

**Международная научно-
практическая конференция
ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В
НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

29 ноября 2024

**Реализация цифровой стратегии разработки в многовариантном
геолого-гидродинамическом моделировании**

**Implementation of Digital Reservoir Development Strategy for
Multivariate Geological and Dynamic Modelling**

Н.А. Шевко, Директор по геологии и разработке, к.т.н.

Группа Компаний «Газпром нефть»

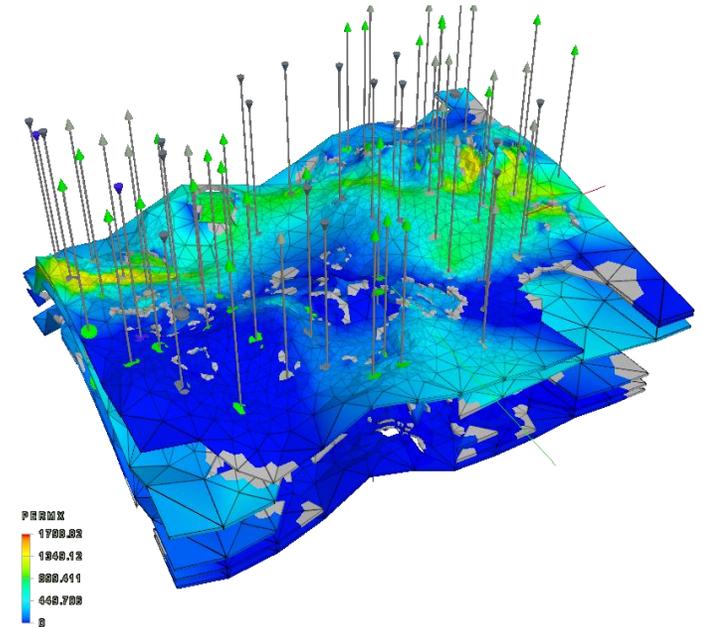
г. Ташкент, Узбекистан

Новые требования бизнеса – новые технологические решения

Требования к симулятору «нового поколения»:

- **Интеграция процессов/объектов:** моделирования геологической и гидродинамической моделей, моделей скважин, моделей геолого-технических мероприятий, поверхностной инфраструктуры, оценки экономической эффективности.
- **Иерархичность:** задач, данных, объектов, методов решения, вычислительных систем.
- **Многовариантные задачи:** автоадаптации, оптимизации, анализа неопределённостей.
- **Автоматизация:** процессов создания и обновления моделей, прогнозов, цифровые стратегии разработки.
- **Вычислительные системы:** кластеры CPU и GPU, облачные технологии.
- **Конструирование математических моделей:** добавление новых объектов и методов решения, гибридизация сложных моделей и процессов.
- **Внешние инструменты расширяющие функциональность:** core engine, workflows, скрипты, фреймворки с искусственным интеллектом (ML, DL), пакетный удаленный запуск, работа в консольном режиме или единой среде 3D визуализации, расчеты на «лету».
- **Повышение оперативности** всего цикла создания и использования Г.-ГД моделирования

Гибридные геолого-гидродинамические модели



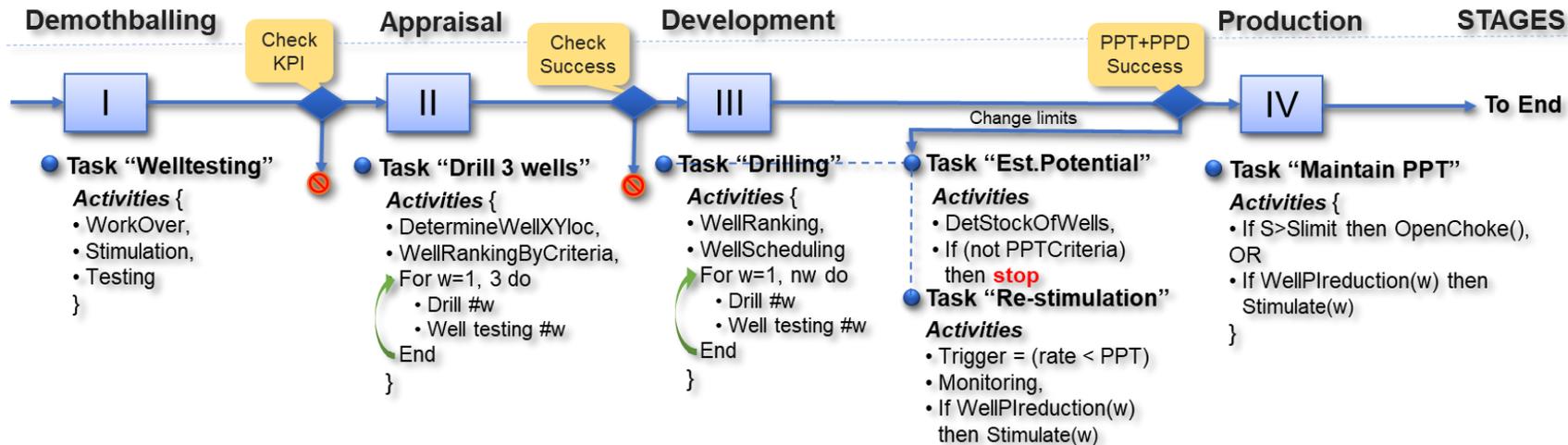
Развитие информационных технологий и появление новых бизнес-задач в области моделирования геологии и разработки привело к необходимости выполнения массивных, многовариантных, интегрированных расчетов и совместного моделирования многопластовых залежей крупных месторождений.

Цель и задачи



Практическая реализация **цифровой стратегии разработки (ЦСР)** нефтяных месторождений с использованием встроенного в гидродинамический симулятор высокоуровневого (скриптового) языка программирования, позволяющего управлять логикой вычислений.

