

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Введение

Изучение месторождение

Цель изучения месторождения, свойств пласта-коллектора, насыщающих флюидов – прогнозирование объемов добычи, целесообразности разработки и утверждение оптимального сценария разработки с точки зрения экономической рентабельности, охраны окружающей среды, коэффициента извлечения УВ.

Методы прогнозирования:

- интуитивный (основан на опыте инженера)
- по аналогии с другим месторождением,
- с помощью эмпирических корреляций, базирующихся на применении статистических уравнений
- методы характеристик (экстраполяция фактических данных)
- численное моделирование основано на физических принципах



Гидродинамическая
модель



Типы моделей

• Моделирование

• аналоговое

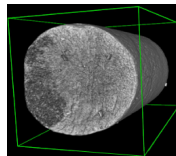
- Геофизические исследования скважин
- Лабораторные исследования керна

• физическое

- Лабораторные исследования керна, флюидов
- Гидродинамические исследования скважин

• математическое

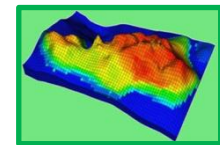
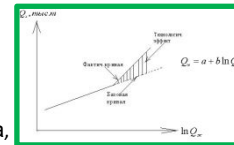
- Статическое (геологическое)
 - 2D карты, разрезы
- 3D стохастическое моделирование
- детерминированные методы



- Динамическое
- (гидродинамическое)

• аналитическое

- Уравнение материального баланса,
- уравнения характеристик, анализ кривых ооводнения



$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS}{B_w} \right) - \operatorname{div} \left(\frac{m}{B_w} (\nabla p_w - (\rho_w) \cdot g \nabla z) \right) = -q_w$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS}{B_g} \right) - \operatorname{div} \left(\frac{m}{B_g} (\nabla p_g - (\rho_g) \cdot g \nabla z) \right) = -q_{wg}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{S_w}{B_w} \right) \right) - \operatorname{div} \left(\frac{m}{B_w} (\nabla p_w - (\rho_w) \cdot g \nabla z) \right) - \operatorname{div} \left(\frac{m}{B_g} (\nabla p_g - (\rho_g) \cdot g \nabla z) \right) = -q_w - q_{wg}$$

• численное

- EOS
- Модель двойной среды
- Химические, тепловые обработки и др.

Роль геолого-технологической модели

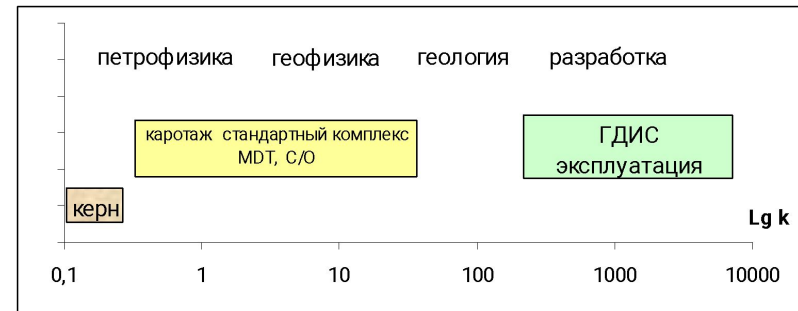
- Геологическая модель
 - ГИС
 - Сейсмика
 - керн
- Свойства флюидов
- Специальные исследования керна
 - ОФП
 - Кривые капиллярного давления
 - сжимаемость
- Промысловые данные по скважинам
 - Траектория скважины
 - Перфорация
 - Данные по добыче и давлениям
 - Геолого-технологические мероприятия
- Наземная инфраструктура

Гидродинамическая модель

Цель геолого-технологического моделирования – прогнозирование добычи, разработка сценариев

Этапы изучения месторождения:

- сейсмическое изучение площади работ,
- разведочное и эксплуатационное бурение (с и без отбора керна, испытание пластов и пр.),
- геофизическое изучение скважин (ГИС),
- лабораторное исследование керна и флюидов,
- анализ и выявление петрофизических зависимостей,
- построение трехмерной геолого-технологической модели (геологической и гидродинамической),
- расчет прогнозных показателей разработки.

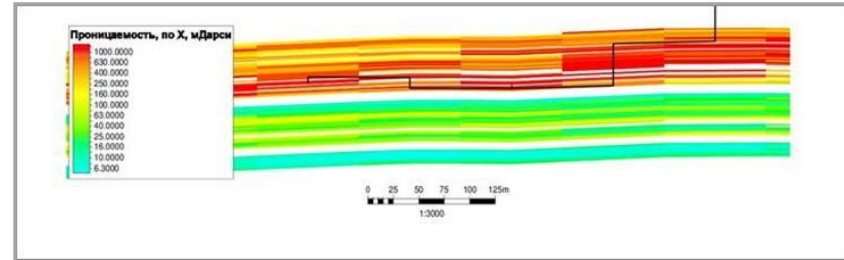
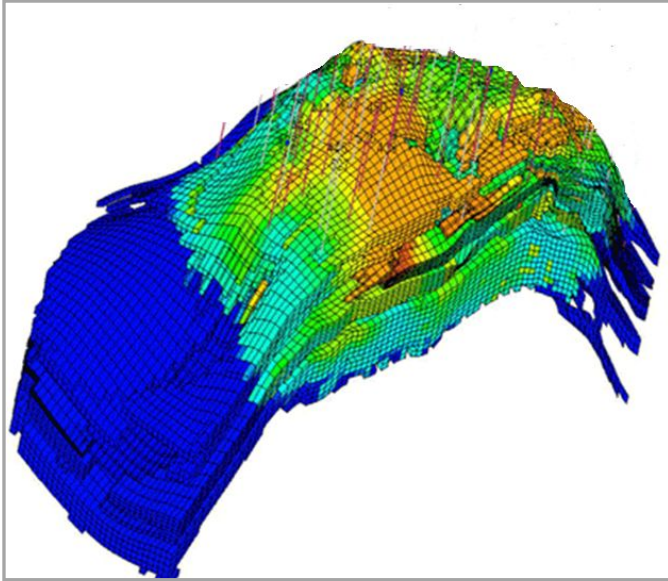


Роль геолого-технологической модели

Показатели объекта	ЭТАПЫ			
	Общая оценка территории	Поиск новых месторождений	Разведка новых месторождений	Доразведка старых и новых месторождений, эксплуатация
Изученность сырьевой базы (категории ресурсов, запасов)	прогнозные (D ₂ – D ₁) и перспективные (C ₃) ресурсы территорий и локализованных объектов	оперативно оцененные перспективные (C ₂) и промышленные (C ₁) запасы месторождений	промышленные перспективные (C ₂) и доказанные (C ₁) запасы месторождений	доказанные и разбуренные по проектам разработки запасы (C ₂ – C ₁ – B – A) месторождений
Освоение потенциальных ресурсов (%)	0 - 5	5 – 20	20 - 50	50 - 75
Единица нефтегазогеологического расчленения	нефтегазоносный комплекс	резервуар	пласт	пласт, пропласток, линза
Целевое назначение	оценка перспектив нефтеносности недр	открытие месторождения	разведка месторождения	выявление дополнительных запасов при доразведке
Уровень прогноза	глобальный, региональный	зональный	локальный	локальный (сублокальный)
Средства изучения	геологическая съемка	2D- и 3D-сейсмика, поисковое бурение	бурение разведочных скважин, многомерный анализ, исследования керна, скважин	эксплуатационное бурение, дополнительные сейсмические исследования керна, скважин, моделирование
Способ моделирования	бассейновое (на основе региональных геолого-геофизических исследований), имитационное моделирование	сейсмогеологическое (2D и 3D модели сейсмической и геологической интерпретации), имитационное моделирование (метод Монте-Карло)	трехмерные геологические модели	ГТМ
Программные продукты	DASIN VJD, DTIT, TEMIS- PACK, OPTKINI, GALOP, PIROL и др.		Irap RMS (Roxar), Landmark, Petrel (Shlumberger) и др.	ECSLIPS, Petrel (Shlumberger), TempestMORE, IRAP RMS (ROXAR) и др.
Типы моделей	регионально- геологические: геодинамическая, геомеханическая, стратиграфическая, формационная, геохимическая, литогенетическая и др.	аналоговая, сейсмогеологическая, структурная, корреляционная, палеогеографическая, палеотектоническая, литологическая, емкостная, насыщения, ресурсная, имитационная, цифровая трехмерная геологическая (ГМ)	литолого-фациальная (седиментационная), параметрическая, фильтрационная (насыщения), модели межфлюидных контактов и контуров залежей, модели структуры запасов, ГМ	ПДГМ, геолого-гидродинамическая (технологическая) (ГМ, ГТМ)

