

DOI 10.25689/NP.2019.1.102-115

УДК 622.276.5:553.984

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ

Закиров Р.Х.

ТатАСУ

THE MODELS APPLICATION AT THE OIL FIELDS DEVELOPMENT

Zakirov R.Kh.

TatASU

E-mail: zakirov_rkh@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены особенности выбора моделей при разработке месторождений нефти в зависимости от поставленных перед разработчиком целью и задачами. Показаны роль и место различных видов и способов моделирования, взаимосвязь и назначение моделей при исследовании строения залежей нефти и процессов при их разработке в зависимости от степени изученности.

Выявлено, что усложнение модели приводит к увеличению неопределенности при адаптации модели ввиду избыточности идентифицируемых параметров. Показано, что требования к приближению адаптируемых показателей с большей точностью, чем погрешность закладываемых в модель параметров, являются нецелесообразными.

Повышение сложности и увеличение размерности модели целесообразно при обеспеченности данными необходимой полноты и достоверности, при адекватности модели реальному объекту и процессам, а также экономической эффективности применения результатов моделирования на практике.

Ключевые слова: геолого-гидродинамическое моделирование, физические и математические модели, адаптация модели, эмпирические и полумпирические модели, адекватность модели.

Abstract. The paper deals with the features of the models choice at the oil fields development, depending on the goal and objectives delivered to the developer. The role and place of various types and methods of modeling, the relationship and purpose of models in the study of the structure of oil deposits and processes during their development, depending on the degree of knowledge, are shown. It is revealed, that the complication of the model leads to an increase in uncertainty in the adaptation of the model due to the redundancy of the identified parameters. It is shown, that the requirements for approximation of the adapted indicators with higher accuracy than the error of the parameters, put into the model, are

inexpedient. Increase in the complexity and the growth in the dimension of the model is advisable while providing the data with the necessary completeness and reliability, while the model is adequate to the real object and processes, as well as to the economic efficiency when applying the results in practice.

Key words: *geological and hydrodynamic modeling, physical and mathematical models, adaptation of the model, empirical and semi-empirical models, the adequacy of the model*

Нефтяная отрасль является сложнейшим симбиозом явлений и процессов различного пространственного масштаба, подчиняющихся физическим законам микро- и макромира, связанных с процессами, длительностью порядка 10-100 миллионов лет и порядка секунд одновременно.

По словам известного ученого нефтяника Фореста Крейга: «Наука о разработке нефтяных месторождений является одной из немногих прикладных наук, имеющих дело с системой, которую в целом нельзя ни увидеть, ни взвесить, ни измерить, ни исследовать» [1]. Поэтому применение моделей при исследованиях и выработке запасов является объективной необходимостью.

Сегодня под термином «модель» в области разработки месторождений принято подразумевать компьютерную модель, представляющую совокупность программного обеспечения и технических средств.

Существует множество определений термина, которые применимы к различным сферам деятельности. Приведем некоторые из них.

Модель – образ некоторой системы; аналог (схема, структура, знаковая система) определенного фрагмента природной или социальной реальности, «заместитель» оригинала в познании и практике [2].

Модель – любой образ, аналог (мысленный или условный: изображение, описание, схема, чертеж, график, план, карта и т.п.) какого-либо объекта, процесса или явления (оригинала данной модели) [3].

Исходя из этих определений, в нефтяной отрасли моделирование применяется практически с самого начала разработки месторождений, когда появились представления об условиях залегания нефти в продуктивных пластах. На этапе до появления компьютеров результаты геологического моделирования представляются в виде таблиц, графиков, карт, профилей, схем корреляции и т.д., которые рассчитывались ручными графическими методами.

Необходимость применения моделей диктуется совокупностью объективных факторов, с которыми приходится сталкиваться в процессе добычи нефти. Главный из них – в скважинной технологии разработки месторождений, которая позволяет получить информацию о геологическом строении, свойствах пород лишь по ничтожному объему исследуемого объекта. Наиболее достоверная и полная информация об объекте может быть получена только при бурении скважин с полным отбором керна и проведением геолого-технических исследований. Только по скважинам могут быть выполнены прямые измерения таких характеристик как пористость, проницаемость, минерально-вещественный состав пород, характер насыщения и других, определяющих весь процесс фильтрации флюидов в пласте. Для восстановления характеристик остальной части природного резервуара и создания представлений об объекте в целом исследователи неизбежно прибегают к моделям.