- 1 Поиск подхода и формирование оцифрованной бизнес-логики процессов для
 - автоматизации рутинных операций, в рамках построения, обновления и адаптации моделей
 - комплексного управления расчетами, в рамках ЦСР
- 2 Реализация решений на базе собственного симулятора
- 3 Отработка предлагаемых подходов на отдельных примерах



Основа для реализации ЦСР

- 1) Анализ текущего состояния многовариантного моделирования и прогнозирования разработки:
что работает, что – нет;
- 2) Идея реализации – использовалось 2 подхода (*):
 - 1) встраивание **скриптового языка** в ядро симулятора с изменением форматов ввода входных данных;
 - 2) вынесение «жесткого», стандартного **процесса расчета** из симулятора **во внешнюю среду** скрипта.
- 3) Решение минимального перечня подзадач для реализации
 - ① Наличие симулятора фильтрации с исходными кодами
 - ② Выбор скриптового языка и его встраивание в симулятор
 - ③ Изменение формата ввода входных данных
 - ④ Формирование внешнего управления расчетом

* Конференция РОЭК-2024, г. Москва. «Автоматизация решения многовариантных задач в гидродинамическом симуляторе на основе использования динамических исходных данных и внешнего управления вычислительным процессом»

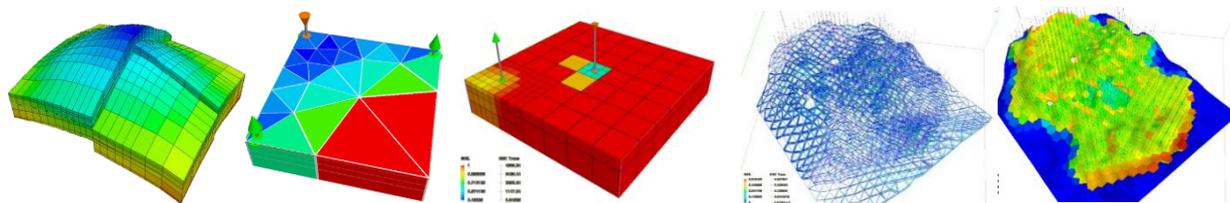
1. Базовая программа-симулятор фильтрации

Ядро симулятора (core engine) – авторский 3D трехфазный симулятор модели «черной нефти» (2016 г.).

Используется объектный подход: Class Hierarchy, Objects Hierarchy, Simulation Workflows. Ввод в txt (DATA) формате, вывод – binary. Модули PVT, SCAL, VPFs(2), Initialization(3), Grid(6), Formulation(7), Field, Reservoir, Group, Well, Aquifers и многое другое.

Основные алгоритмы и опции

1. Уравнения фильтрации Black Oil
2. Формат загрузки данных E100 и скриптовый
3. Типы сеток: угловой сетки, блочная, радиальная, триангуляционная, иерархическая, неортогональная и со «сложными» ячейками, «PEBI»

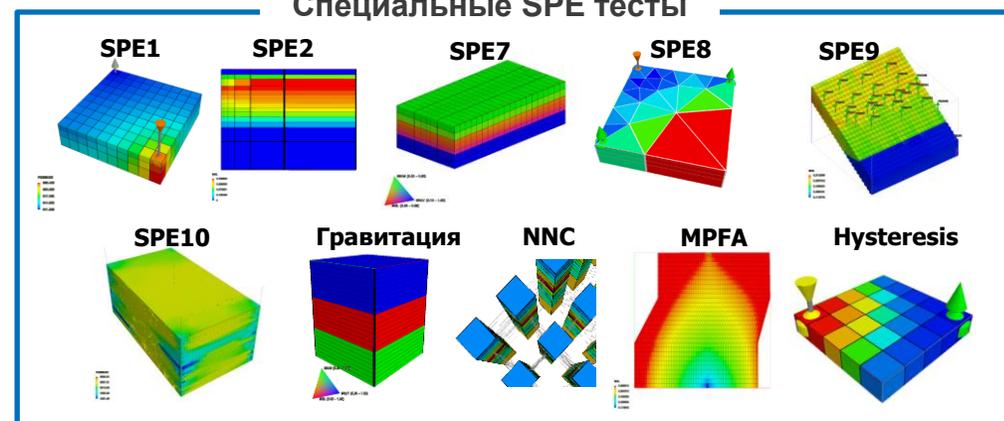


4. Дополнительные объекты фильтрации: проводящие трещины, разломы
5. Полностью неявный нелинейный солвер
6. Равновесная и неравновесная инициализация
7. Масштабирование ФП и капиллярных сил, Гистерезис ФП
8. Регионы уравнивания фаз, свойств флюидов и породы, ПЗ
9. Поддержка VFP таблиц и многое другое.

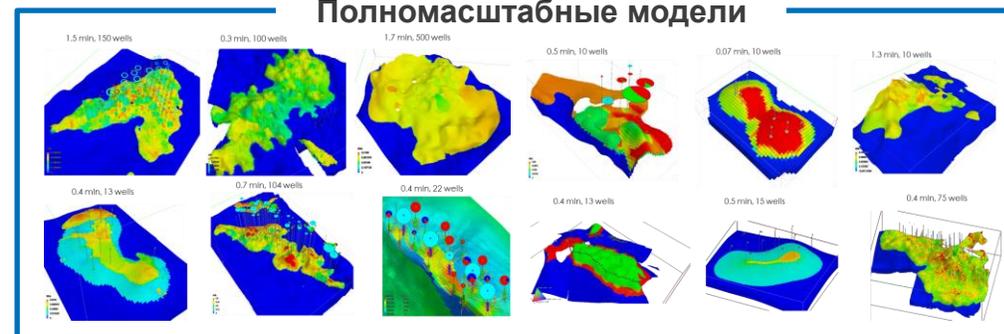


Протестирован на качество реализации и надежность алгоритмов, сертифицирован ГКЗ РФ

Специальные SPE тесты



Полномасштабные модели



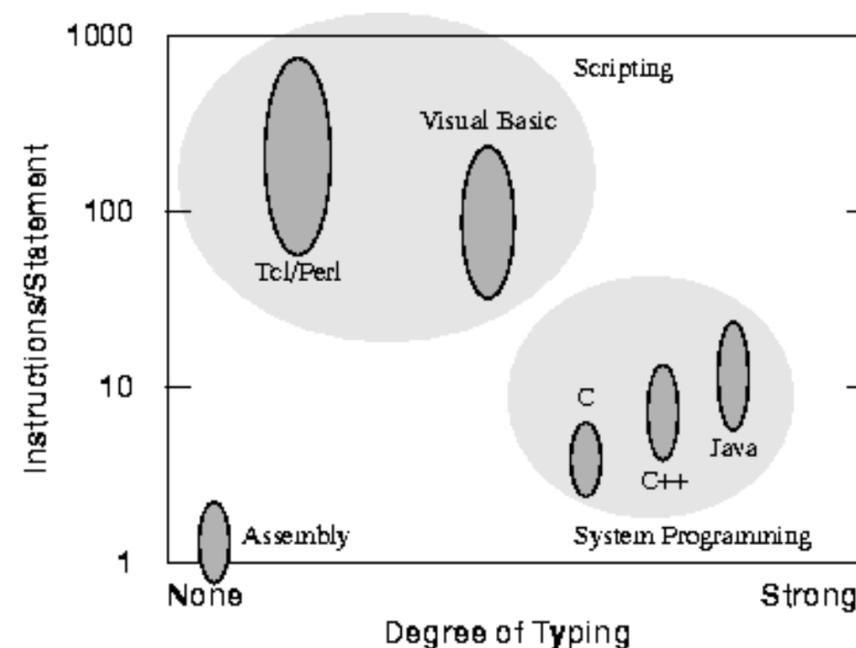
2. Выбор скриптового языка

Выполнен анализ и бенчмаркинг более 10 скриптовых языков (синтаксис: название):

