

Реализация цифровой стратегии разработки во многовариантном геолого-гидродинамическом моделировании

Н.А. Шевко¹, к.т.н

¹Группа Компаний «Газпром нефть»

Адрес для связи: Shevko.NA@yandex.ru

Ключевые слова: автоматизация, автоадаптация, анализ неопределённостей, прогнозирование разработки залежей

Увеличивающиеся требования к качеству прогнозирования геологии и разработки, анализа неопределенностей и управления рисками обуславливают необходимость проведения многовариантных и мультиреализационных расчетов. Современные информационные технологии и облачные решения позволяют эффективно выполнять такие расчеты, масштабируя вычислительные ресурсы на удаленных кластерах. Формализация логики построения геологических моделей и реализация последовательности процедур в виде набора встроенных команд (workflow) широко применяется на практике, однако в гидродинамическом моделировании данный подход требует развития.

Целью работы является практическая реализация цифровой стратегии разработки нефтяных месторождений с использованием встроенного в гидродинамический симулятор высокоуровневого (скриптового) языка программирования, позволяющего управлять логикой вычислений.

Важной задачей данного исследования является поиск подхода к формированию оцифрованной бизнес-логики процессов, используемых не только для автоматизации рутинных операций – построения, обновления и адаптации гидродинамических моделей, но и для описания более комплексной логики управления расчетами – стратегии прогнозирования и анализа неопределенностей показателей разработки с использованием многовариантного моделирования.

Для формализации цифровой стратегии введены специальные понятия, правила, объекты и конструкторы, позволяющие поэтапно строить стратегию разработки месторождения от этапа разведки до этапа эксплуатации с учетом внешних сценарных условий и критериев выхода из проекта. Для программной реализации этого подхода потребовалась интеграция скриптового языка (Lua) в существующий гидродинамический симулятор, написанный на C++.

Создание дополнительного уровня абстракции для управления логикой расчетов симулятора открыло новые возможности использования «гибких» форматов входных данных, динамически меняющихся при определенных внешних условиях, и способствовало автоматизации расчетов для различных сценариев, внедрению дерева принятия решений и созданию набора стратегий разработки, применяемых для серии моделей 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.

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

N.A. Shevko¹, Ph.D.

¹Gazprom Neft Group

E-mail: Shevko.NA@yandex.ru

Keywords: automation, auto-history matching, uncertainty analysis, reservoir development forecasting

Growing demands on the quality of geological and development forecasts, uncertainty analysis and risk management require multi-variant and multi-realization calculations. Modern information technologies and cloud solutions allow to perform such calculations efficiently. Computing resources can be scaled on remote clusters. Formalizing the logic of geologic model construction and implementing a sequence of procedures in the form of a set of built-in commands (workflow) is already widely used in practice, but in hydrodynamics modeling this approach needs to be developed.

The goal of the work is the practical implementation of the digital strategy of oil field development using a high-level (script) programming language embedded in the hydrodynamic simulator. This language allows to control the logic of calculations.

An important task of this study is to find an approach to formation of digitized business logic of processes used not only for automation of routine operations - construction, updating and adaptation of dynamic models, but also for description of more complex logic of calculation management - strategy of forecasting and uncertainty analysis using multivariate modeling.

To formalize the digital strategy, special concepts, rules, objects and constructs were introduced, which allow to build a field development strategy step-by-step - from the exploration stage to production, taking into account external scenario conditions and project exit criteria. The program implementation of this approach required the integration of a scripting language (Lua) into the existing dynamic simulator written in C++.

The creation of an additional level of abstraction to control the simulator's calculation logic opened up new possibilities for using flexible input data formats that dynamically change under certain external conditions, facilitated the automation of calculations for different scenarios, introduced a decision tree and, in general, created a set of development strategies applicable to a series of reservoir models.

The application of digital strategy for the development of oil fields is an important step towards the creation of their digital twins and includes the automation of forecasting processes, increasing the efficiency and optimization of designed and operating development systems under conditions of geological and technological uncertainties.