Математическое моделирование

На смену аналитических моделей пришли сложные трехмерные модели месторождений, способные визуализировать объект, что значительно облегчает процесс принятия решений по разработке.



Когда модель важнее, а когда можно ограничиться аналитическими решениями?

Что мы ждем от модели сегодня?

- В трехмерном представлении удобно анализировать процессы выработки запасов, а значит определять локализацию остаточных запасов, точки бурения.
- Моделирование процессов фильтрации сложных систем, таких как фазовые превращения, течение в системе трещин и др.
- Моделирование в условиях низкой изученности

Основная система уравнений фильтрации

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS_w}{B_w} \right) - \operatorname{div} \left(\frac{kk_{wr}}{B_w \mu_w} (\nabla p_w - (\rho_w)_r g \nabla z) \right) = -q_w$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mS_o}{B_o} \right) - \operatorname{div} \left(\frac{kk_{or}}{B_o \mu_o} (\nabla p_o - (\rho_o)_r g \nabla z) \right) = -q_o \alpha_{oo}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(m \left(\frac{S_g}{B_o} + \frac{S_o R}{B_o} \right) \right) - \operatorname{div} \left(\frac{kk_{gr}}{B_g \mu_g} (\nabla p_g - (\rho_g)_r g \nabla z) \right) - \operatorname{div} \left(\frac{R}{B_o} \frac{kk_{or}}{\mu_o} (\nabla p_o - (\rho_o)_r g \nabla z) \right) = -q_g - q_o \alpha_{og},$$

Неизвестные: p_i, S_i
 Параметры пласта и флюидов
 – функции давления и
 насыщенности

где m – пористость;

S_i – насыщенность фаз;

B_i – объемный коэффициент;

k – абсолютная проницаемость;

k_{ir} – фазовая проницаемость;

μ_i – вязкость фаз;

p_i – давление в фазах;

ρ_i – плотность фаз;

q_i – массовая скорость притока фаз;

α_{oi} – массовая доля нефти/газа в нефтяной фазе

Начальные условия:

$p_{начальное} \approx$

$p_{гидростатическое}$

S – равновесное

распределение

Граничные условия:

1) постоянное давление

$$p = \operatorname{const} \quad \left(\frac{k_r \partial p}{\mu \partial n} \right) = \operatorname{const}$$

2) постоянный переток через границу (либо его отсутствие)

3) переменный переток через

Входные данные для моделирования

- Геологическая модель

- ГИС
- Сейсмика
- Керна

- Свойства флюидов

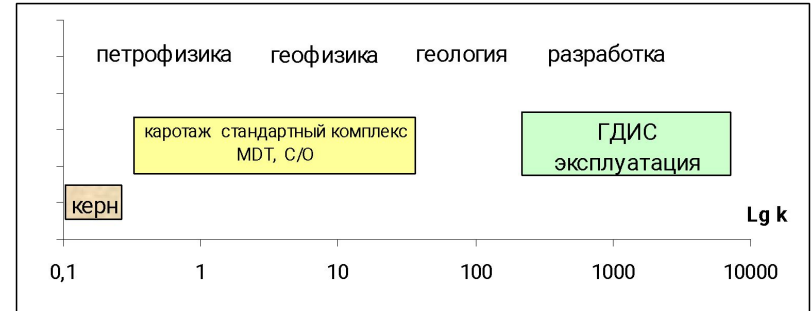
- Специальные исследования керна

- ОФП
- Кривые капиллярного давления
- сжимаемость

- Промысловые данные по скважинам

- Траектория скважины
- Перфорация
- Данные по добыче и давлениям
- Геолого-технологические мероприятия

- Наземная инфраструктура



Согласованность данных

Этапы изучения месторождения:

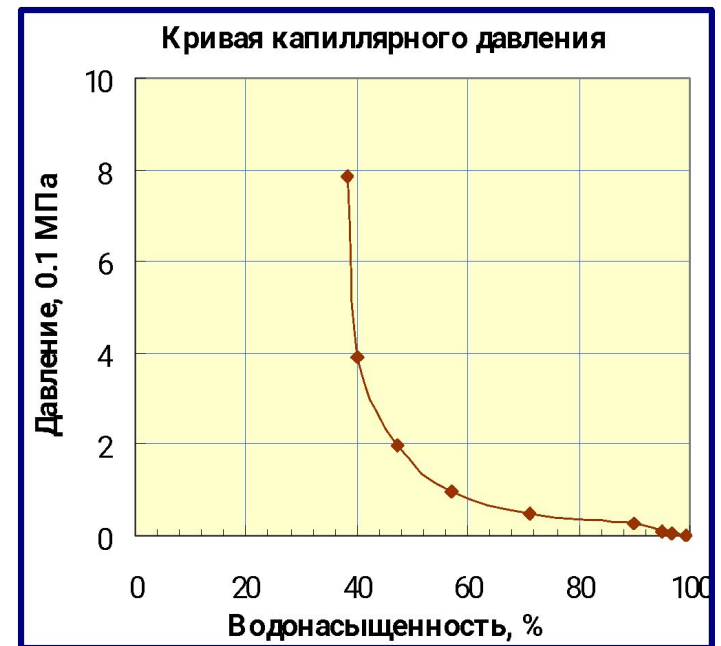
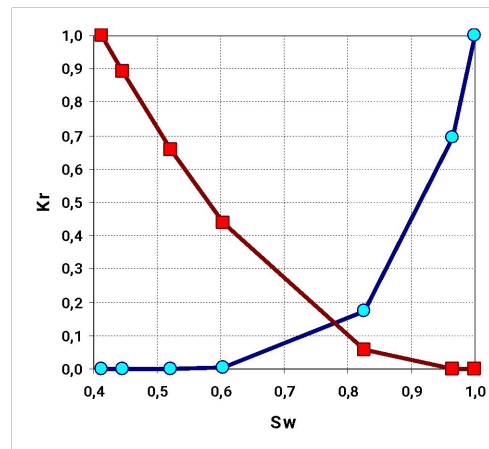
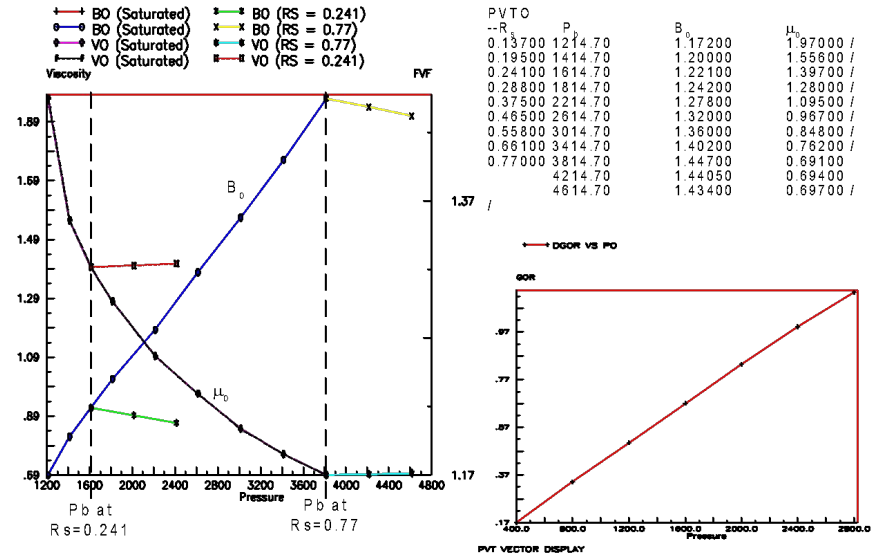
- сейсмическое изучение площади работ,
- разведочное и эксплуатационное бурение (с и без отбора керна, испытание пластов и пр.),
- геофизическое изучение скважин (ГИС),
- лабораторное исследование керна и флюидов,
- анализ и выявление петрофизических зависимостей,
- построение трехмерной геолого-технологической модели (геологической и гидродинамической),
- расчет прогнозных показателей разработки.