- **JavaScript:** QuickJS, DukTape, MuJS, Elk, SpiderMonkey, JerryScript, ChaiScript, mJS, Node.js, V7, V8
- **C++:** AngelScript,
- **C#:** Mono,
- **Lua:** Lua, sol2, LuaJIT, TypedLua
- **Другие:** Python, CoffeeScript, Teal, Tcl, MoonScript

Критерии выбора: 1) удобство синтаксиса, 2) производительность, 3) простота встраивания в код c++, 4) минимальный объем сторонних библиотек, 5) дополнительные расширяющие функционал библиотеки, 6) тип лицензии, 7) вес библиотек

Результат: фреймворк Lua – бесплатный, opensource, достаточно легковесный, «быстрый» по исполнению и удобный по синтаксису.



3. Изменение формата ввода входных данных

! Встраивание скриптового языка в ядро симулятора позволяет использовать синтаксис языка для ввода данных.

Стандартное описание данных

```
RUNSPEC      -> NO SECTION (3)
ECHO         -> ROOT=FIELD
TITLE
ODEH PROBLEM -> FIELD

START
19 OCT 1982 / -> FIELD

FIELD
OIL          -> RESERVOIR (2)
WATER
GAS
DISGAS

TABDIMS
1 2 30 35 1 12 / -> PVT, SCAL
EQLDIMS
1 100 10 /      -> INITSOL (1)

WELLDIMS
10 150 1 10 /  -> WELLS
```

Скриптовое описание данных*

```
local field_desc = {
  title = "ODEH PROBLEM",
  startdate = DATE(19,10,1982),
  units = Units.FIELD,
  echo = true
}
field:add_settings(field_desc)
...
local pvt_desc = {
  n_tables=2,
  n_points=35,
  n_rs_nodes=12,
}
pvt:add_settings(pvt_desc);
...
local WELLDIMS = {
  n_maxwells = numberOfwells,
  n_maxcons = 150,
  n_wellsingroup = 10
}
wellman:add_welldims(WELLDIMS);
```

Подсветка и проверка синтаксиса

```
123
124 --1) Create Hierachy of Objects ----- (2)
125 field = Field.new();
126
127 local field_desc = {
128   startdate = DATETIME(1982,10,19),
129   units = Units.FIELD,
130 }
131
132 field:add_settings(field_desc);
133
134 --2) Create reservoir -----
135 res1 = Reservoir.new();
136 field:add_reservoir(res1);
137
138 local res_desc = {
139   phases = { Phases.GAS, Phases.OIL, Phases.WATER, Phases.DISGAS },
140 }
141
142 res1:add_settings(res_desc);
143
144 local EQLDIMS = {
145   NTEQUL = 1,
146   NDEPTH = 100,
147   MAXROWS = 20
148 };
149
150 res1:add_eqldims(EQLDIMS);
151
```

Недостатки:

- 1 сбор различных данных в одной секции (RUNSPEC)
- 2 Все резервуары с одними свойствами
- 3 Статичный файл

Преимущества:

- 1 Задание именованных, вложенных структур
- 2 Работа с среде VSCODE, проверка синтаксиса
- 3 Каждый параметр ключевого слова – это переменная
- 4 Пользовательские функции, алгоритмы, считывание и выгрузка.

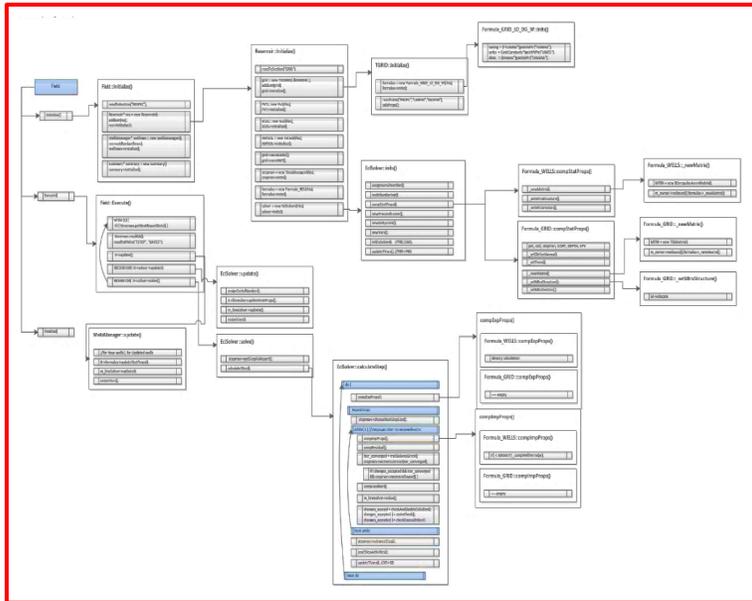
* JSON like notation (key=value)

4. Формирование внешнего управления расчетом

Вынесение стандартного, «жесткого» процесса расчета из симулятора во внешнюю среду скрипта.

1. Внешний скрипт имеет доступ к функциям симулятора, определяет общую логику расчета
2. Для сохранения производительности принято разделение кода на 2 части: компилируемую и интерпретируемую
3. Скрип расширяет функциональность ядра: операции ввода-вывода, создания и задания свойств объектов, собственные процедуры и алгоритмы

Стандартный рабочий процесс (workflow)