Наиболее распространенными методами исследования в геологии являются геофизические методы (скважинные, сейсмические, гравиметрические и др.). Их перечень, как в техническом, так и в методическом плане достаточно широк и, непрерывно развиваясь, охватывает все больший спектр различных свойств и характеристик пород, слагающих продуктивные пласты.

Однако, как бы ни совершенствовались геофизические методы, они были и остаются косвенными методами измерения.

В основе этих, еще раз подчеркнем, косвенных измерений лежат модели (эмпирические, физические, химические и т.д.), по которым производится интерпретация измеренных приборами физических величин. Т.е. уже на стадии получения исходных данных мы сталкиваемся с использованием моделей. Зачастую, когда создаются модели залежей, мы «забываем», что уже опираемся на модельные величины с определенной погрешностью, и стремимся к достижению максимального приближения к ним.

Одним из простейших и распространенных способов применения моделирования – это интерполяция свойств и параметров пластов, имеющих количественную характеристику. К ним относятся как структурные отметки, так и фильтрационно-емкостные свойства. Существует множество методов и алгоритмов интерполяции, которые приводят к существенным отличиям в конечном представлении об объекте. На первом этапе это относится главным образом к представлениям о структурном строении пластов. На следующем этапе после создания структурной модели производится распределение свойств на весь объем геологического объекта. Для этого используются либо методы интерполяции, либо функциональные зависимости свойств, полученные и аппроксимированные определенными видами функций.

Таким образом, независимо от методов измерения, способов моделирования, совершенства математического аппарата и программных средств, квалификации специалистов, создание моделей строения нефтяных залежей объективно связано с отклонениями от реальных объектов.

Ввиду многогранности процессов, происходящих при нефтедобыче, разработка нефтяных месторождений является объектом множества естественнонаучных и технических дисциплин: геологии, механики, физики, минералогии и т.д. Соответственно и моделирование относится к

различным направлениям исследований.

По своей направленности модели делятся на статические и динамические. К статическим относятся модели строения и свойств объекта (структура залегания отложений, вещественный состав, структура порового пространства и т.п.), к динамическим – процессы при добыче (движение флюидов, процесс вытеснения, изменения свойств флюидов и т.п.).

По способам моделирования модели разделяются на физические (свойства горных пород, процессы фильтрации, аналоговые модели и т.д.) и математические (теоретические, эмпирические, полуэмпирические).

Следует отметить, что физическое моделирование является фундаментом для геологического и гидродинамического моделирования. При этом необходимо соблюдение принципа правдоподобия при переходе от физических моделей к реальным объектам [4].

На основе физического моделирования развиваются математические модели, технология и технические средства исследований, методы интерпретации геолого-промысловых и физико-химических исследований процесса разработки месторождений, представления о геологическом строении отложений в макро- и микромасштабе, совершенствуются методы поиска месторождений углеводородного сырья, теория их разработки.

Прежде чем перейти к геолого-гидродинамическому моделированию разработки месторождений, отметим еще один метод моделирования, который имел место в истории развития моделирования месторождений и в настоящее время потерял актуальность ввиду развития численных методов и вычислительной техники. Это электрофизическое аналоговое моделирование, суть которого заключается в замене пласта его электрофизическим аналогом. Наибольшее распространение аналоговые резистивно-емкостные сетки, электролитические модели,

потенциометрические модели. Такое моделирование возможно ввиду инвариантности законов фильтрации и законов электродинамики [5,6].

Указанным выше моделям свойственны некоторые недостатки. Основная проблема заключается в том, что для каждого пласта создается уникальная модель. Это обходится слишком дорого, причем нельзя изменять свойства моделей в процессе ее исследования, кроме того, электрические сеточные модели могут быть таких значительных размеров.

Применение электрофизического аналогового моделирования было вызвано отсутствием аналитических решений задач фильтрации при произвольном расположении скважин, а вычислительные методы в тот период не могли быть реализованы из-за отсутствия соответствующих технических возможностей. В то же время, задачи определения линий тока при произвольном размещении нагнетательных и добывающих скважин решались с достаточной точностью. Поэтому, хоть и кратковременный период, аналоговое моделирование помогло в развитии теории разработки.

Современное моделирование нефтяных месторождений основано полностью на математических моделях и вычислительных машинах. Для решения математических уравнений, которые описывают поведение флюидов в пористой среде с любым распределением параметров по объекту и произвольным размещением скважин, применяют численные модели и компьютеры.