Гидродинамическая модель

Входные данные для моделирования

Гидродинамическая модель

- Геологическая модель
- Свойства флюидов
- Специальные исследования керна
- Промысловые данные по скважинам



Численные методы решения задач подземной гидродинамики

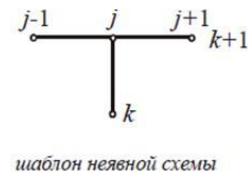
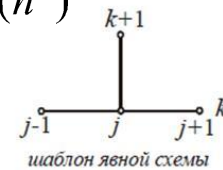
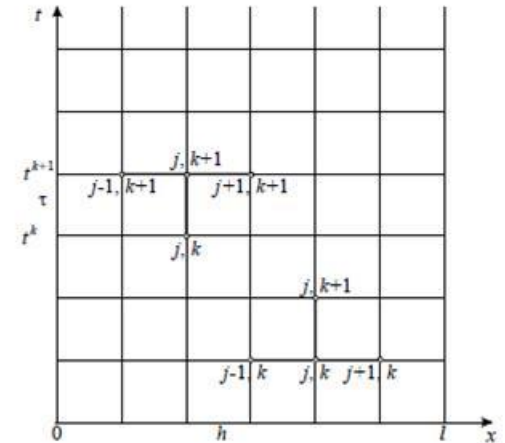
Точные аналитические решения могут быть найдены лишь в простых случаях, задачи движения флюидов в неоднородных пластах решаются численными методами, в которых решение ищется не во всех точках а лишь в узлах.

Система дифференциальных уравнений заменяется конечно-разностной системой алгебраических уравнений



$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_j^k = \frac{u_j^{k+1} - u_j^k}{\tau} + O(\tau)$$

$$\left. \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right|_j^k = \frac{u_{j+1}^k - 2u_j^k + u_{j-1}^k}{h^2} + O(h^2)$$



Получаем приближенное решение

Чем меньше шаг сетки, тем точнее расчет.

Погрешности численного моделирования

Для численного моделирования важно:
числовое определение параметров пласта и пластовых флюидов.

Несмотря даже на наличие лабораторных исследований, не всегда возможно однозначно определить зависимость параметров. Зачастую мы имеем дело с диапазоном равновероятных значений.

(отсюда прямая и обратная задачи фильтрации)

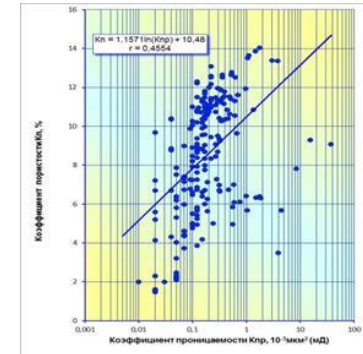
сходимость расчетной схемы, а следовательно скорость и

Миф 1 Модель может все

точность расчетов зависит от качества входных параметров

Результаты моделирования требуют тщательного анализа. В некоторых случаях аналитическая оценка (расчеты по мат. балансу, оценка работы скважин на основе аналитических решений, анализ характеристик вытеснения и кривых падения, выявление взаимосвязи между скважинами) позволяет скорректировать входные данные модели и получать уточненные результаты.

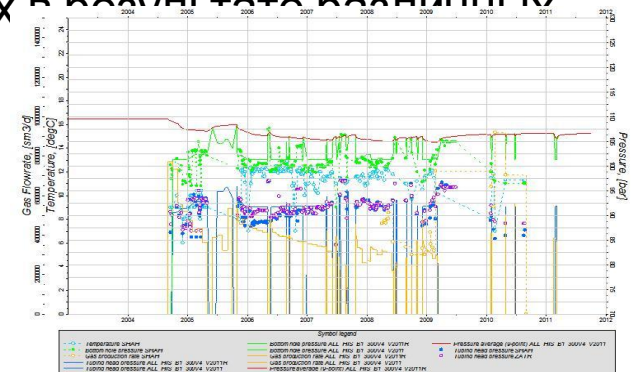
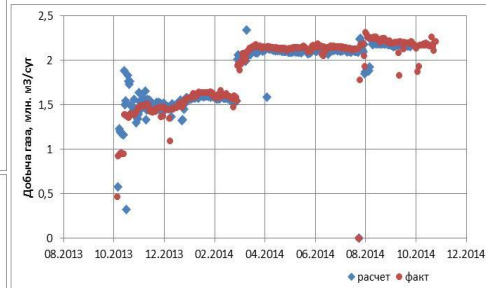
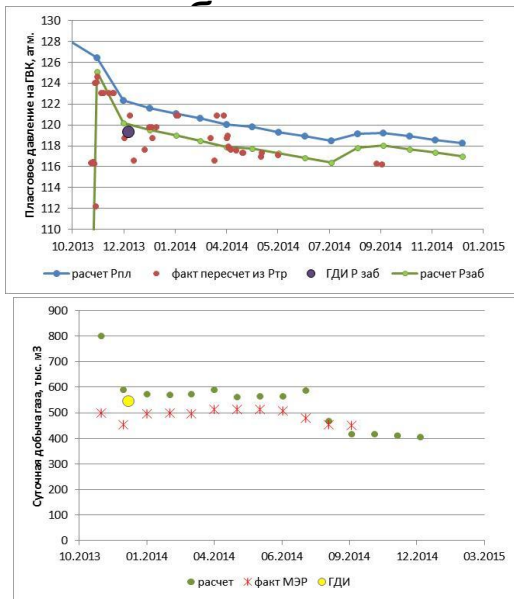
При недостатке данных усложнение модели приводит к ошибочным выводам.



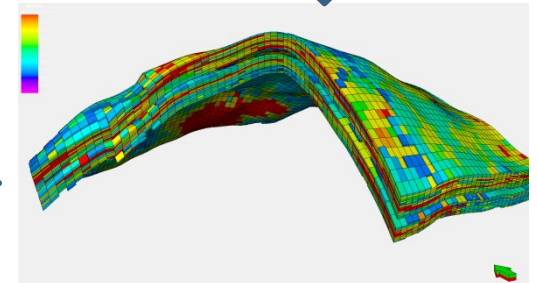
Когда нужно строить модель?