Введение

Цифровизация процессов в области геологии и разработки нефтяных месторождений открывает большие возможности для повышения эффективности, увеличения достоверности и ускорения принятия технологических и управленческих решений. Цифровые технологии имеют расширенный инструментарий для решения спектра актуальных интегрированных и многовариантных задач, а также автоматизации процессов моделирования геологии и разработки. Масштабирование вычислительных ресурсов за счет облачных технологий позволяет в реалистичные сроки выполнять многовариантные и мультиреализационные прогнозные расчеты с учетом рисков и неопределенностей. Развитием задач автоматизации прогнозирования разработки являются цифровые стратегии разработки (ЦСР), позволяющие описать различные стратегии прогнозирования разработки залежей с учетом геолого-технологических неопределенностей и внешних факторов.

Формализация логики построения геологических моделей и реализация последовательности процедур в виде набора встроенных команд (workflow) уже широко применяется на практике, однако в гидродинамическом моделировании этот подход требует развития.

Целью работы является практическая реализация цифровой стратегии разработки нефтяных месторождений с использованием встроенного в гидродинамический симулятор высокоуровневого (скриптового) языка программирования, позволяющего управлять логикой вычислений.

Основные задачи исследования:

- поиск подхода и формирование оцифрованной бизнес-логики процессов для автоматизации рутинных операций моделирования и комплексного управления прогнозными расчетами;
- реализация решений на базе собственного симулятора;
- отработка предлагаемых подходов на отдельных примерах.

Основа для реализации ЦСР

Для реализации цифровой стратегии разработки требуется подготовить инструменты для комплексного управления бизнес-логикой прогнозирования разработки с учетом

стандартной логики вычислений (workflow) симуляторов фильтрации и возможностей их улучшения для рассматриваемых задач.

Основными задачами и элементами для реализации ЦСР являются:

- Анализ текущего состояния многовариантного моделирования и прогнозирования разработки, недостатки и достоинства современных коммерческих симуляторов;
- Идея расширения возможностей симуляторов и варианты их реализации. Ранее предлагалось [1] использовать гибридную версию симулятора, где скриптовый язык встраивается в ядро симулятора, а стандартный, «жесткий» процесса расчета симулятора выносится во внешнюю среду.
- Решение и реализация минимального перечня подзадач:
 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.

Кратко рассмотрим вышеперечисленные элементы.

Базовая программа-симулятор фильтрации. В качестве ядра симулятора (core engine) используется авторский 3D трехфазный симулятор модели «черной нефти». Программа протестирована на качество реализации и надежность алгоритмов, сертифицирована ГКЗ РФ в 2016 г. Симулятор спроектирован на объектно-ориентированном подходе и имеет возможность создания и инициализации иерархии объектов моделирования, что является важным условием для решения комплексных, гибридных задач.

Выбор скриптового языка. В качестве скриптового языка выбран фреймворк Lua, который на основании критериев выбора, оказался более предпочтительным, чем десятки других высокоуровневых языков, включая Python и движок V8 от Google.

Изменение формата ввода входных данных. Встраивание скриптового языка в ядро симулятора позволяет использовать синтаксис языка для ввода данных. Удобный синтаксис языка устраняет имеющиеся недостатки «стандартного» формата коммерческих гидродинамических программ, а именно: сбор различных данных в одной

секции, инициализация объектов без учета их реального появления в расчете, статичность DATA-файла. Языковые инструменты позволяют задание именованных, вложенных структур, формировать модель в среде VS Code с проверкой синтаксиса, добавить в модель пользовательские функции, алгоритмы, считывание и выгрузка данных в пользовательском формате.

Формирование внешнего управления расчетом. В современных симуляторах имеется стандартный процесс вычислений, который основан на формате описания модели, последовательности задания ключевых слов и особенностей проектирования программы. При изменении формата входных данных снимаются ограничения на последовательность появления объектов моделирования (grid, local grid, aquifer и т.п.) и появляется возможность формирования иерархии объектов с учетом их подчиненности (зависимости), что упрощает их создание и инициализацию в актуальный момент времени их появления в процессе расчета. Вынесение стандартного процесса расчета из симулятора во внешнюю среду скрипта выполнялось следующим образом:

1. внешний скрипт имеет доступ к функциям симулятора, определяет общую логику расчета;
2. код программы разделен на компилируемую и интерпретируемую часть, таким образом, чтобы сохранить производительность гибридного кода программы;
3. скрипт, как самостоятельный язык, расширяет функциональность ядра за счет операции ввода-вывода, создания и задания свойств объектов, собственных процедур и алгоритмов.