Рассмотрим непосредственно аспекты применения моделирования для решения различных задач в процессе разработки реальных объектов.

В процессе моделирования решаются следующие задачи:

- 1) построение модели;
- 2) исследование модели;
- 3) использование модели.

Прежде чем, начинать моделирование в производственных условиях необходимо задаться следующими вопросами: какие задачи мы ставим

перед моделированием, насколько мы обеспечены необходимыми данными и инструментами, во что обойдется моделирование?

Рассмотрим геолого-гидродинамические модели (мы уже привыкли к тому, что под моделями понимают именно геолого-гидродинамические модели). Насколько объективно необходимы геолого-гидродинамические модели?

Приведем основные факторы, объясняющие необходимость геолого-гидродинамического моделирования.

1. Месторождение можно разработать только один раз, поэтому любая ошибка неисправима. На моделях можно выполнить эту процедуру несколько раз и изучить различные варианты.
2. Достижение, при использовании моделирования, более эффективного использования пластовой энергии, что приводит к увеличению конечной нефтеотдачи и к более экономичной разработке.
3. Объединение всех данных в одну компактную систему. Исследование разнородной интегрированной информации без моделирования невозможно.

С применением геолого-гидродинамических моделей решаются следующие задачи.

- А. Стандартные (регламентные) задачи (подсчет запасов, проектирование разработки месторождений). В соответствии с регламентами ГКЗ применяются 3D геологические и фильтрационные модели.
- Б. Производственные задачи (прогноз добычи, технологические режимы скважин, планирование и расчет эффективности ГТМ и т.п.). Используются различные программные средства: 3D и/или 2D геологические и фильтрационные модели, кривые обводнения и падения добычи и др.
- В. Исследовательские задачи.

Для различных задач модели могут отличаться по размерности

(одномерные, двумерные, трехмерные), по способам реализации (детерминированные, стохастические).

Моделирование зависит также от стадии разработки. Для каждой стадии требования к модели различны. Чем дольше разрабатываются месторождения, тем больше объем информации, тем выше может быть детальность модели.

Приведенный экспресс-обзор подходов к моделированию показывает многообразие методов, способов и средств моделирования, которые сегодня доступны в области разработки месторождений нефти.

Итак, встает вопрос: исходя из чего выбирать тот или иной подход к моделированию?

Если исключить стандартные задачи (подсчет запасов, проектирование), где выбор моделей определяется действующими регламентами, то выбор моделей при решении производственных задач и, в особенности, исследовательских задач требует обоснованного подхода.

Наряду с обеспеченностью информацией и средствами моделирования, критериями выбора служат временные и финансовые затраты, и главное, какова отдача от моделирования, каков экономический эффект от применения его результатов.

При переходе от эмпирических моделей к 2D моделям, и далее к 3D моделям, сложность модели увеличивается, соответственно возрастают и затраты. Необходимо ответить на вопросы: достигается ли поставленная цель при усложнении моделей, какова адекватность создаваемых моделей?

Под адекватностью понимается степень соответствия модели тому реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. Любая модель дает приближенное описание процесса функционирования объекта или системы.

Оценка адекватности разработанной модели реально существующей системе производится сравнением измерений на реальной системе и

результатов экспериментов на модели и может проводиться различными способами. Наиболее распространенные способы проверки адекватности: по средним значениям откликов модели и системы; по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы; по максимальному значению относительных отклонений откликов модели от откликов системы.

Математические модели являются неотъемлемой частью как при моделировании геологического строения, так и при моделировании процесса разработки. Математические модели принято делить на теоретические и эмпирические.

Они различаются по способам создания: теоретические модели являются логическим следствием фундаментальных законов естествознания или надежных гипотез, тогда как эмпирические модели получают путем математической обработки данных наблюдений. Для теоретических моделей необходимы сложные и всесторонние исследования по определению механизма явления, для эмпирических – серия экспериментов или наблюдений для установления видимой связи между явлениями. Сложность структуры теоретической модели – высокая, а эмпирической модели – невысокая. При этом теоретические модели обладают широкой областью адекватности, а эмпирические – узкой областью адекватности.

Выделяют также еще третий тип математических моделей, полуэмпирические. Отметим, что математические модели реальных залежей нефти и процессов выработки запасов, основанные на теоретических предпосылках (законах сохранения, законов движения), относятся к полуэмпирическому типу, т.к. модели проходят стадию идентификации, а компоненты модели относятся к эмпирическому типу.