Метод адаптации

В виду большой неопределенности входных данных, связанных с недостаточным количеством проводимых исследований/ либо их отсутствием, различным характерным размером исследований и др. в результате гидродинамических расчетов можно получить различные результаты. Для уточнения входных параметров модели используют метод адаптации, который заключается в сопоставлении данных, полученных в результате исследований. Использование метода – адаптация результатов гидродинамических расчетов на историю

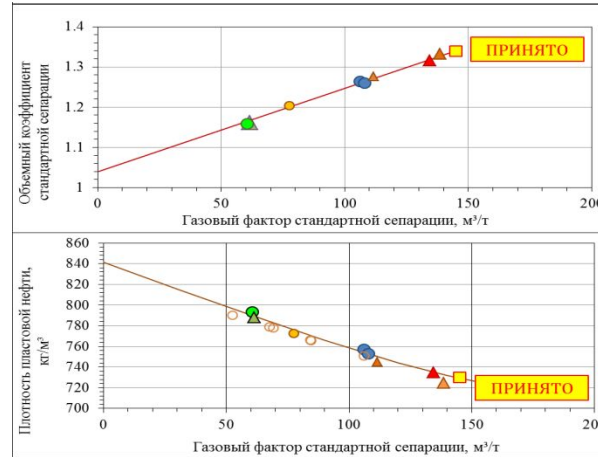
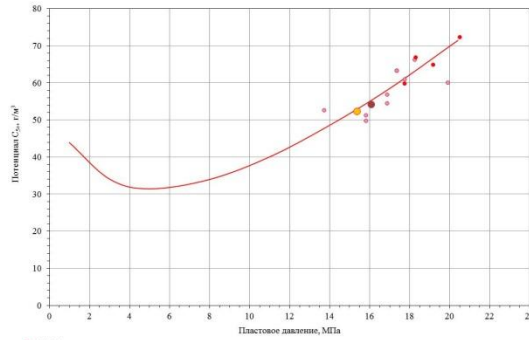


Использование метода адаптации позволяет уточнять параметры пласта и флюидов.



Метод адаптации

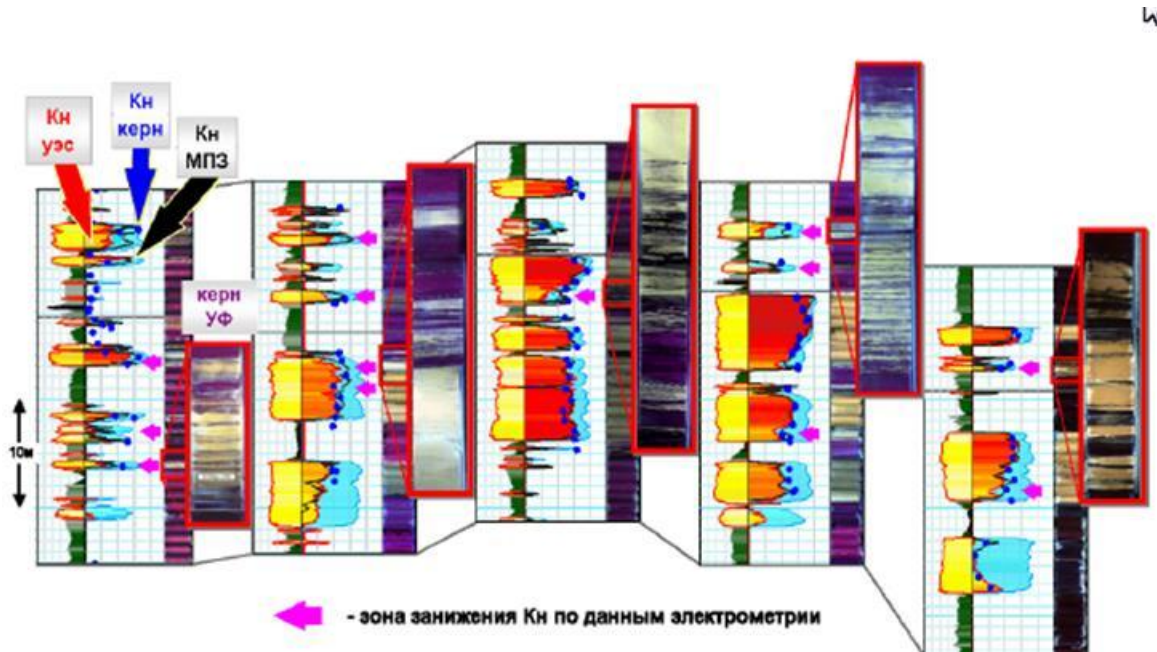
Другой пример использования метода адаптации – построение флюидальной модели.



На основе уравнения состояния путем расчета свойств компонентов углеводородной смеси рассчитывается распределение физико-химических свойств. Модель адаптируется на результаты лабораторных исследований флюидов.

Метод адаптации

Пример использования метода адаптации – построение модели насыщения.



А.В. Хабаров, 2010

Измеренное в лаборатории на образцах керн капиллярное давление может быть трансформировано в высоту положения коллекторов над зеркалом чистой воды (ВНЗЧВ). Далее, можно перестроить капиллярные данные в виде зависимости водонасыщенности от пористости и высоты над зеркалом чистой воды. Имея подобную зависимость можно рассчитать коэффициент водонасыщенности способом, независимым от данных скважинной электрометрии. Сопоставление распределения с данными по электрометрии позволит скорректировать результирующую модель насыщения.

Геологическое моделирование

Моделирование в геологии представлено детерминированными и стохастическими методами, что не всегда позволяет описать природу явлений.

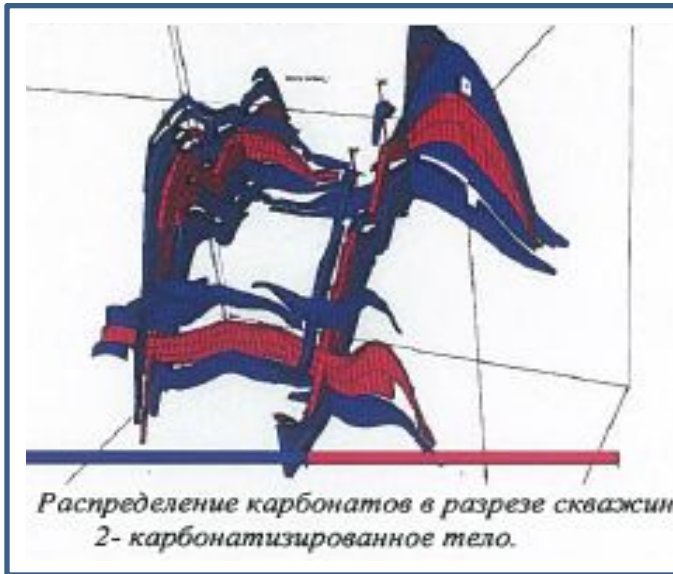


Г.С. Поротов,
2006

Рис.1.3. Схема классификации моделей геологических объектов

Контроль точности геологических построений производится по результатам гидродинамического моделирования

Корректировка геологической модели



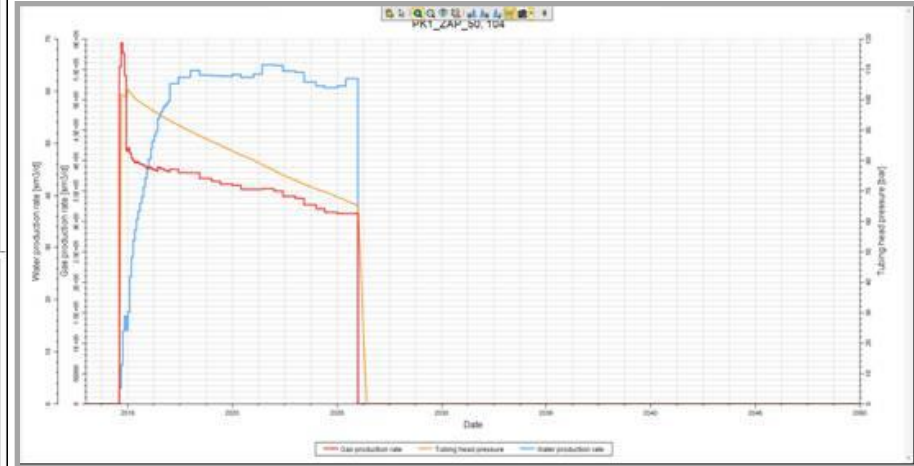
После ГРП верхней части пласта увеличилось обводнение скважин.