Понятия, принципы, формулировки ЦСР

Для решения задач прогнозирования с учетом стратегии разработки требуется определить ключевые понятия, способы и варианты реализации, а именно:

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 т.п.);

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

Определим понятие **Цифровой стратегии разработки** как систему правил и последовательных действий, направленные на достижение глобальной (основной) цели с учетом внешних условий, ресурсных и технических ограничений.

Общие пояснения к понятию «стратегия» в рамках данной работы:

- **Стратегия**, используя набор проверенных решений и действий, зависящих от ситуации и состояния объекта, позволяет оптимально достичь цели. Общность стратегии позволяет применить ее к разным объектам.

- **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.

- **Правила основаны на опыте** реализации множества решений, имеют вероятностный характер и оптимальны в среднем. Правила носят декларативный (закон) или рекомендательный характер. Для конкретной залежи правила можно переобосновать с учетом ее геологических особенностей.

- **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.

Рассмотрим **типы стратегий**, в зависимости от основной цели стратегии или принципов, которые ее формируют, например:

- **Снижение рисков:** принцип «от известного к неизвестному» минимизирует риски или принцип «сначала проверь, потом начинай», при котором выполняется комплекс исследований и тестирований до принятия решений;

- **Максимальной эффективности:** принцип «минимальное усилие – максимальный результат»;

- **Получение быстрого результата:** принцип «быстрые победы»;

- Покупка актива: оценка вноса, первоначального капитала с учетом неопределённостей и т.п.

Реализация команд и алгоритмов по управлению разработкой – это набор обычных, часто используемых задач-алгоритмов, необходимых для составления целостной стратегии разработки, например поиск координат для размещения новых скважин, выбор конструкций скважин, ранжирование очередности и прочее.

Для упрощения формирования сложных стратегий определены следующие типы **элементов стратегии**: Strategy-Stage-Workflow-Task-Activity. Кратко охарактеризуем функциональность каждого программного элемента стратегии.

Stage (стадии):

- Стадии определяют свой набор целей, объектов и действий.
- После входа в стадию проверяются условия успешности стадии, если все выполняется – переходим далее.
- Успешность связана с полным или частичным выполнением перечня действий, достижением критерия успешности (например, полка по добыче), исчерпания ресурсов (число скважин закончилось).

Workflow (набор рабочих задач)

- Набор рабочих задач организуется как независимые потоки, которые могут приостанавливаться и возобновляться независимо друг от друга;
- Workflow создают параллельные потоки реализации задач с синхронизацией в точках отчета;

Task (задача)

- Задача определена целью и критерием успешности, в зависимости от успешности разные пути потоков действий (развилки).
- Есть независимые и зависимые задачи, связаны входом–выходом, а также подчинением – дочерние и материнские задачи.
- Задача имеет временной интервал и запускается один раз или много раз на нескольких шагах.

Activity (активность)

- Активность – это элементарная единичная операция для выполнения простого действия на скважине, ее соединениях, ввод скважины и прочее.

Rules (правила)

- Задание параметров по умолчанию, в зависимости от внешних критериев, состояния объекта или сложных условий от других переменных расчета.

Limits (лимиты)

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

Задание стратегии в виде цифрового описания иерархической структуры (рис.1) ее элементов (действия, потоки, условия, правила, стадии и тп.) является важным этапом формализации цифровой стратегии разработки, от корректности и общности которой зависит возможность тиражирования стратегии на несколько моделей залежи, на несколько однотипных залежей или в общем виде на другие залежи, накапливая тем самым опыт разработки и прогнозирования объектов разработки.