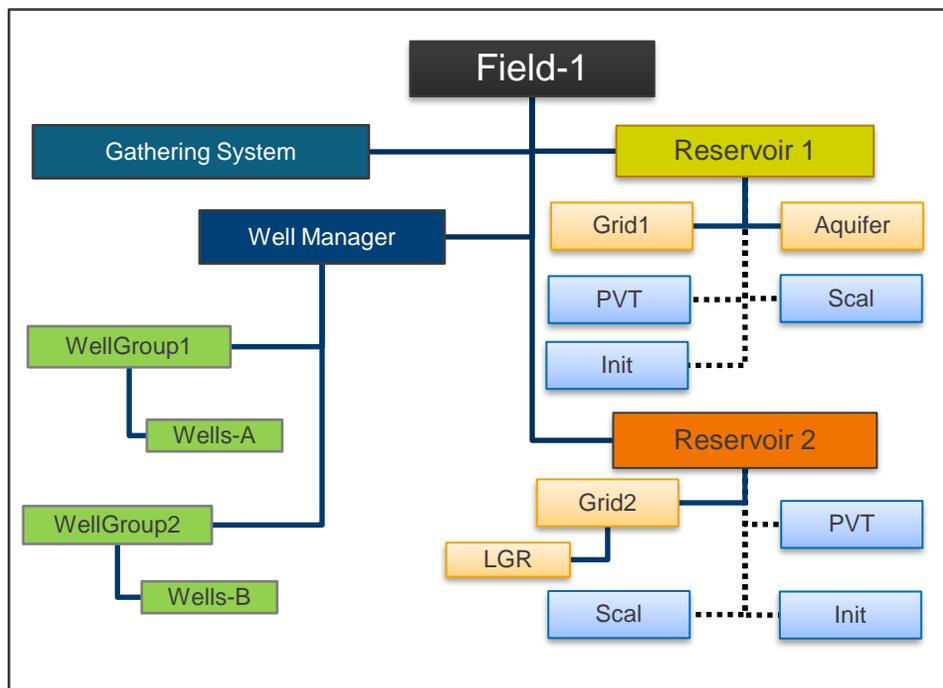
Распределение функционала в гибридном симуляторе



Применение 1 – Сложные объекты для интегрированных задач

Гибкое создание иерархической структуры объектов моделирования и задания их параметров

Структура объектов моделирования, включая вспомогательные объекты-менеджеры *



Листинг скрипта

```
field = Field.new();

res1 = Reservoir.new();
field:add_reservoir(res1);

grid = res1:new_grid(CORNERPOINT)
pvt = res1:new_pvt()
scal = res1:new_scal()
isol = res1:new_initsolution()
aqui = res1:new_aquifer()

res2 = Reservoir.new()
field:add_reservoir(res2)
grd2 = res2:new_grid(BLOCKCENT)
lgr1 = grd2:add_lgr()
pvt = res2:new_pvt()
scal = res2:new_scal()
isol = res2:new_initsolution()

wellsman = WellsManager.new()
field:add_wellsmanager(wellsman)
Wg1 = wellsman:new_group()
Wg2 = wellsman:new_group()
```

Листинг скрипта VS code

```
1 field = Field.new()
2
3 res1 = Reservoir.new()
4 field:add_reservoir(res1)
5
6 grid = res1:new_grid(CORNERPOINT)
7 local pvt = res1:new_pvt()
8 local scal = res1:new_scal()
9 local isol = res1:new_initsolution()
10 local aqui = res1:new_aquifer()
11
12 res2 = Reservoir.new()
13 field:add_reservoir(res2)
14 grd2 = res2:new_grid(BLOCKCENT)
15 local lgr1 = grd2:add_lgr()
16 local pvt = res2:new_pvt()
17 local scal = res2:new_scal()
18 local isol = res2:new_initsolution()
19
20 wellsman = WellsManager.new()
21 field:add_wellsmanager(wellsman)
22 local Wg1 = wellsman:new_group()
23 local Wg2 = wellsman:new_group()
24
```

*Пример, задание месторождения с двумя залежами разной геометрии сетки и свойств флюида.

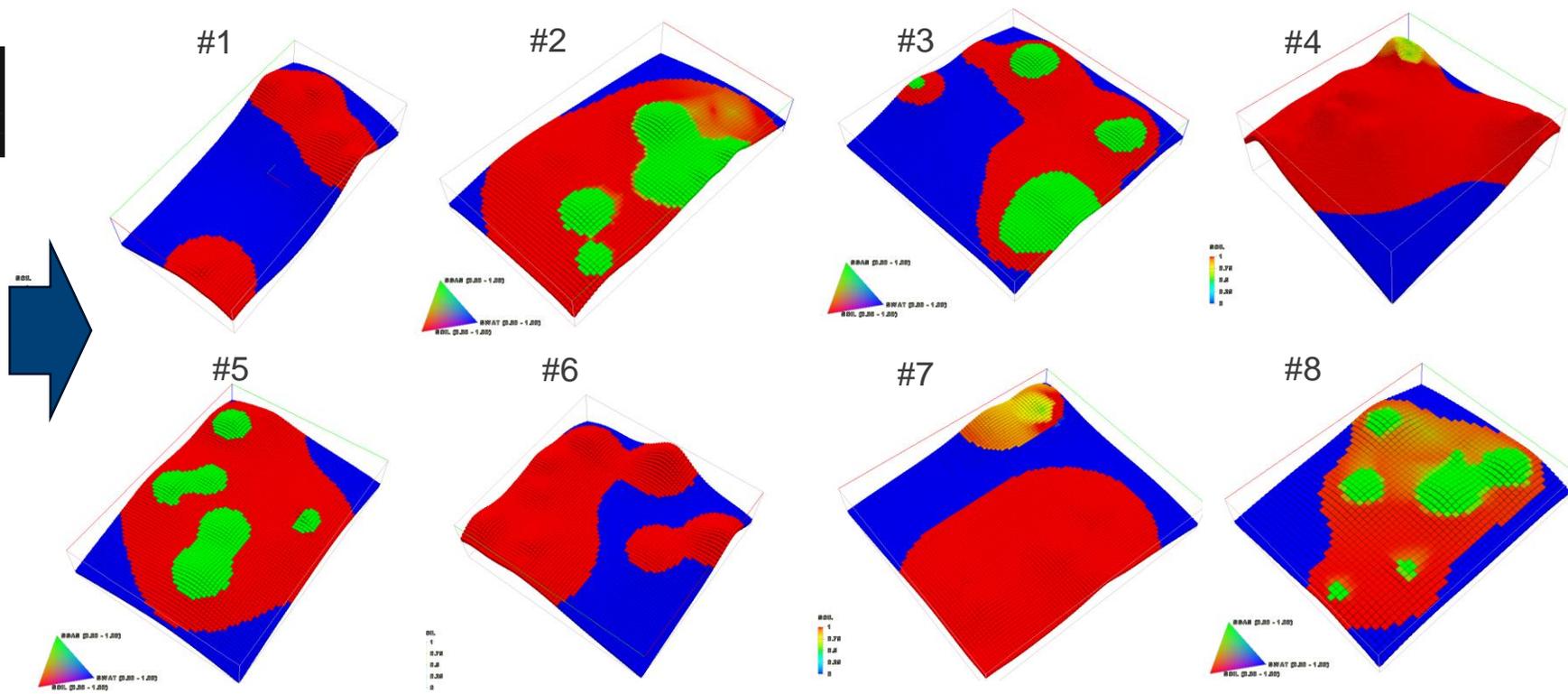
Применение 2 – «Случайные» модели

а Создание произвольной модели «на лету» без использования внешних статических данных, только на базе управляющих и ключевых слов скрипта и параметра SEED.