Выделили карбонатизированное геологическое тело, залегающее между продуктивной и водонасыщенной частями пласта. Это тело воспроизвели в модели отдельной зоной (красный цвет).

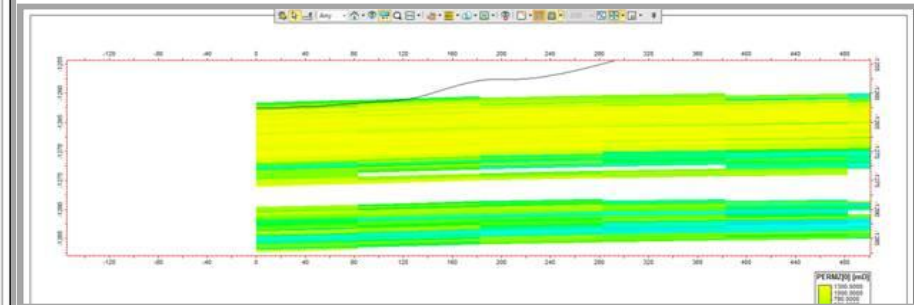
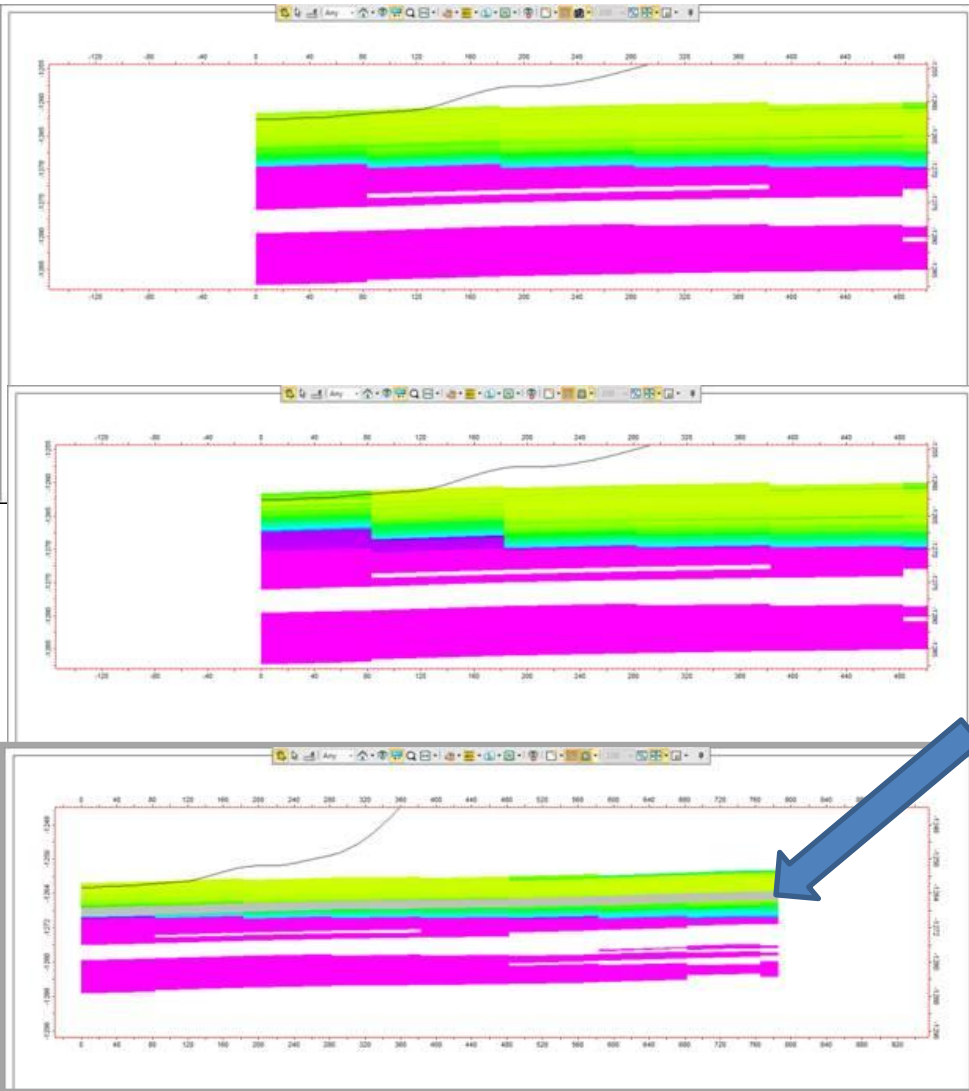
Возникла идея, что проведение ГРП спровоцировало возникновение связанной системы трещин в этой карбонатизированной части пласта. Динамическая трещиноватость была воссоздана в фильтрационной модели акцентировано в границах карбонатизированного тела, что позволило заметно улучшить настройку на историю разработки.

Корректировка геологической модели

Обводненность горизонтальной скважины.