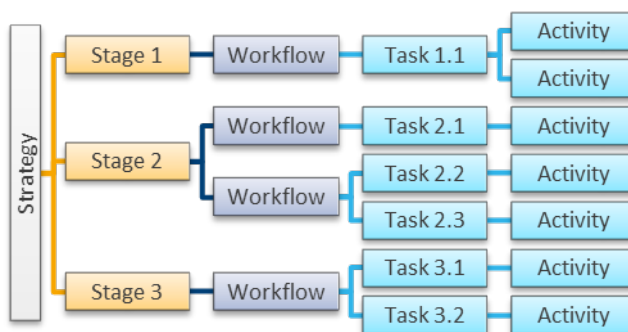


Рис. 1. Представление стратегия в виде иерархической структуры

Пример описания стратегии для разрабатываемой залежи, находящейся на 4 стадии разработки, со стадии разведки до эксплуатации и перспективных прогнозов продемонстрирован на рис. 2

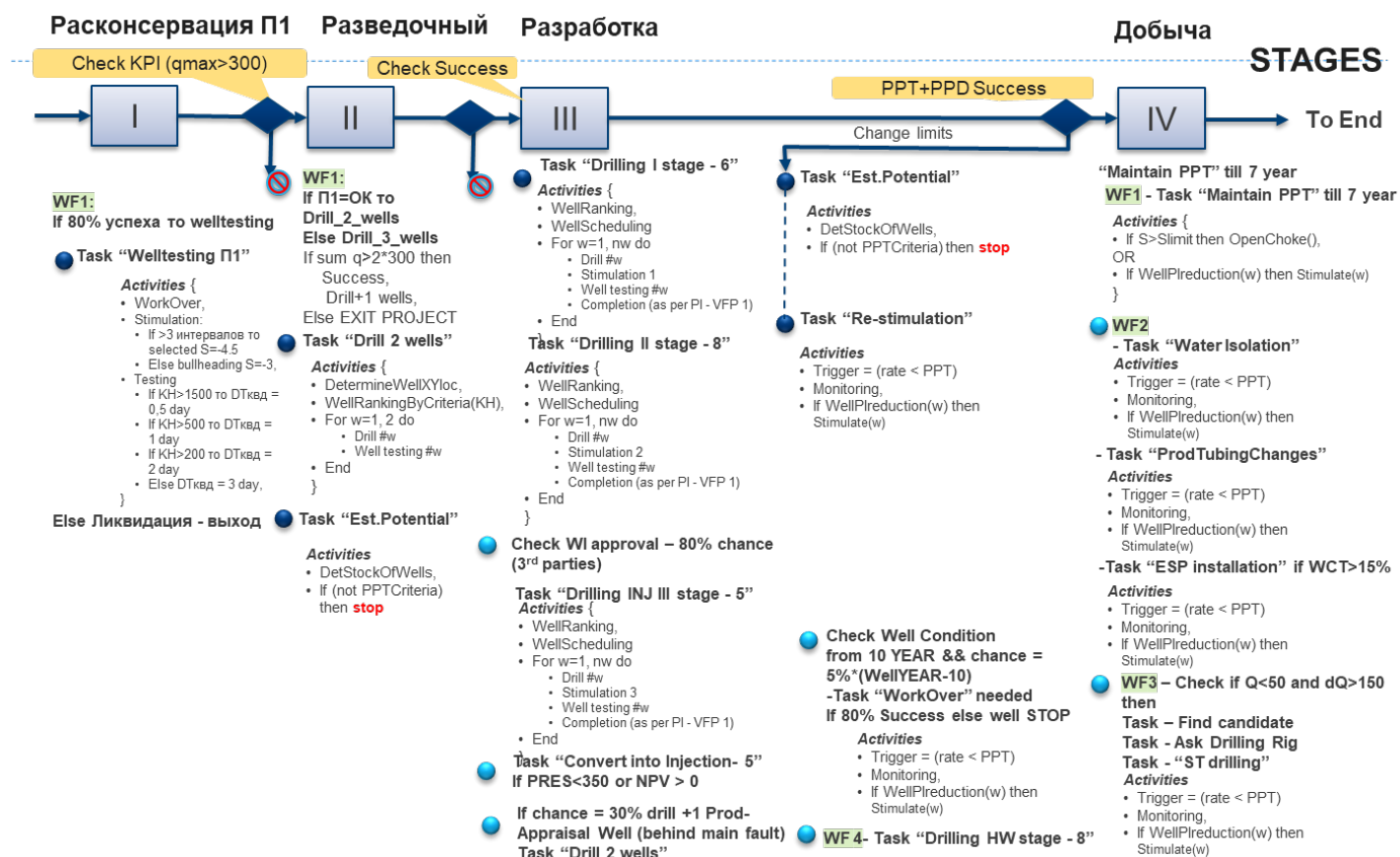


Рис. 2. Представление стратегии в виде иерархической структуры

Программная реализация стратегии реализуется в виде иерархии объектов, циклов, рабочих потоков, деревьев принятия решений с использованием скриптового языка во внешнем файле, который запускается на каждом временном шаге. Программирование стратегии с использованием элементов стратегии выглядит следующим образом (рис.3): вначале создается именованная стратегия вызовом конструктора new(), т.е. strategy = Strategy.new('Actual'), далее создается стадия stage1 = Stage.new('Appraisal'), задаются параметры этой стадии, стадия добавляется, как элемент, в объект-стратегию strategy:add_Stage(stage1), процесс повторяется для всех других элементов. Сформированная таким образом структура, автоматически запускается вызовом strategy:execute() на каждом временном шаге.

```
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 = wellsmen:get_vector_value("WOPT", "A-1");
11     local wq = wellsmen: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     wellsmen.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
```

Рис. 3. Пример участка кода скрипта для описания стратегии

Практическая реализация стратегии на примере brown field месторождения