! Все параметры модели изменяются: размерность (NX, NY, NZ), геометрия (кровля, толщины, число пластов), статические свойства, концевые точки, форма ФП, начальное насыщение (Рпл, ВНК, ГНК), размещение скважин, графики бурения.

```
8 math.randomseed(seed0)
9 local nx = math.random(120, 300)
10 local ny = math.random(120, 300)
11 local nz = math.random(10, 500)
12
```

```
156 interpol3D = function(AX, AY, AZ, alfa, i,j,k)
157     local sum1 = 0
158     local sum2 = 0
159     local value = 0
160     local dist = 0
161     for d, p in ipairs(pnts) do
162         dist = ((p.i*nx-i)/AX)^2 + ((p.j*ny-j)/AY)^2 +
163             ((p.k*nz-k)/AZ)^2
164         if dist == 0 then
165             value = p.val;
166             break;
167         else
168             dist = 1 / math.sqrt( dist );
169         end
170         local weight = dist^alfa;
171         sum1 = sum1 + p.val*weight;
172         sum2 = sum2 + weight;
173     end
174     if dist>0 then
175         if sum2 == 0 then value = 0
176         else value = sum1 / sum2; end
177     end
178     return value
179 end
```

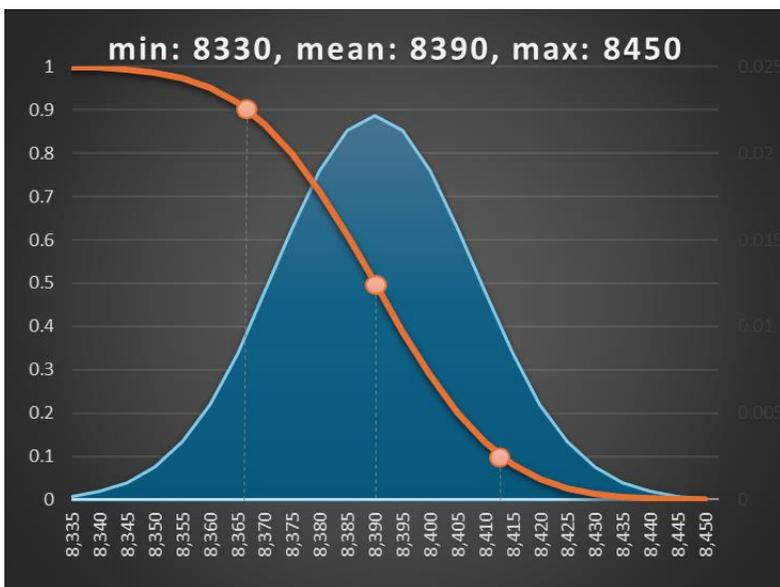


Применение 2 – Стохастические модели

6 Многовариантные расчеты – модели с модификацией отдельных геологических или технологических параметров используя переменные или seed, сами варианты описаны синтаксисом во внутреннем скрипте и различаются только # или seed для стохастических реализаций интегрированных моделей (ГМ+ГДМ)

! Часть параметров изменяются: свойства, конечные точки, начальное состояние (Рпл, ВНК, ГНК), размещение скважин, графики бурения.

```
DistributionType = {  
  uniform = 1, geometric = 3, nomial = 4, lognomial = 5,  
  binomial = 6, exponential = 7, discrete = 8  
};
```



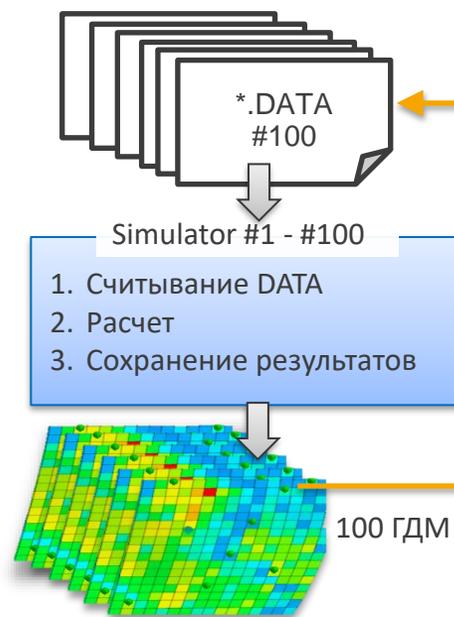
```
--Генератор случайных чисел  
local generator = Random_Generator.new()  
generator.seed(i)  
--Задание типа распределения  
local owc_distr = Distribution.new(DistributionType.nomial, mean, stddev)  
  
--Задание ключевого слова с переменным параметров owc_depth  
local EQUIL1 = {  
  depth = 8400,  
  pressure = 4800,  
  owc_depth = owc_distr(generator),  
  owc_pc = 0,  
  goc_depth = math.random(8300, 8330),  
  goc_pc = 0,  
  rsvd = 1,  
  rvvd = 0,  
  n_level = 0  
}  
sol:add_equil{ EQUIL1 }
```

Применение 3 – Автоадаптация модели ансамблевым методом

! Для автоадаптации (и оптимизации) требуется внешняя программа.

Задача автоадаптации включает цикл: 1) инициализация или обновление ансамбля моделей, 2) расчет целевой функции; 3) расчет модификаторов; 4) расчет ансамбля моделей; 5) сохранение результатов, б) если не сошлось, то повтор с п. 1.

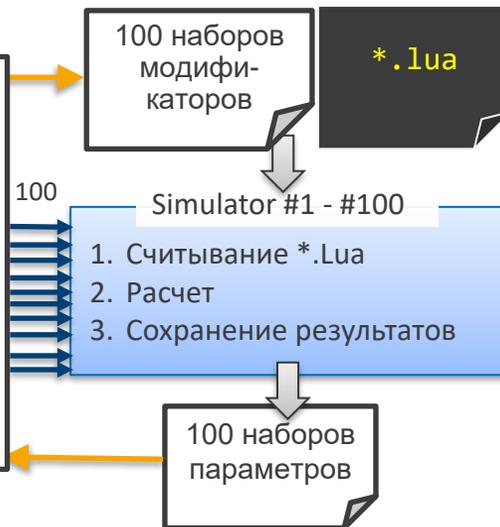
Стандартный подход



Внешний модуль (Launcher)