Какой же тип модели выбрать, можно ли использовать эмпирические модели для решения тех или задач?

Несмотря на то, что область адекватности эмпирических моделей узкая, это компенсируется невысокой сложностью структуры и, следовательно, меньшими затратами на средства моделирования и эксплуатацию моделей. Кроме того, преимущество в адекватности у теоретических моделей нивелируется тем, что они не являются полностью теоретическими.

Степень адекватности моделей обусловлено, в первую очередь, исходными данными, закладываемыми в модели. Чем сложнее модель, тем большее число параметров требуется для обеспечения модели. При отсутствии исследований и замеров, как для статических, так и динамических моделей, при моделировании вынуждены закладывать какие-либо параметры, полученные из различных источников (осредненные, по аналогии или из других соображений). Это приводит к дополнительной погрешности модели и снижению ее адекватности.

В процессе адаптации число модифицируемых параметров превышает (часто значительно) количество адаптируемых величин. В качестве примера приведем адаптацию 3D гидродинамической модели нефтяной залежи. Адаптацию проводят по добыче нефти или жидкости (одна из величин, как правило, является заданной), забойному давлению и обводненности. При этом в качестве модификаторов могут выступать относительные фазовые проницаемости, связанная нефть и вода, распределение проницаемости по разрезу и простиранию, скин-факторы и степень связи скважины с пластом по вскрытым скважиной слоям модели и т.п. А такие параметры, как вязкость флюидов, объемные коэффициенты, газосодержание, сжимаемость и другие, задаются одинаковыми по всей залежи или по выделенным регионам.

Повышение сложности модели приводит к тому, что избыточное число модификаторов позволяет получить практически любую точность приближения к адаптируемым величинам (при достаточной квалификации исполнителя и без жестких временных ограничений), причем одинаковую

точность адаптации можно получить при существенно различных комбинациях значений модификаторов. Адекватность модели при этом оценить не представляется возможным ввиду недостаточности исследований и замеров.

В результате, величины характеристик, определяющих текущее состояние пласта, а значит, и прогнозные расчеты будут существенно зависеть от реализации адаптации, при этом мероприятия по регулированию дальнейшей разработки могут быть совершенно различными для разных реализаций.

Отдельный вопрос о точности и достоверности адаптируемых величин. На практике большая доля такой информации искажена по объективным и субъективным причинам. В частности, замеры добычи нефти и воды, забойных давлений по скважинам проводятся нерегулярно и с большой погрешностью по техническим причинам. Специалистам также известно, что эти данные могут быть существенно искажены (особенно по длительно разрабатываемым месторождениям) иными факторами субъективного характера. Попытки восстановления «истинных» данных при этом может опираться исключительно на какие-то представления авторов, по сути, на некоторые модели, и результаты не могут претендовать на абсолютность и единственность.

Закладываемые в модель характеристики в большинстве имеют погрешность 15-20 % и более. Требования к приближению расчетного значения целевых параметров (как правило, текущей и накопленной добычи нефти) с точностью 5-10 %, в этих условиях являются нецелесообразными.

Таким образом, выбор типа моделей и способов моделирования обуславливаются целым рядом факторов. Во многих случаях, при решении производственных и исследовательских задач в существующих реалиях полноты и достоверности исходных данных, целесообразно применение более простых моделей, различных эмпирических моделей, моделей «трубок тока» или 2D геолого-гидродинамических моделей, которые могут

дать результаты с необходимой точностью и полнотой при поставленных перед моделированием целях и задачах.

Применение сложных полномасштабных моделей с опциями различных эффектов оправданно в тех случаях, когда моделирование позволяет получить новые знания или кардинально изменить достоверность получаемых результатов.

Из приведенных особенностей моделирования месторождений нефти ни в коей мере не следует вывод о необходимости отказа от применения сложных 3D геолого-гидродинамических моделей. Но результаты такого моделирования (особенно количественные показатели) должны быть приняты и анализироваться с учетом тех факторов, которые были изложены и которые объективно приводят к отклонению от реальных объектов и процессов.

Сложные полномасштабные модели должны быть, в первую очередь, инструментом исследований, источником новых знаний о различных аспектах строения и разработки нефтяных залежей [7,8].

Моделирование является незаменимым инструментом при исследованиях, сравнительном анализе и оптимизации различных вариантов разработки, мероприятий по регулированию и управлению разработкой.

