

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена изменениями, происходящими в нефтегазовой отрасли относительно оценки влияния неопределенностей на выбор стратегии разработки месторождения, а именно на последовательность бурения добывающих скважин. В современных нефтегазовых компаниях все большее внимание уделяется оценке экономических рисков, связанных с геологическими, макроэкономическими и политическими неопределенностями. В соответствии с этим при составлении стратегии разработки месторождения все больший приоритет отдается динамическим стратегиям бурения скважин, которые учитывают данные неопределенности и связанные с ними риски.

Таким образом, на сегодняшний день актуальной является проблема поиска оптимальной стратегии бурения, которая принимает во внимание основные неопределенности/риски и ограничивающие условия проекта разработки, такие как время пребывания в проекте, время бурения скважин, время принятия ключевых решений.

Основной целью разработки месторождения является максимизация прибыли компании оператора, разрабатывающего месторождение. Экономика проекта для компании оператора состоит из капитальных затрат на создание инфраструктуры месторождения и поверхностного обустройства, и денежного потока каждой скважины, который включает в себя:

- капитальные затраты на бурение скважины;
- операционные затраты на каждую добытую скважиной тонну нефти;
- доля нефти, которая по контракту полагается компании оператору проекта;
- выручка от продажи добытой скважиной нефти.

Актуальность проблемы исследования вызвана необходимостью поиска баланса, в условиях неопределенности, между основными экономическими параметрами проекта: капитальными затратами и количеству накопленной дисконтированной нефти за прогнозный период разработки месторождения, который обеспечит максимальное значение индекса ЧДД – чистого дисконтированного дохода (далее по тексту – NPV) проекта разработки.

Однако стоит заметить, что в условиях геологических неопределенностей, продуктивности планируемых скважин, задается в диапазоне неопределенности,

следовательно, существует неопределенности их денежного потока. Для того чтобы учесть неопределенность, в качестве альтернативы индексу NPV проекта используется индекс EMV – expected monetary value – ожидаемая денежная стоимость проекта.

В рамках данной работы предлагается рассмотреть ряд факторов, оказывающих влияние на поиск оптимальной, динамической последовательности бурения, которая обеспечит максимальный EMV проекта разработки. Таковыми факторами являются:

- 1) геологические неопределённости;
- 2) гибкость системы поверхностного обустройства месторождения;
- 3) синергия между очередностью бурения скважин относительно стоимости бурения;
- 4) ограничивающие условия проекта.

Целью настоящего исследования является разработка подхода, к поиску оптимальной последовательности бурения планируемых скважин с учетом вышеперечисленных факторов на примере месторождения Саркала.

В качестве объекта исследования в данной работе выступает стратегия разработки месторождения.

Предметом исследования является оптимизация стратегии бурения в условиях неопределенности и внешних ограничивающих условий проекта разработки месторождения.

Задачами данного исследования являются:

1. Разработка методологии выделения основных факторов: геологических неопределенностей, внешних ограничений и т.д., влияющих на извлекаемые запасы месторождения и на экономику проекта разработки.
2. Поиск подхода к оптимизации стратегии бурения с учетом каждого из влияющих факторов по отдельности.
3. Анализ и обобщение полученной информации с целью разработки подхода к оптимизации последовательности бурения с учетом влияния нескольких факторов.

Научная новизна исследования заключается в том, что в данной работе исследование направлено на рассмотрение комплексного влияние нескольких факторов, которые имеют разную природу, на процесс выбора оптимальной стратегии бурения скважин.

Практическая значимость данного исследования состоит в том, что предлагаемый подход, может быть использован при разработке месторождения в условиях неопределенности и внешних ограничений проекта. Помимо этого, предложенная методология создает базу для своего дальнейшего развития и расширения – создания оптимизатора, который может учитывать все возможные действия на месторождении и их временную привязку, помимо бурения добывающих скважин:

- решение о проведении геологоразведочных работ;
- решение о бурении нагнетательных скважин;
- решение по инфраструктуре.

