

Решения задачи структурно-параметрической идентификации модели контура питания для нефтяного месторождения

V.P. Kosyakov

3 марта 2020 г.

Abstract. При моделировании разработки нефтяного месторождения одним из важнейших шагов является решение обратной задачи, решение которой, как правило, заключается в подборе параметров модели для наилучшей настройки на историю разработки. Однако целью моделирования является не только повторение показателей разработки на историческом периоде, но и получение достоверного прогноза поведения моделируемого объекта в будущем. Поэтому с точки зрения долгосрочных прогнозных характеристик модели необходимо выполнение не только параметрической, но и структурной идентификации модели. В данной работе на примере решения задачи структурно-параметрической идентификации модели водоносного контура (аквифера) для моделирования разработки нефтяного месторождения проведено исследование прогнозных характеристик. Показано, что в результате выполнения структурно-параметрической идентификации модели ее прогнозные свойства могут быть существенно улучшены по сравнению со случаем обычной параметрической идентификации.

Keywords: обратная задача, структурно-параметрическая идентификация, моделирование, аквифер

1 INTRODUCTION

В процессе моделирования разработки нефтяного месторождения одним из важнейших шагов является решение обратной задачи, которое, как правило, заключается в подборе параметров модели для наилучшей настройки на историю разработки. В свою очередь, целью моделирования является не только повторение показателей разработки на историческом периоде, но и получение достоверного прогноза поведения моделируемого объекта. Выбор математической модели определяется целями и задачами, для решения которых она будет использована. В рассматриваемом случае целью является получение качественного прогноза. Исходя из требований задач адаптации и прогнозирования, задача идентификации заключается в определении структуры и параметров математической модели, обеспечивающих удовлетворительное описание исторических данных и имеющих наилучшие прогнозные характеристики.

Для оценки прогнозных характеристик модели часто используют разбиение исторического периода на 2 временных интервала: на первом производят адаптацию модели, на втором валидацию - оценку прогнозных свойств модели. В работе [1] было показано, что наилучшая адаптация не обязательно обладает наилучшими прогнозными свойствами, которые в значительной степени зависят от сложности выбранной модели. Кроме того, прогнозные характеристики зависят от конкретных условий (управляющих параметров) работы модели на этапах адаптации и валидации.

В настоящей работе представлено исследование зависимости прогнозных характеристик модели от согласованности режимов работы на этапах адаптации и валидации. На примере задачи структурно-параметрической идентификации модели водоносного горизонта для нефтяного месторождения, показана важность структурной идентификации для долгосрочных прогнозных характеристик модели. В качестве прогнозируемого параметра выступает пластовое давление, характеризующее “энергетический” потенциал залежи. Выбор модели водоносного контура важен для получения приемлимых прогнозных характеристик с точки зрения энергетического состояния объекта разработки. В условиях интенсивной разработки месторождения [2], к которой можно отнести эксплуатацию в режиме истощения, разбуривание новых скважин, формирование системы поддержания пластового давления, массивную остановку скважин и т.д. изменение пластового давления может быть существенно.

2 Used Mathematical Models

Для решения поставленной задачи в качестве фильтрационной модели использовалась двумерная математическая модель однофазной фильтрации слабо сжимаемой жидкости [3]. Для моделирования поведения водоносного контура использовался набор из 4-х моделей разной степени сложности [4],[5]. Сложность модели определяется количеством настраиваемых параметров. Обозначим через $F(P_{aq}, P, \nu)$ - функцию описывающую приток жидкости, которая в общем случае зависит от среднего давления в аквифере P_{aq} , давления в расчётной области P и от вектора параметров ν . Исследование проводилось для четырёх моделей водоносного горизонта:

1. модель позволяющая описать поведение изолированного объекта, не имеет адаптируемых параметров (M1);
2. модель постоянного давления на контуре питания (аквифер бесконечного объёма), имеет один настраиваемый параметр (M2);
3. модель аквифера конечного объёма, имеет 2 настраиваемых параметра (M3);
4. модель аквифера конечного объёма с удалённым контуром питания - 3 настраиваемых параметра (M4).