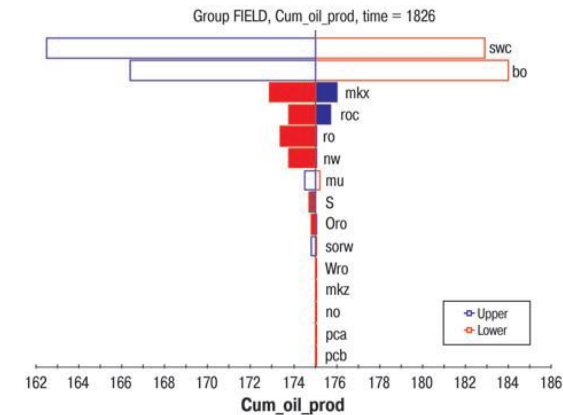
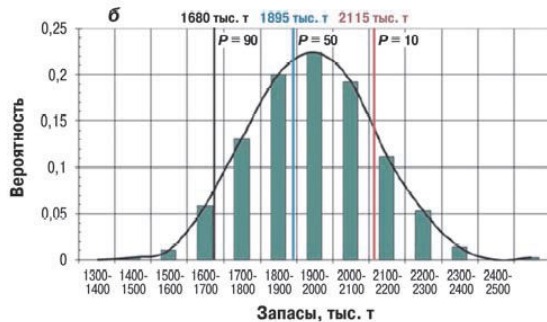
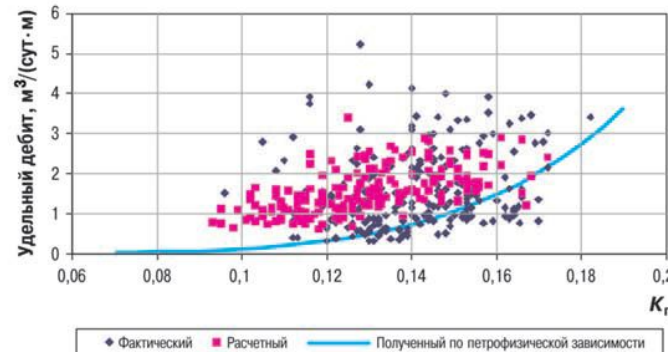
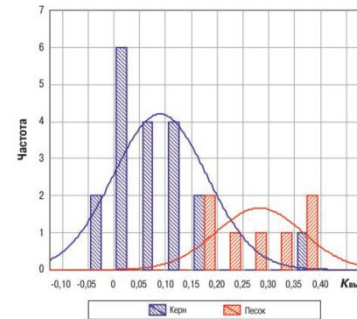
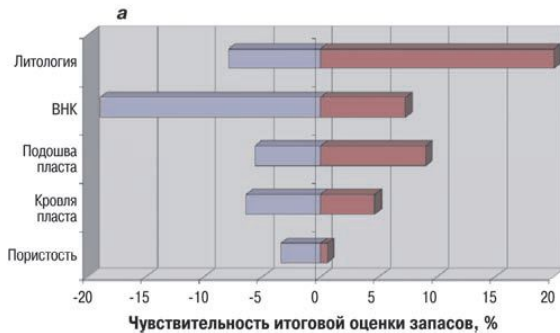
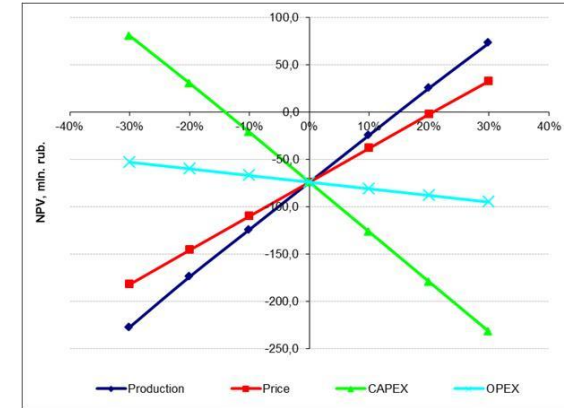
Необходимо ввести выдержанную глинистую перемычку



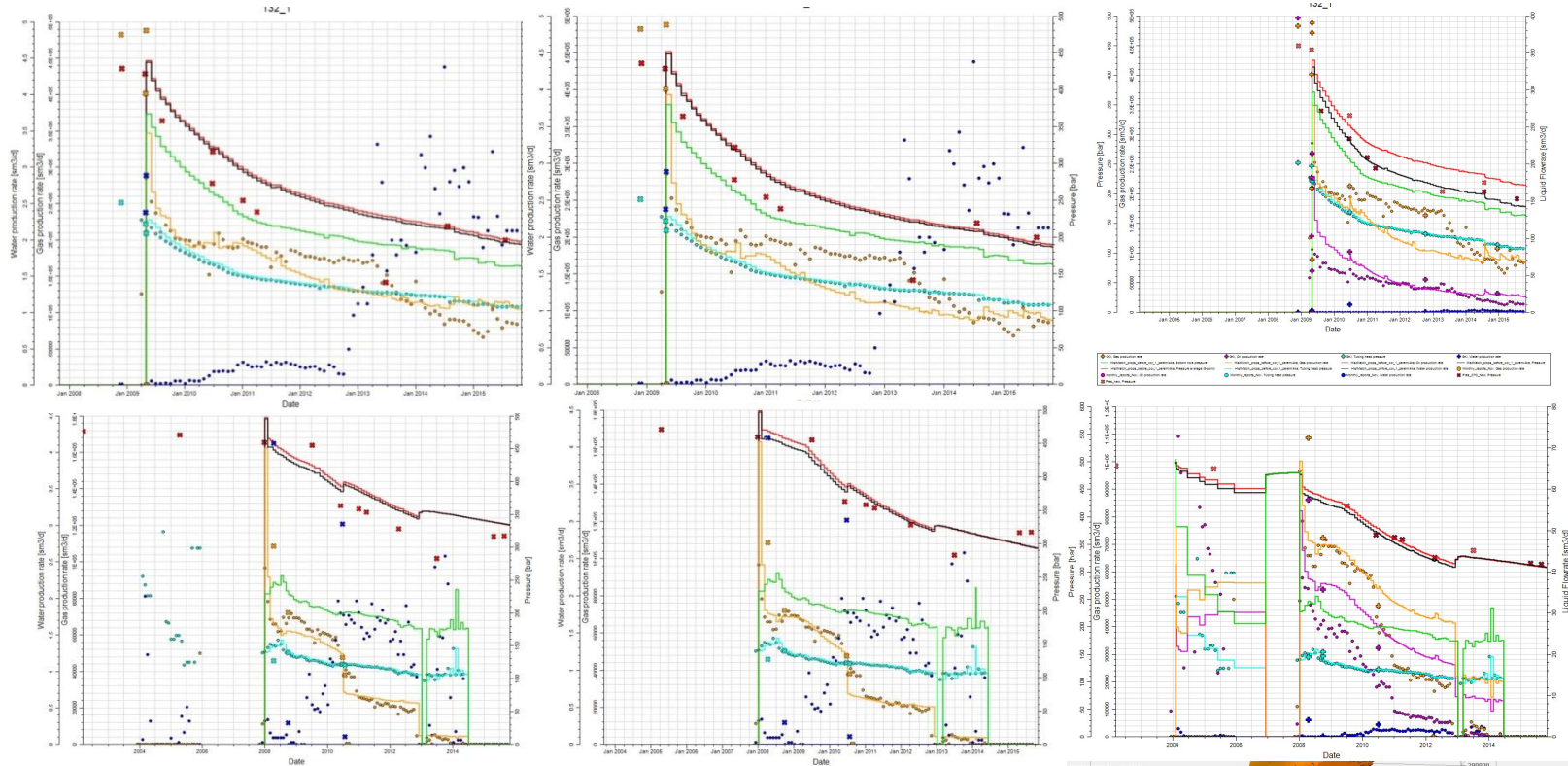
Геологическое моделирование

Необходимо помнить, что распределение коллекторских свойств имеет вероятностный характер. Требуется проведение большого числа расчетов для разных вариантов размещения скважин и режимов.

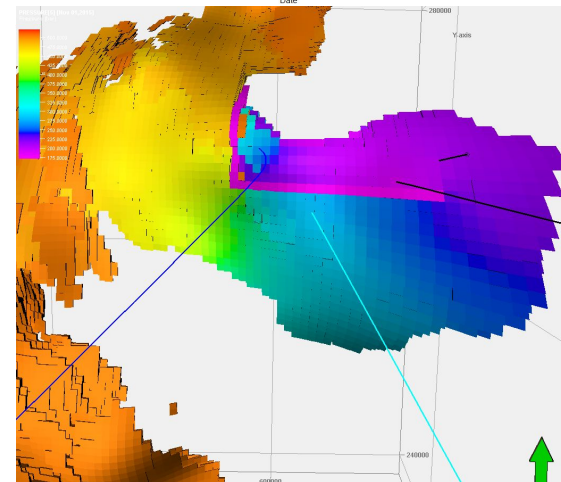
Необходим анализ неопределенностей, который включает: определение неопределенностей, интегрирование отдельных неопределенностей в общую, определение значимости этих неопределенностей (чувствительность), учет неопределенностей иной природы, с которыми нельзя работать с пом



Различные варианты одной настройки на исторические данные



Пример различных вариантов адаптации на исторические данные по добыче и давлениям. Использовалось изменение порового объема в районе скважин, геологического строения залежи (искусственный барьер), перераспределение фактической добычи (основание – суммарная добыча по месторождению)



Расчеты прогнозных вариантов

Цель моделирования – прогноз распространения параметров, технологических показателей, моделирование всевозможных сценариев разработки. На основе результатов моделирования принимаются решения о рентабельности проектов.

