. Blunt, The Self-flattering Nature of Trailing Shocks in Augmented Waterflooding – Segregation-in-flow Reestablish Self-sharpness, Proceedings of ECMOR XII, A004, 2010.
15. M. R. Todd, W. J. Longstaff, The Development, Testing, and Application of a Numerical Simulator for Predicting Miscible Flood Performance, SPE 3484, 1972.