Выводы.

Выбор типа и сложности модели следует определять исходя из поставленной цели и задачи с учетом экономических показателей.

Усложнение модели приводит к увеличению неопределенности при адаптации модели ввиду избыточности идентифицируемых параметров.

Требования к приближению расчетного значения адаптируемых показателей с большей точностью, чем точность закладываемых в модель параметров являются нецелесообразными.

Моделирование, в первую очередь, является инструментом исследований для решения задач оптимизации и получения новых знаний об объекте и процессах.

Список литературы

1. Крейг Ф.Ф. Разработка нефтяных месторождений при заводнении. М. «Недра». 1974. 190 с.
2. Философский энциклопедический словарь / Гл. редакция: Л.Ф. Ильичев, П.Н. Федосеев, С.М. Ковалев, В.Г. Панов. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 840 с.
3. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
4. Булыгин В.Я. Правдоподобное моделирование / В. Я. Булыгин. - Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1985. - 170 с.
5. Кричлоу Г.Б. Современная разработка нефтяных месторождений - проблемы моделирования. Пер с англ. — М.: Недра, 1979. — 303 с. — Пер. изд. США, 1977.
6. Максимов М.М., Рыбicka Л.П. Математическое моделирование процессов разработки нефтяных месторождений М: «Недра», 1976, 264 с.
7. Закиров Р.Х. Особенности геолого-гидродинамического моделирования мелких и средних месторождений нефти. «Нефть. Газ. Новации» (научно-технический журнал), 2012. №6, с.50-54.
8. Закиров Р.Х., Насибуллин М.Г., Хайртдинов Р.К., Морозов В.П., Плотникова И.Н. О вскрытии перфорацией карбонатных пластов. «Нефть. Газ. Новации» (научно-технический журнал), 2013. №1, с.22-25.

References

1. Kreig F.F. *Razraborka neftyanykh mestorozhdeniy pri zavodnenii* [Development of oil fields using waterflooding]. Moscow: Nedra Publ., 1974, 190 p. (in Russian)
2. Encyclopedia of Philosophy /L.F. Il'ichev, P.N. Fedoseev, S.M. Kovalev, V.G. Panov. Moscow M.: Sov. Entsiklopediya Publ., 1983, 840 p. (in Russian)
3. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovaniye system*. [Reservoir modeling]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 343 p. (in Russian)
4. Bulygin V.Ya. *Pravdopodobnoe modelirovanie* [Reliable modeling]. Kazan: Kazan University Publ., 1985, 170 p. (in Russian)
5. Crichlow G.B. *Sovremennaya razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy – problem modelirovaniya* [Modern reservoir engineering-A simulation approach]. Moscow.: Nedra Publ, 1979, 303 p. Translated from English, 1977. (in Russian)
6. Maksimov M.M., Rybitskaya L.P. *Matematicheskoye modelirovanie protsessov razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [Mathematical modeling of oil fields development processes]. Moscow: Nedra Publ., 1976, 264 p. (in Russian)
7. Zakirov R.Kh. *Osobennosti geologo-gidrodinamicheskogo modelirovaniya melkikh i srednikh mestorozhdeniy* [Peculiar aspect of reservoir simulation modeling of small and medium-size fields]. *Neft', gaz, novatsii*, 2012. No. 6, pp.50-54. (in Russian)
8. Zakirov R.Kh., Nasibullin M.G., Khairtdinov R.K., Morozov V.P., Plotnikova I.N. *O vskrytii perforatsiey karbonatnykh plastov* [Well perforation in carbonate reservoirs]. *Neft', gaz, novatsii*, 2013, No.1, pp.22-25. (in Russian).

Сведения об авторах

Закиров Рустам Харисович, кандидат физико-математических наук, главный специалист, отдел моделирования разработки месторождений, ООО «ТатАСУ», г. Альметьевск, Республика Татарстан, Российская Федерация
E-mail: zakirov_rkh@mail.ru

Authors

Zakirov R.Kh., PhD, Chief Specialist, Department of Field Development Modeling Department, TatASU Ltd, Almeteyevsk, Republic of Tatarstan, Russian Federation
E-mail: zakirov_rkh@mail.ru

Закиров Рустам Харисович
423458, Российская Федерация, Республика Татарстан
г. Альметьевск, ул. Ризы Фахретдина, 62
тел.: 8(85594) 78-593
E-mail: zakirov_rkh@mail.ru