Качество прогноза зависит от качества входных параметров, их уточнения и представления картины фильтрации в целом.

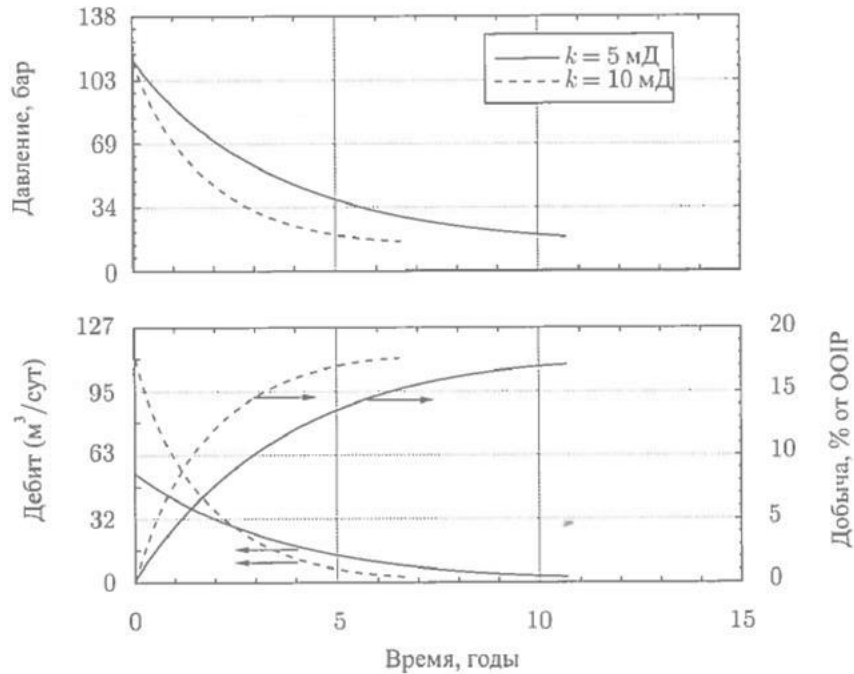
- прогноз
 - краткосрочный
 - Повышенные требования к точности
 - долгосрочный
 - Оценка потенциала

Долгосрочный прогноз должен носить комплексный характер. Основой структуризации может являться построение «дерева решений», в котором иллюстрируются основные этапы решения поставленной задачи в сочетании с прогнозными оценками необходимых ресурсов и времени.

В отличие от краткосрочного прогноза, основное место в долгосрочном прогнозировании занимает обоснование и оценка возможных вариантов развития.

Примеры вариантов прогнозных расчетов

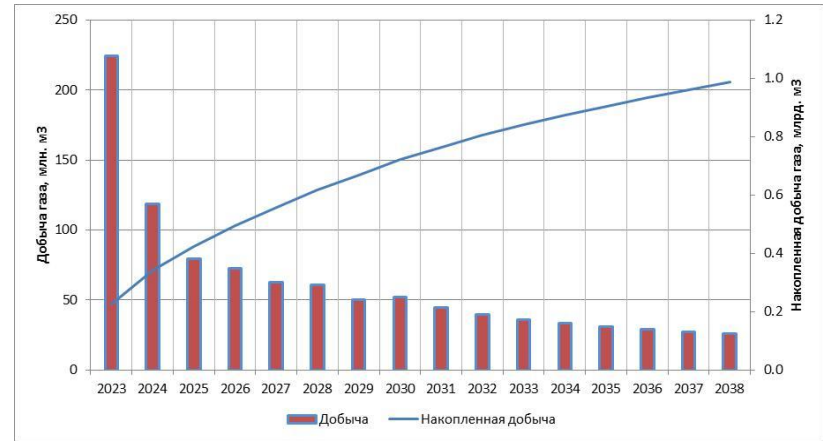
Неопределенности в определении параметров пласта



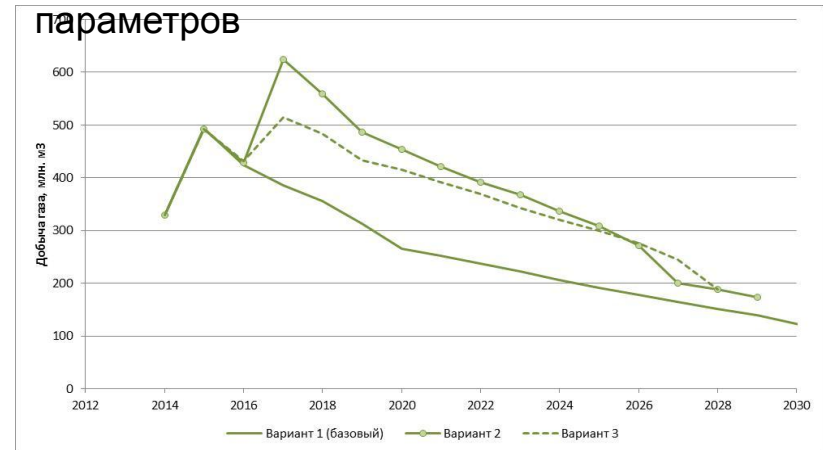
М. Уолш, Л. Лейк, 2008

Почему результаты прогнозных расчетов одно и того же сценария разработки могут отличаться :

1. Ошибки и неопределенности входной информации (наличие, качество)
2. Промысловая информация по добыче и давлениям (приписки, корректировки добыче внутри структуры и др.)
3. Неверные положения для прогноза (неверное представление о пласте – адаптация – разные параметры)



Варианты задания технологических параметров



Миф №1. Модель может все.

На сколько можно доверять результатам расчетов на модели?

Как проверить качество модели?

Этапы моделирования

Решение прямой задачи

1. Построение геологической модели – задание емкостных свойств пласта
2. Задание фильтрационных, упругих свойств пласта, физико-химических свойств флюидов
3. Задание начальных и граничных условий
4. Инициализация модели

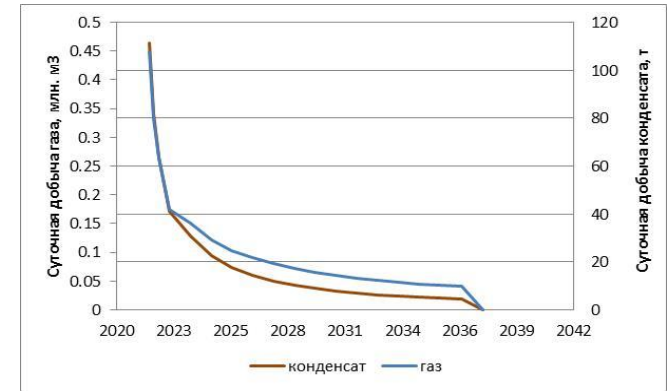
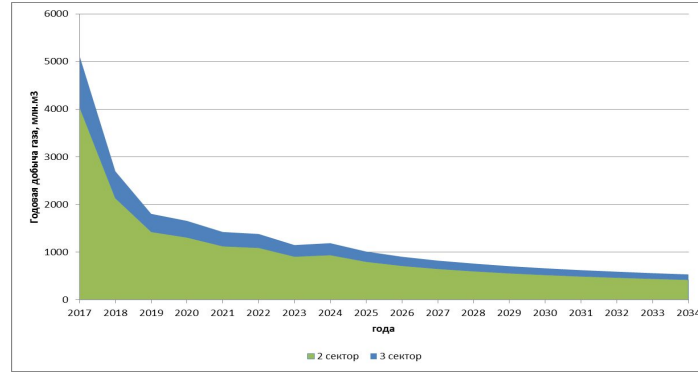
Решение обратной задачи – адаптация на историю разработки