Таким образом систему уравнений можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \nabla \sigma \nabla P = \beta^* h \frac{dP}{dt} + \delta(x, y) \\ q_{aq} = F(P, \nu) \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{при } (x, y) \notin \Gamma_{in} \cup \Gamma_{out} \\ q_j, & \text{при } (x, y) \in \Gamma_{in} \\ q_{aq}, & \text{при } (x, y) \in \Gamma_{out} \end{cases} \quad (2)$$

$$P|_{t=0} = P_{aq}|_{t=0} = P_0$$

где σ - гидропроводность, P - пластовое давление, β^* - эффективная сжимаемость, h - эффективная толщина, q_j - расход жидкости в j скважине, Γ_{in} - множество координат источников/стоков (скважин), Γ_{out} - внешняя граница, P_0 - пластовое давление в начальный момент времени $t = 0$.

Модели водоносного контура (M1-M4) можно описать следующими уравнениями:

$$q_{aq} = 0 \quad (3)$$

$$q_{aq} = \lambda \sigma (P|_{\Gamma_{out}} - P_c) \quad (4)$$

$$\beta^* V_{aq} \frac{dP_{aq}}{dt} = \lambda \oint_{\Gamma_{out}} \frac{\sigma}{h} (P - P_{aq}) dl \quad (5)$$

$$\beta^* V_{aq} \frac{dP_{aq}}{dt} = \lambda \oint_{\Gamma_{out}} \frac{\sigma}{h} (P - P_{aq}) dl + \kappa (P_{aq} - P_c) \quad (6)$$

где V_{aq} - объём аквифера, P_c - давление на контуре питания ($P_c = P_0$), P_{aq} - давление в аквифере, λ - коэффициент продуктивности аквифера, κ - продуктивность удалённой зоны. Таким образом вектор $\nu = [\lambda, V_{aq}, \kappa]$, для модели аквифера M4.

При использовании (1) - (2) решается обратная задача, которая заключается в минимизации целевой функции J , в качестве которой выступает МАРЕ (mean absolute percentage error). Аргументами целевой функции выступают фактические и расчётные значения пластового давления в точках расположения скважин. Целевая функция записывается следующим образом:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{p_c^i - p_f^i}{p_f^i} \right| \quad (7)$$

где p_c - расчётное значение пластового давления, p_f - фактическое значение, N - общее количество замеров. Решение задачи находится при использовании градиентного оптимизационного алгоритма и заключается в определении набора параметров модели соответствующих минимуму J и удовлетворяющих ограничениям в виде неравенства: $\nu_{min} \leq \nu \leq \nu_{max}$.

В фильтрационную модель был введён настраиваемый параметр a - множитель на гидропроводность, таким образом, в (1) $\sigma = a \cdot \sigma_0$, где σ_0 - начальное приближение для гидропроводности, $a > 0$.