6 Расчет ожидаемой денежной стоимости скважин

В данной главе экономика скважин рассчитывается в предположении гибкой системы обустройства месторождения.

В зависимости от реализации основной неопределенности – уровня ВНК, профиля добычи скважин будет разные, следовательно, будет изменяться денежный поток каждой скважины: выручка и операционные затраты. Данные параметры зависят от дебита каждой скважины, поэтому они зависимы от уровня ВНК.

Экономика каждой скважины и проекта в целом зависит не только от геологической неопределенности, но также и от очередности бурения скважин. Согласно экономической модели цена на бурение скважины может изменяться в зависимости от того какой по счету она будет пробурена – синергия расходов. Также стоит отметить, что с каждой пробуренной скважиной цена поверхностного обустройства увеличивается не на постоянную величину. Из **Ошибка! Источник ссылки не найден.** мы можем видеть, что наибольшие затраты на поверхностное обустройство приходятся при решении о бурении четвертой скважины.

Еще одним важным фактором, влияющим на чистый дисконтированный доход скважины, является уменьшение покупательной способности заработанных денег, в результате дисконтирования. Соответственно прибыль скважины будет также зависеть от времени ввода скважины в эксплуатацию с момента начала разработки месторождения.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод, что прибыль – NPV каждой скважины зависит от трех факторов (в предположении гибкой системы разработки):

- геологическая неопределенность месторождения, в нашем случае ВНК;

- очередность ее бурения;
- время ввода скважины в эксплуатацию с момента начала проекта.

Если предположить, что между бурением скважин не будет происходить временных потерь, то остается 2 фактора – ВНК и очередность бурения. Следовательно, необходимо выполнить оценку зависимости NPV каждой из планируемых скважин от реализации геологической неопределенности – уровня ВНК и очередности бурения скважины.

6.1 Получение зависимости NPV – ВНК

Первым шагом на данном этапе является расчёт базовых профилей добычи скважин в зависимости реализации уровня ВНК. Расчет профилей добычи был выполнен для крайних значений неопределенности уровня ВНК= -3574 – нижней границы установленной нефтеносности и ВНК= -3760 – точки максимального заполнения ловушки, Рисунки 17 – 20. На Рисунок 5, Рисунок 6 показано сравнение профилей добычи для разных реализаций геологии, на примере скважин S-2, S-7.