Расчет прогнозных вариантов разработки

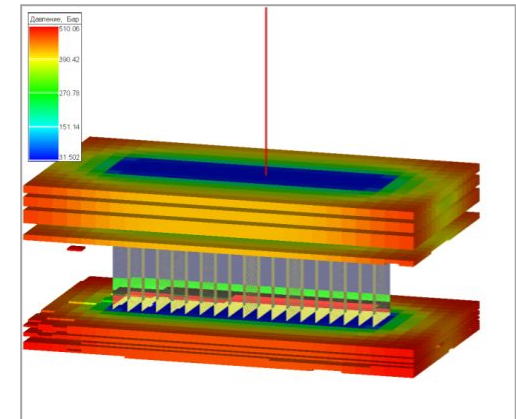
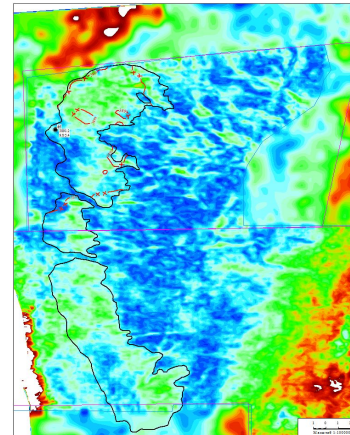
Моделирование при отсутствии информации

Моделирование месторождений с трудно извлекаемыми запасами (низкие ФЕС, мощности продуктивных пластов, содержание газа в верхней части залежи, высоковязкие нефти) зачастую связано с отсутствием данных. Основные ТРИЗ - часть ачимовских залежей и тюменская свита. Также к нетрадиционным относят запасы, которые выделяются на основании истории генезиса нефти. Это нефтематеринские породы (например, бажено-абалакская свита).

Трудноизвлекаемые и нетрадиционные запасы практически невозможно разрабатывать привычными методами. Стоимость такой скважины примерно в 2 раза дороже обычной. Кроме того, операционные расходы на эксплуатацию и ремонт тоже будут выше. Все это необходимо учесть в экономических расчетах. При разработке нетрадиционных запасов важным являются построение модели, грамотное прогнозирование наличия сгенерированной нефти, правильный выбор точки бурения скважины и определение оптимальных технологий.



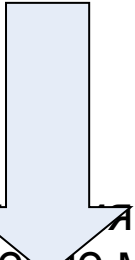
Различие в моделировании месторождений без истории разработки (greenfield) и старых эксплуатируемых месторождений (brownfield) в невозможности проверки-адаптации.



Детализация моделей

Когда и почему мы прибегаем к
детализации?

Отсутствие качественного анализа
входных данных

- 
- Детализация
 - Уточнение модели
 - Генерирование несуществующих в природе проблем
 - Не улучшает понимание процессов

- Понимание стадии изученности объекта;
- Привязка скважинных данных к глобальным процессам осадконакопления;
- Согласованность данных, полученных по различным источникам

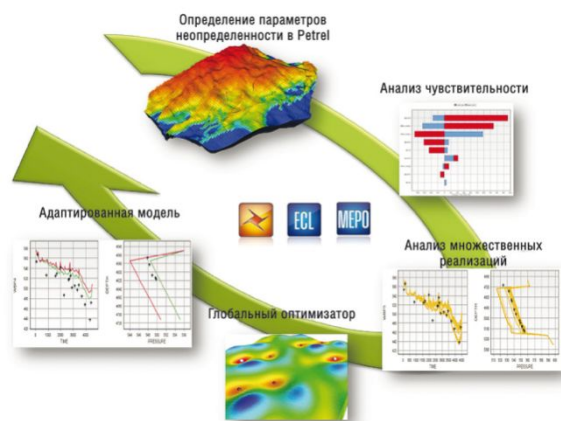
Автоматизация работ по моделированию

Моделирование – достаточно трудоемкий, рутинный процесс, требующий многочисленных итераций, тщательного анализа параметров, знания основ смежных специальностей (бурение, конструкция скважин, экономика, геология, разработка).

Подмена ручного анализа программами-автоматизаторами до сих пор не нашла широкого использования.

Интеллектуальные скважины

Процесс интеллектуализации скважин необратим так же, как и научно-технический прогресс. Интенсивность внедрения ИС будет определяться двумя параметрами: ценой барреля нефти и стоимостью интеллектуального оборудования. Третий параметр необратимые процессы перехода всех месторождений в разряд трудноизвлекаемых запасов на марше. Огорчает общая боль российских ученых-нефтяников: техника и технологии интеллектуального заканчивания скважин разрабатываются и поставляются из-за рубежа. Ни один из нефтегазовых гигантов не готов к финансированию проектов, которые могли бы обеспечить интеллектуальную безопасность России в этом направлении.



Багдад Амангалиев,
Schlumberger

Актуальные проблемы гидродинамического моделирования

- **Проблема исходных данных** (достаточность, согласованность, качество исходной информации. Недостаточное количество исходной информации приводит к необходимости проведения многовариантных расчетов и анализа неопределенностей. Большое количество данных приводит к необходимости тщательного анализа.)
- **Качество адаптации** результатов моделирования к промышленным данным (При большой степени неопределенностей входных параметров задача имеет множественные решения, что может приводить к неверным выводам по результатам адаптации. Настройка «любой ценой» не позволяет уточнить физическую природу явлений)
- Бесспорно прогрессивный **процесс детализации моделей и автоматизации** процесса моделирования приводит к излишней детализации, которая на текущем этапе развития моделирования не позволяет разобраться в происходящих процессах и стремление полностью автоматизировать процесс зачастую приводит к замене анализа входной информации математическими методами.
- Как результат - **низкая прогнозная надежность моделей**

Что может модель?

Миф 1 Модель может все.

Модель в сегодняшних условиях может дать ответы на многие вопросы разработки. Трехмерное гидродинамическое моделирование является прогрессивным и удобным инструментом разработки месторождения углеводородов. Возможности моделирования растут с каждым годом и соответственно предъявляемые требования к качеству результатов расчетов.

Необходимо помнить, что гидродинамический симулятор – это всего лишь мощный инструмент расчета в умелых руках инженера-разработчика.

Приступая к моделированию, необходимо иметь представление об объекте и процессах, происходящих в нем.

Вопросы для обсуждения?

1. Что такое численная модель месторождения?
2. Для чего строится модель?
3. Что отличает модель от самого объекта исследования?
4. Чем отличается геологическая модель и гидродинамическая?
5. Из каких составляющих состоит общая погрешность модели?
6. Как повысить степень достоверности модели? Какие методы используются?
7. Какими знаниями должен обладать инженер-разработчик, строящий гидродинамические модели?

Литература

1. Уолш М., Лейк Л. Первичные методы разработки месторождений углеводородов. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.- 672стр.
2. Карлсон М.Р. Практическое моделирование нефтегазовых пластов.- 2012.- 944 стр.
3. Л. П. Дейк [Практический инжиниринг резервуаров](#) /2008
4. Дейк Л.П. Основы разработки нефтяных и газовых месторождений.-М.: ООО "Премиум Инжиниринг". - 2009. - 570 стр.
5. Р. Каневская **Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов /2003**
6. [Л. Косентино Системные подходы к изучению пластов](#) /2007