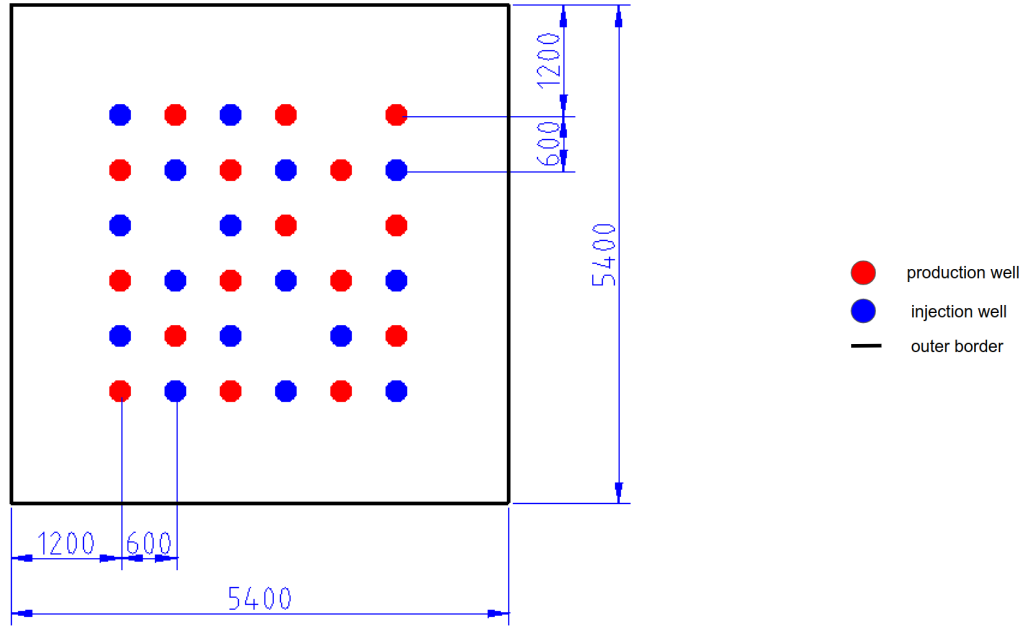


Рис. 1: Схематическое представление расчётной области.

Следовательно для решения задачи адаптации необходимо будет определить значения вектора параметров $\mathbf{u} = [a, \nu]$, $\nu \in \mathbf{\nu}$ длиной от 1 до 4. Значение градиента целевой функции для компонент можно записать в следующем виде:

$$\frac{dJ}{du} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} \left(\frac{p_c^i - p_f^i}{p_f^i} \right) \frac{dp_c^i}{du} \quad (8)$$

Таким образом для решения обратной задачи необходимо чтобы

$$\frac{dJ}{du} \rightarrow 0 \quad (9)$$

Решение прямой (1-2) и обратной (9) задачи находилось численно в неявном виде при использовании двумерной неструктурированной сетки.

3 CALCULATION

В качестве примера, была решена обратная задача структурно-параметрической идентификации для нефтяного месторождения. Для решения задачи необходим набор данных (размеры расчётной области, расположение скважин и показателей разработки по скважинам: расходы жидкости и давления), который был получен при помощи синтетической гидродинамической модели. Эти данные выступали в качестве "фактических" значений.

Схема расположения скважин представлена на рисунке 1. Месторождение разрабатывается при помощи 16 добывающих и 16 нагнетательных скважин. Период разработки составляет 10 лет, контур питания был "подключён" по периметру расчётной области. Для решения задачи структурно-параметрической идентификации период разработки был разбит на 3 интервала: 72, 24 и 24 месяца, соответственно:

1. с 01-2000 по 12-2005 период адаптации;
2. с 01-2006 по 12-2007 период валидации;
3. с 01-2008 по 12-2009 период прогноза.

На временном интервале адаптации решается обратная задача для всех 4-х моделей, находятся неизвестные параметры. На интервале валидации оцениваются прогнозные характеристики настроенной модели, и осуществляется выбор модели, обладающей наилучшими прогнозными характеристиками. Дополнительно был выделен 3-й интервал - интервал прогноза, на котором производится оценка

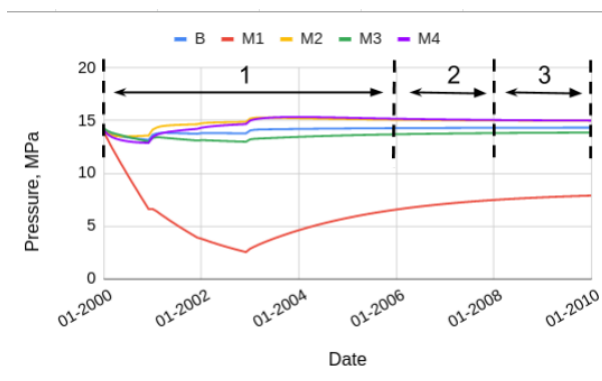


Рис. 2: Динамика среднего пластового давления при разных моделях водоносного горизонта