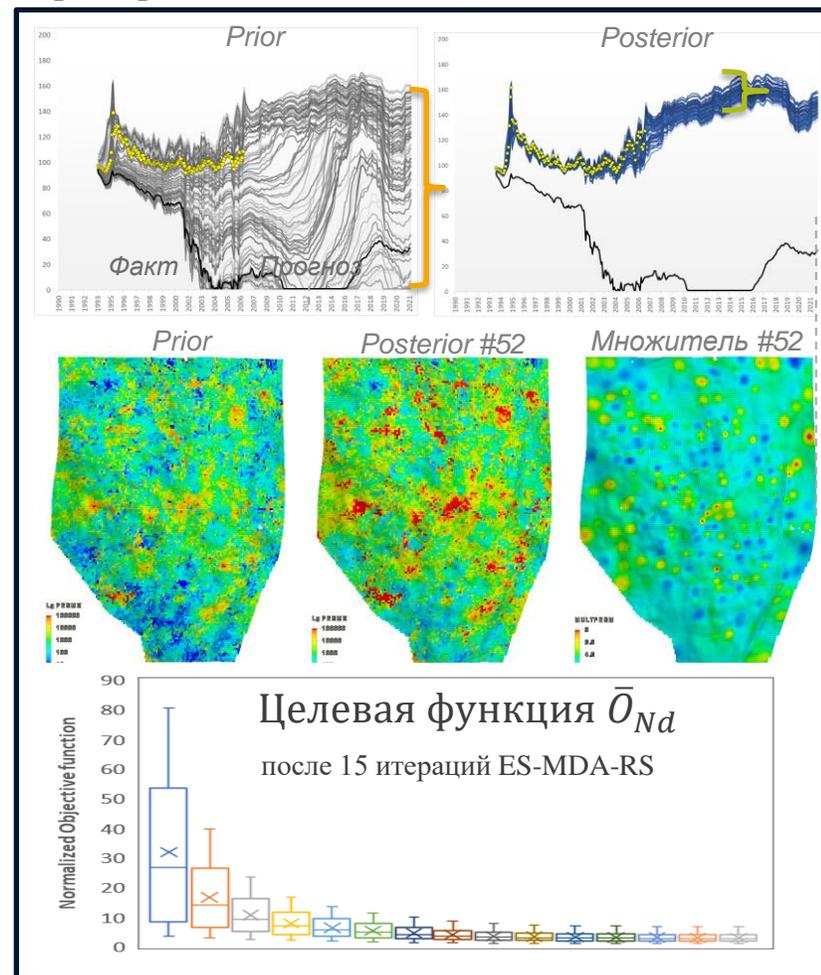
1. Создать 100 ансамблей
2. Рассчитать нулевой сценарий
3. Цикл до сходимости
 - a) собрать результаты всех вариантов
 - b) Рассчитать модификаторы
 - c) Изменить 100 DATA-файлов
 - d) Запустить 100 расчетов
 - e) Проверить сходимость

Предлагаемый подход*



*Пример, не требуется создания 100 DATA файлов моделей, а только 1 файл скрипта + один с модификаторами

Пример адаптации модели, Рзаб на скважине



Понятия, принципы, формулировки

Для решения задач прогнозирования с учетом стратегии разработки требуется:

- 1. Формулировка понятия «Цифровая стратегия разработки» и ее ограничения**
- 2. Формализация типов стратегий разработки (от стадии, от сложности залежи, от рисков)**
- 3. Реализация команд и алгоритмов по управлению разработкой**
- 4. Создание типов, программной структуры описания элементов стратегии**
- 5. Задание стратегии в виде описания, через иерархическую структуру объектов (действия, потоки, условия, правила и тп)**
- 6. Программная реализация в виде иерархии объектов-циклов, рабочих потоков, деревьев принятия решений,**

Понятия, принципы, формулировки

1

Определение стратегия разработки (СР)

- система правил и последовательных действий, направленные на достижение глобальной, основной цели с учетом внешних условий, ресурсных и технических ограничений.

Общие пояснения понятия к «Стратегия» в рамках данной работы:

1. **Стратегия** через набор проверенных решений и действий, зависящих от ситуации и состояния объекта, позволяет оптимально достичь цели. Общность Стратегии позволяет применить ее к разным объектам.
2. **Принципами стратегии**, в нашем случае **правилами**, называются готовые закономерности и частные/общие решения по другим месторождениям и аналогам, которые приходится использовать из-за недостатка данных и невозможности оптимально, или даже иногда просто, обосновать все решения и прогнозные шаги.
3. **Правила основаны на опыте** реализации множества решений, имеют вероятностный характер и оптимальны в среднем. Правила носят декларативный (закон) или рекомендательный характер
4. Для конкретной залежи решения можно переобосновать с учетом ее геологических особенностей
5. **Стратегия** не требуется – при отсутствии выбора действий и решений, это приводит просто к реализации последовательности заранее определённых действий, например, перебор вариантов с поиском оптимума при проектировании разработки

2

Типы Стратегий – принципы, которые могут быть заложенные в ЦСР

- **Снижение рисков:**
 - От известного к неизвестному - шаг от известного минимизирует риски
 - «сначала попробуй» - если стратегия затратная и рисковая то лучше сделать тестирование на начальных этапах
- **Максимальной эффективности:** Минимальное усилие – максимальный результат
- **Получение быстрого результата:** «Быстрые победы»
- **Минимальные заемные средства**
- **Покупка актива:** оценка взноса, первоначального капитала с учетом неопределённостей и т.п.

Особенности реализации

3 Реализация команд и алгоритмов по управлению разработкой – поиск координат для размещения скважин, выбор конструкций скважин, ранжирование очередности и тп.

4 Создание типов, программной структуры описания элементов стратегии - через связи понятий: **Strategy-Stage-Workflow-Task-Activity**.

Stage

- Стадии определяют свой набор целей, объектов и действий. Сквозных нет.
- После входа в стадию проверяются условия – успешности стадии, если все вдруг выполняется переходим далее.
- Успешность связана 1) с полным/частичным выполнением перечня действий 2) с достижением критерия успешности (PPT), 3) после исчерпания ресурсов (число скважин закончилось)
- Проверка успешности делается по отдельному включению проверки `Check_Success()` в `Workflow`

Workflow

- Набор независимых задач – бурение/баз.фонд
- Создают параллельные потоки реализации задач, с синхронизацией в точках отчета,
- Связаны с прерыванием и возобновлением списка задач или задачи на отчетные даты.