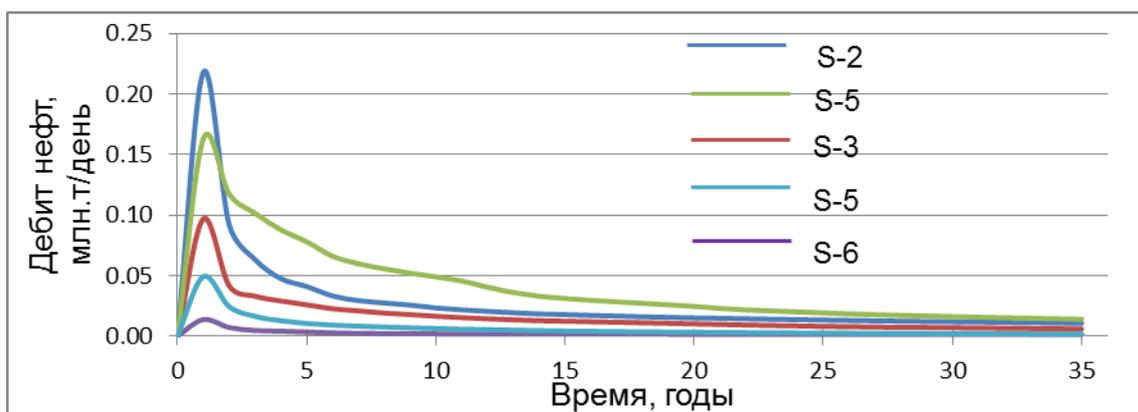


Рисунок 1. Базовые профили скважин, для реализации ВНК=-3574

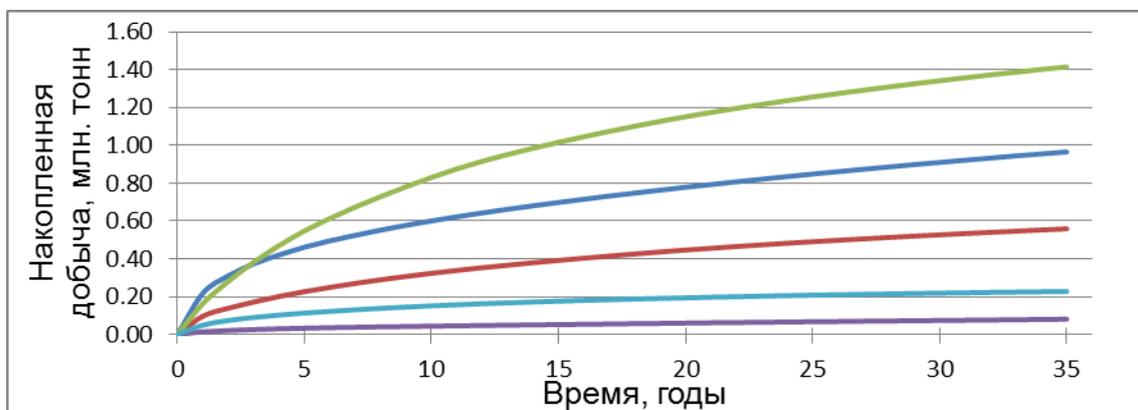


Рисунок 2. Накопленная добыча скважин, реализация ВНК=-3574

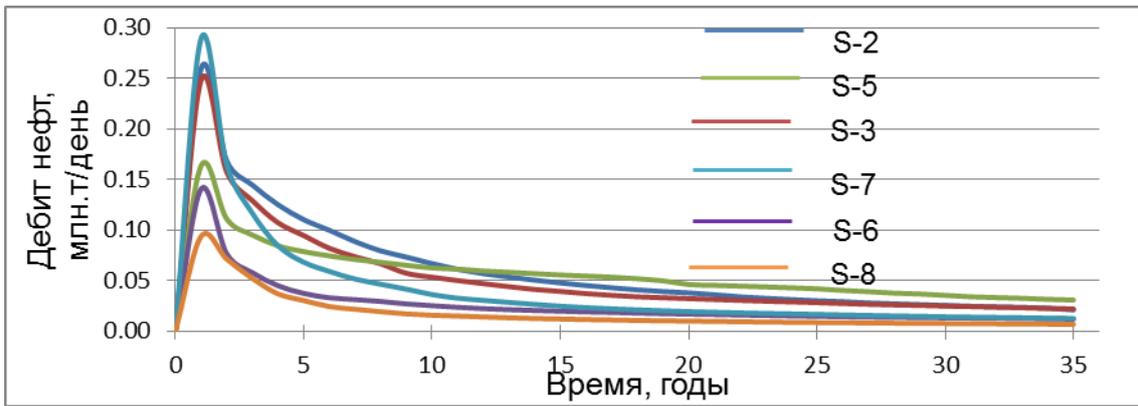


Рисунок 3. Базовые профили скважин, для реализации ВНК=-3760