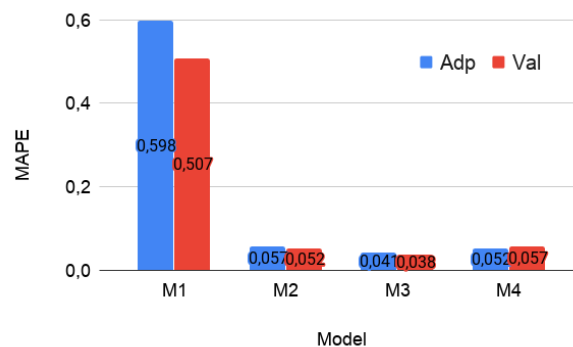


Рис. 3: MAPE для этапов адаптации (adp) и валидации (val)

поведения выбранной модели при значительном изменении управляющих параметров. Временной интервал для этапа адаптации выбирался таким образом, чтобы он включал в себя поэтапный ввод в эксплуатацию всех скважин и был достигнут стационарный режим эксплуатации. Этап валидации включает в себя период стационарной работы месторождения.

Для этапа прогнозирования было рассчитано 3 сценария эксплуатации для каждой модели, и произведено сопоставление поведения основных параметров разработки. В качестве сценариев были рассчитаны: S0 - стационарный режим работы при котором не меняется объём нагнетаемой жидкости, S1 - двукратное сокращение объёма нагнетаемой жидкости и S2 - двукратное увеличение объёма нагнетаемой жидкости по сравнению со сценарием S0.

На рисунке 4 представлена динамика среднего пластового давления для фактических данных (B - базовый вариант) и всех моделей водоносного горизонта (M1-M4 модели аквифера). На рисунке 3 в виде гистограммы показаны значения целевой функции (7) для интервалов адаптации (adp) и валидации (val). Из рисунков видно, что модель M1 обладает наихудшими показателями как на этапе адаптации так и на этапе экзамена. Значение целевой функции примерно на порядок больше, чем у остальных моделей, следовательно, модель M1 наименее пригодна для описания поведения моделируемого объекта и в дальнейших исследованиях она использоваться не будет. Наилучшими характеристиками для адаптации и валидации обладает модель M3. Модели M2 и M4 имеют удовлетворительные значения целевой функции. Если сравнивать только две эти модели, то M4 лучше описывает историю, а M2 - имеет лучшие прогнозные свойства, соответственно выбор из этих двух моделей необходимо осуществлять используя некоторые другие критерии например такие как BIC ([1]).

На практике, как правило, решается только задача адаптации, и выбор модели осуществляется экспертно. Отбраковка моделей производится в основном по критерию не превышения ошибки, заложенной в различных регламентах (обычно от 5 до 25%). Соответственно модели M2-M4 ввиду сравнительно малого отличия их показателей могут быть равновероятно выбраны в качестве прогнозирующих моделей. Действительно, наиболее ярко отличие динамики давления для разных моделей наблюдается в начальный период - при вводе новых скважин и выходе на стационарные режимы работы скважин. При стационарных режимах модели имеют близкие прогнозные характеристики.

Интересным является поведение адаптированной модели при значительном (экстремальном) изменении режима работы скважин, реализованы в сценариях S1 и S2. На рисунке 4 представлена динамика среднего пластового давления для трёх моделей (M2-M4) при трёх сценариях разработки (S0-S2). Как видно из графиков, поведение кривых давления при одинаковых сценариях (S1 и S2) для разных моделей различны. Отличие заключается не только в значениях пластового давления, но и в динамике его изменения. Соответственно прогнозные показатели каждой модели будут существенно отличаться.