Одним из преимуществ использования единой сформированной цифровой стратегии разработки является ее применение для различных реализаций залежи. Это существенно сокращает ручные операции по подготовке прогнозных DATA файлов для залежей, сильно различающихся реализациями геологической основы (например, P10, P50, P90).

Рассмотрим пример применения одной стратегии для множества реализаций залежи. Основа активностей стратегии состоит из исторических операций и перспективных планов развития залежи. Геологическая неопределенность учитывается посредством вариации водонефтяного контакта, гидропроводности пласта, проводящие и непроводящие разломы (блоковое строение), неоднородность коллектора (выдержанность пропластков). Технологическая неопределенность – качества стимуляции многопластовой залежи (через долю работающего пласта), скин-фактор.

Изменение динамики добычи нефти в зависимости от вариаций 6-ти параметров для 50 стохастических реализаций продемонстрировано на рис.4.

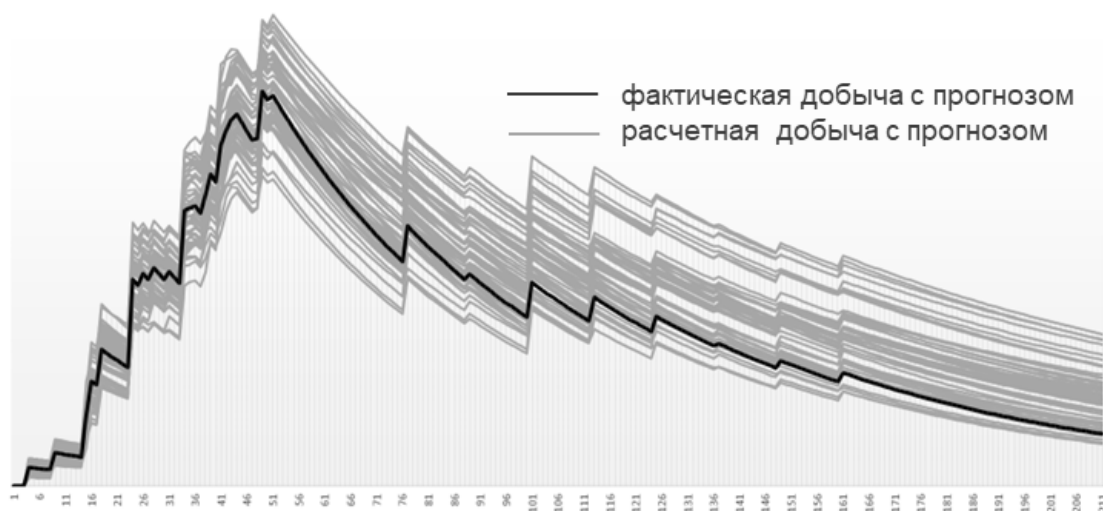


Рис. 4. Динамика добычи нефти для исторической стратегии разработки по 50 реализациям модели с учетом геолого-технологических неопределенностей

Применение набора разных стратегий разработки для одной залежи показывает, для рассматриваемого примера, как могла бы разрабатываться залежь если бы применили другие принципы разработки. Для новых неразрабатываемых залежей актуальной задачей будет оценка влияния разных стратегий на экономическую эффективность разработки проекта в условиях неопределенности и изменчивости внешних сценарных условий.