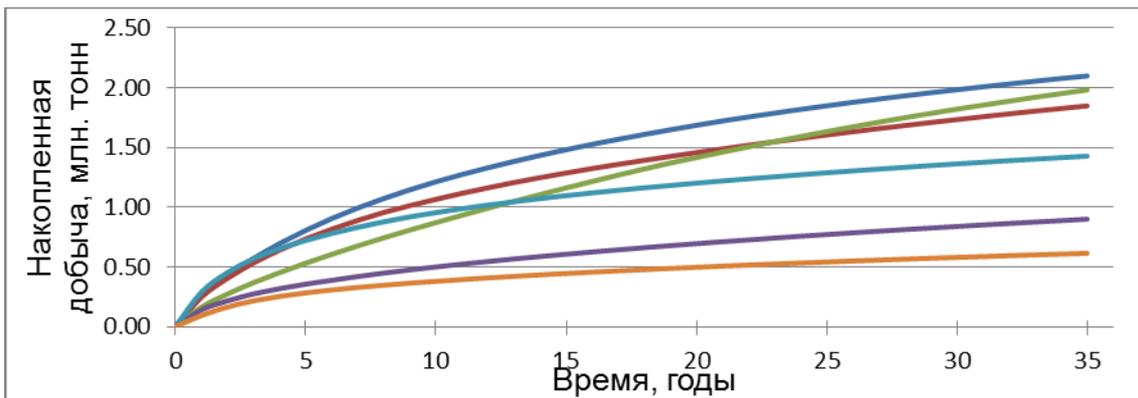


Рисунок 4. Накопленная добыча скважин, реализация ВНК=-3760

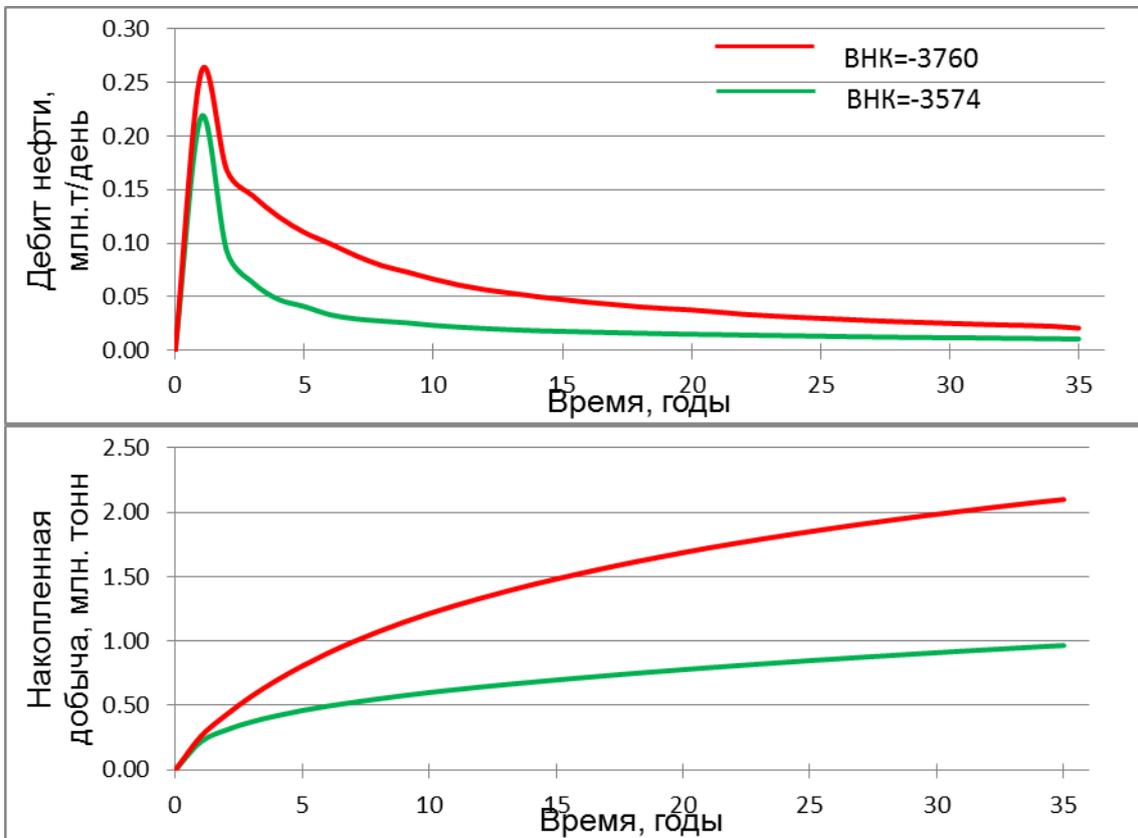


Рисунок 5. Базовые профили и накопленная добыча, скважина S-2

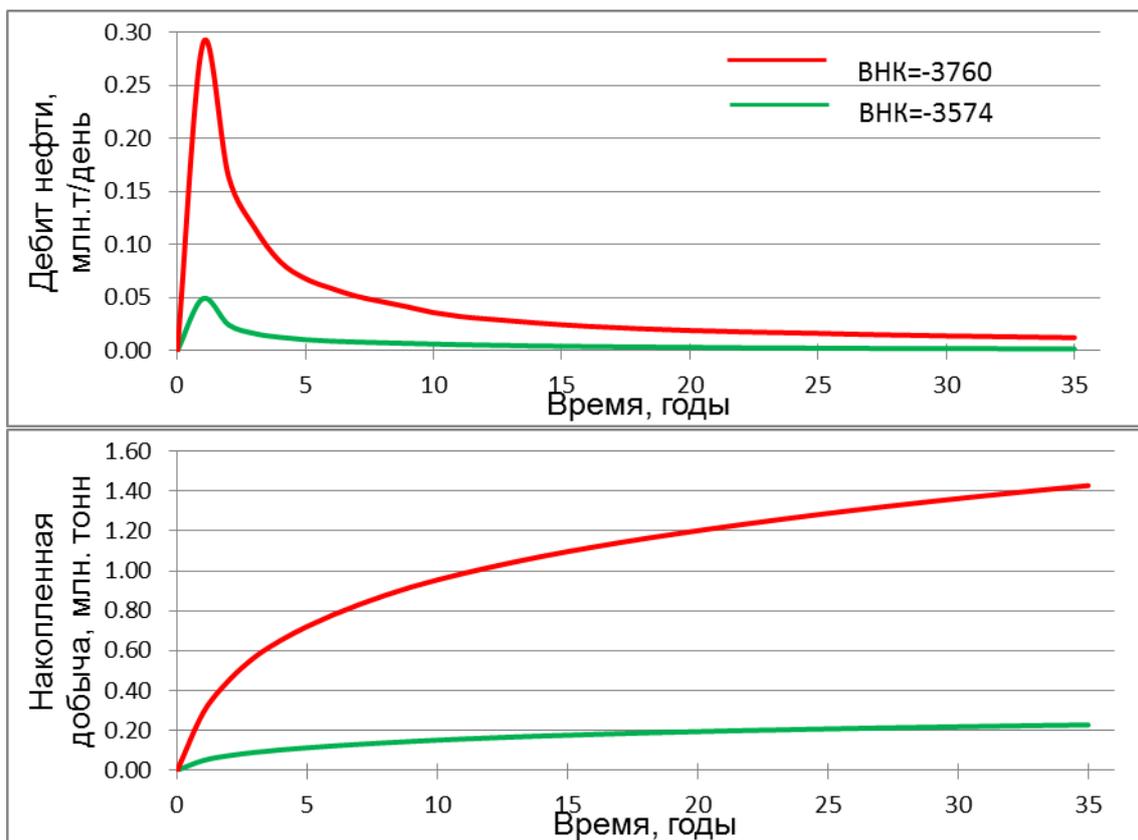


Рисунок 6. Базовые профили и накопленная добыча, скважина S-7

Дальнейшим шагом был проведен расчет текущего и накопленного NPV каждой скважины в зависимости ее очередности бурения с использованием профилей добычи для двух граничных значений неопределенности ВНК, Рисунок 8, Рисунок 8.