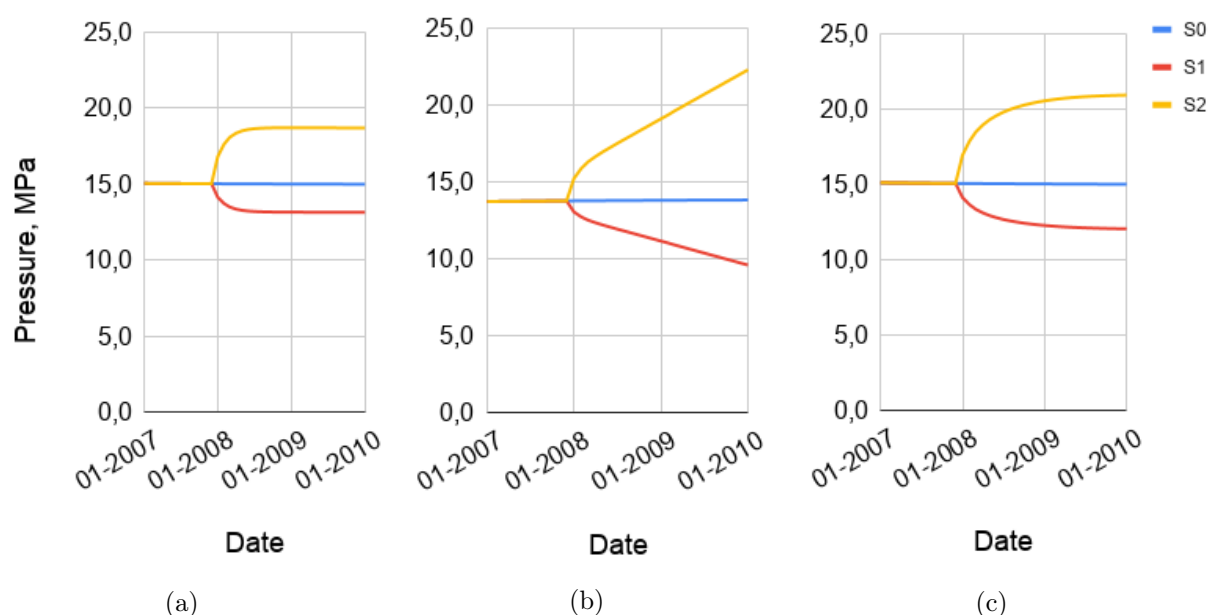


Рис. 4: Динамика среднего пластового давления для 3-х моделей водоносного горизонта при 3-х сценариях разработки, где а, b и с соответствуют M2, M3 и M4.

4 CONCLUSIONS

В результате исследования было показано, что получить удовлетворительное решение обратной задачи можно используя модели различной степени сложности. Помимо качества настройки модели на историю разработки - качества адаптации, также необходимо оценивать её прогнозные свойства. Проведение процедуры валидации позволяет осуществить выбор модели, имеющей наилучшие прогнозные характеристики. Кроме того, в работе было продемонстрировано, что качество прогноза помимо, сложности модели, зависит от схожести сценариев разработки на которых адаптировалась и валидировалась модель. При значительном отличии прогнозируемых режимов от тех, на которых была осуществлена настройка модели, прогнозные свойства модели резко снижаются. По мере поступления фактических данных необходимо заново проводить процедуру структурно-параметрической идентификации.

5 FUNDING

The research was carried out within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research of the state academies of sciences in 2013-2020 (project No. AAAA-A17-117030610130-1).

Список литературы

- [1] E.N.Musakaev, S.P.Rodionov, D.Y.Legostaev, V.P.Kosyakov, «Parameter identification for sector filtration model of an oil reservoir with complex structure» // AIP Conference Proceedings 2125,030113 2019;
- [2] V.P.Kosyakov, D.Y.Legostaev, «Computational technology for solution of the reverse problem of filtration theory for oil fields with an aquifer» // AIP Conference Proceedings 2125,030112 2019;
- [3] К.С.Басниев, Н.М.Дмитриев, Р.Д.Каневская, В.М.Максимов. Подземная гидромеханика. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006.
- [4] L.P.Dake, Fundamentals of Reservoir Engineering (Elsevier, Amsterdam, 1978).
- [5] M.J.Fetkovich. A Simplified approach to water influx calculations – Finite aquifer systems. J. Pet. Tech. July 1971, vol. 23, is. 7, pp. 814-828.