Рассмотрим 5 стратегий, применимых для рассматриваемой залежи: 1) **Actual** – фактическая, историческая стратегия; 2) **Low Risk** – низко рискованная стратегия с т.з. инвестиционных вложений, когда геологические риски минимизируются, за счет ожидания результатов каждой разведочной скважины, бурения «от известного», использования данных каждой предыдущей скважины для бурения нового кандидата, двух станков в разных независимых зонах; 3) **Min Capex** – разработать, разбурить залежь с минимальным затратами, учитывая критерий $UDC < 10$ (удельная стоимость бурения на накопленную добычу); 4) **PPT** – поддержание полки по добыче нефти за счет ускорения бурения; 5) **PPT + PPD** – поддержание фиксированной полки по добыче нефти в пределах заданной продолжительности (до 7 лет) при любом числе скважин, но с учетом

технических лимитах (четыре буровых станка). Сводная таблица с результатами расчетов и оценки экономической эффективности представлена в табл.1.

Таблица 1. Сравнение результатов использования различных стратегий разработки для одной залежи

#	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%

Максимально экономически эффективной стратегией оказалась стратегия 4, несмотря на ограничение добычи (полка) в начальный период, ускорение ввода новых скважин с поздних периодов на более ранние позволила увеличить как накопленную добычу (FOPT) на +3,1% от базового сценария, так и дисконтированный поток наличности (NPV) на 3,1. Стратегия 3 показала возможность существенного сокращения капитальных затрат (Capex) по бурению и добычи нефти при незначительном сокращении NPV.

Изменение динамики добычи нефти в зависимости от типа стратегии разработки для рассматриваемой залежи продемонстрировано на рис.5.

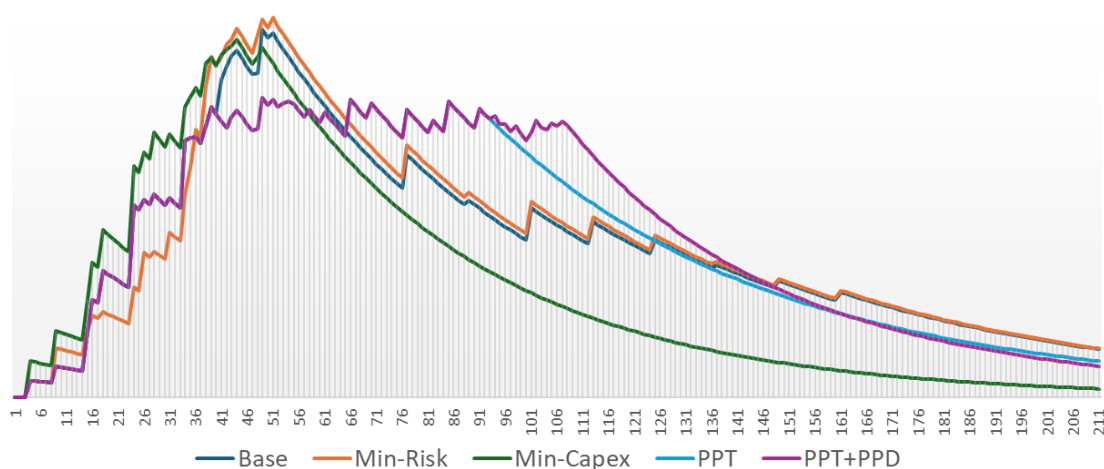


Рис. 5. Динамика добычи нефти для пяти стратегий разработки

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 цифровой стратегии разработки требуется:
 - симулятор с дополнительным уровнем абстракции, в виде скриптового языка;
 - описание различных типов стратегий, системы правил и технических ограничений, реализация алгоритмов локальных оптимизационных задач;
 - формализация планов и набора действий в виде иерархическую структуры 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.

Список литературы

1. *Шевко Н.А.* Автоматизация решения многовариантных задач в гидродинамическом симуляторе на основе использования динамических исходных данных и внешнего управления вычислительным процессом // Сборник материалов конференции «Российская отраслевая энергетическая конференция», г. Москва, 15–17 октября 2024. –М.: ООО «Геомодель Развитие», 2024. –С.1-4. ISBN: 978-5-9651-1557-0.