Rules

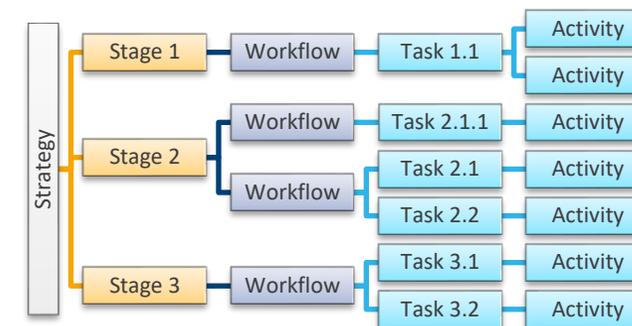
- Задание параметров по умолчанию в зависимости от внешних критериев или состояния объекта
- Пример самый просто Pзаб – то Pнас, то 0,75, то 50 бар, если высокая обводненность и/или

Limits

- свод всех ограничений по объектам, удобно вынесено для часто меняющихся лимитов в зависимости от варианта или стратегии,

Activity

- Activity – имеет `return true/false` – только если это важно для продолжения последовательности. `Default = true`.
- Activity - `apply`, активный, завершен, нестартед
- Можно проверять на каждом шаге, нет учета времени – одномоментные действия

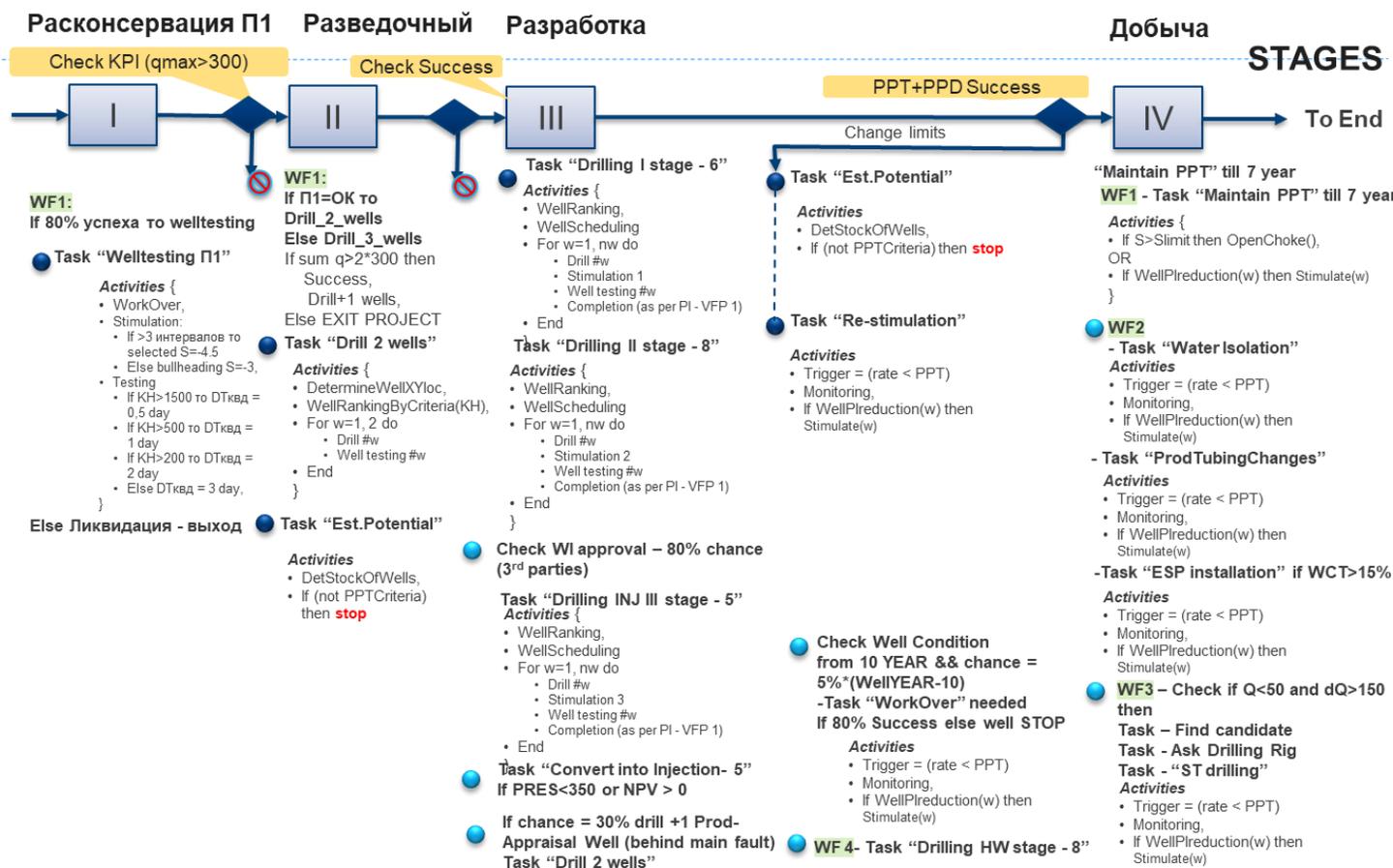


Task

- Имеет цель и критерии успешности, если неуспешно – развилка, например «Тестирование скважины»
- Есть независимые и зависимые задачи, связаны входом–выходом, а также подчинением – дочерние и материнские задачи
- список независимых задач проверяется на критерии запуска (тригер). Если не сработала следующая в списке.
- задача имеет временной интервал (T1..T2) и запускается 1 раз обычно, далее ждем нового шага.
- могут быть одноразовые (э 1 шаг) – «Поиск скв многоразовые –

Пример реализации Brown Field проекта

5 Задание стратегии в виде цифрового описания, через иерархическую структуру объектов (действия, потоки, условия, правила, стадии и тп.)



6 Программная реализация в виде иерархии объектов-циклов, рабочих потоков, деревьев принятия решений,

```

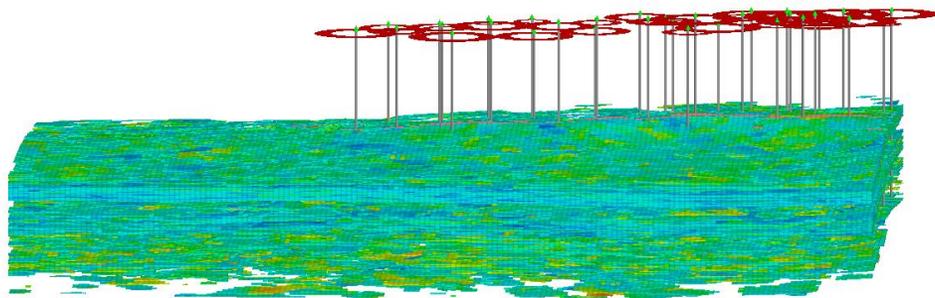
1  required 'InitStrategy'
2
3  local strategy = Strategy.new("Actual")
4  strategy.initdate = DATETIME(2014,1,1)
5
6  ..***** stage 1 *****
7  local stage1 = Stage.new("Appraisal")
8  stage1.timelimit = 2*365 --сроки стадии иначе лицензионные риски и тп
9  stage1.success = function ()
10     local wt = wellsman.get_vector_value("WOPT", "A-1");
11     local wq = wellsman.get_vector_value("WOPR", "A-1");
12     return wt > 2000 and wq > 200
13 end
14 strategy:add_Stage(stage1)
15
16 local workflow = Workflow.new("MainWF")
17 stage1:add_Workflow(workflow)
18
19 local task_WO = Task.new()
20 workflow:add_Task(task_WO)
21
22 local action_tender = Action.new("Tender")
23 action_tender.duration = 5*30 --last date disregard to number
24
25 local action_stim = Action.new("Stimulate")
26 action_stim.duration = 2 --last date disregard to number
27 action_stim.todo = function()
28     COMPDAT = { {'A-1', D9, D9, 1, 3, 'OPEN', 1, D9, 0.5, D9, -3.0, D9, 'FZ' } }
29     wellsman.add_compdats (COMPDAT);
30 end
31
32 task_WO:add_action {action_tender, action_stim}
33 task_WO.mode = all
34
35 local task_WT = Task.new()
36 workflow:add_Task(task_WT)
37

```

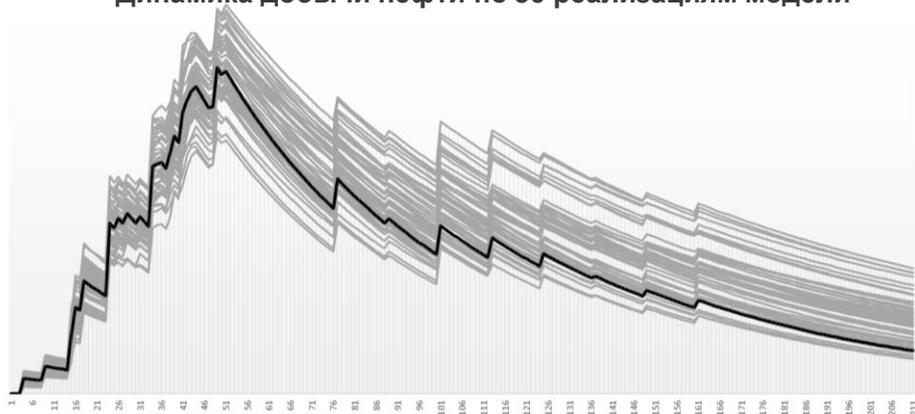
Пример реализации Brown Field проекта

Одна стратегия – много реализаций залежи

1. Фактическая стратегия
2. **Геологическая неопределенность:** ВНК, КН, проводящие разломы (блоковое строение), неоднородность/связности
3. **Технологическая неопределенность:** качества стимуляции много пластовой залежи (работающий КН), Skin Factor
4. 50 стохастических реализаций с вариацией 6-ми параметров



Динамика добычи нефти по 50 реализациям модели

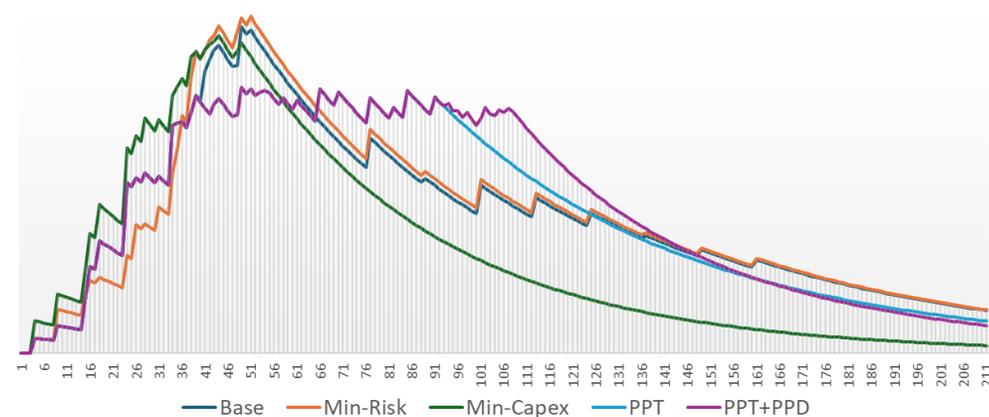


Много стратегий – одна залежь

1. **Actual** – фактическая стратегия
2. **Low Risk** – низко рискованные вложения – ждем разведки, от известного, используем каждую след скважину, 2 станка в разных независимых зонах
3. **Min Capex** – разработать с минимальным затратами, критерий UDC<10
4. **PPT** – поддержание полки за счет ускорения бурения
5. **PPT + PPD** – полка фиксированной продолжительности при любых затратах, но тех лимитах

#	Strategy	Wells	FOPT	NPV
1	Actual	37	0	0
2	Low Risk	37	+1.2%	-0.6%
3	Min Capex	25	-25.5%	-2.5%
4	PPT	37	+3.1%	+3.1%
5	PPT+PPD	47	+7.1%	+1.2%

Динамика добычи нефти по стратегиям разработки



Заключение

- **Автоматизация многовариантных расчетов** требует комплексных решений на уровне расширения возможностей традиционных симуляторов за счет внедрения **высокоуровневого языка**, обеспечивающего гибкость входных форматов и позволяющего управлять логикой вычислений, создавая сложные иерархические, независимые потоки команд в зависимости от текущего расчетного состояния модели.
- Для реализации **Цифровизация стратегии разработки** требуется
 - симулятор с дополнительным уровнем абстракции, в виде скриптового языка
 - описать различные типы стратегий, систему правил и технических ограничений, алгоритмы локальных оптимизационных задач
 - формализация планов и набора действий в виде иерархическую структуру команд для симулятора, условий и правил.
- **Цифровизация стратегии разработки** позволяет накапливать опыт и сохранять последовательность действий в цифровом виде, является перспективным направлением автоматизации прогнозов разработки для ряда аналогичных залежей
- Применение **цифровой стратегии разработки** нефтяных месторождений является важным шагом к созданию их цифровых двойников и включает автоматизацию процессов прогнозирования, повышение эффективности и оптимизацию проектируемых и действующих систем разработки в условиях геолого-технологических неопределенностей.
- Использование **элементов программирования** при моделировании **повышает квалификационные требования к инженеру-разработчику**, однако такие инструменты позволяют выполнять большой перечень задач автоматически для целой серии различных залежей.