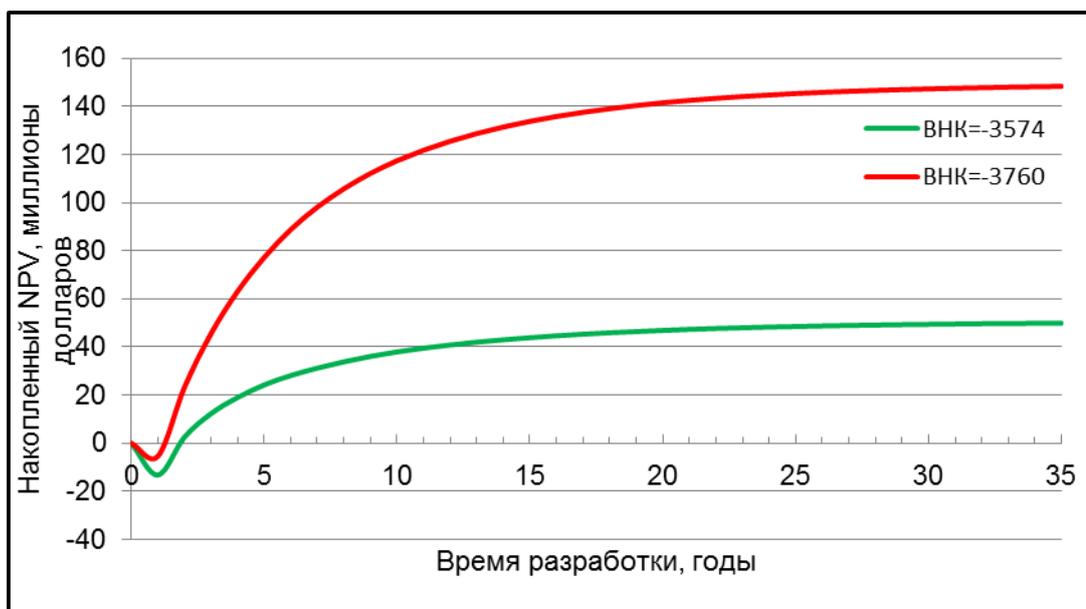


Рисунок 7. Накопленный NPV, для двух граничных реализаций ВНК, скважина S-2, очередность – 1

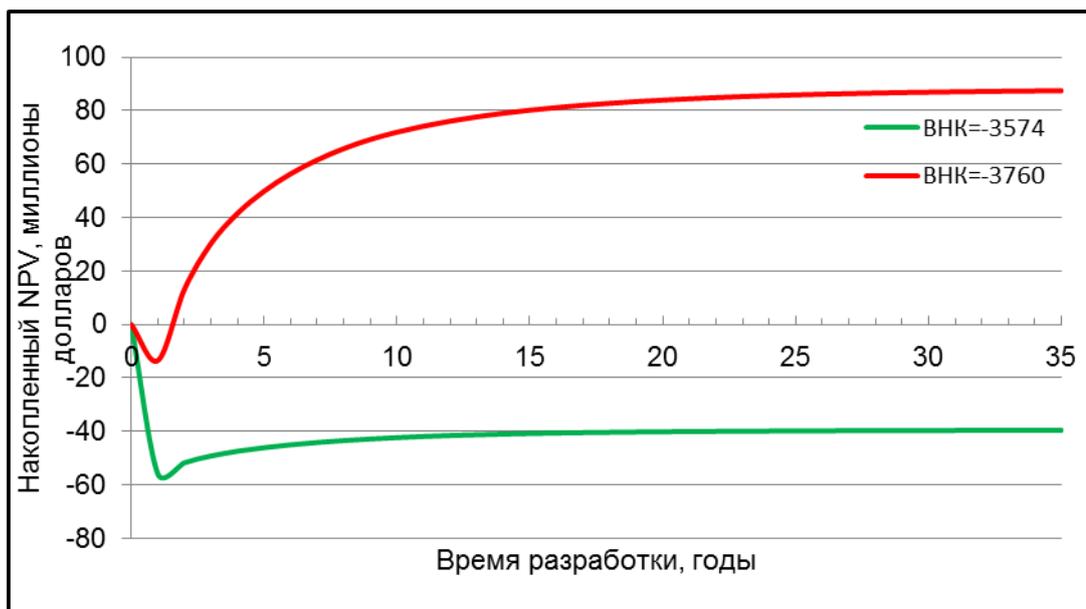


Рисунок 8. Накопленный NPV, для двух граничных реализаций ВНК, скважина S-7, очередность - 1

В предположении линейной зависимости между профилями добычи от уровня ВНК для каждой скважины в зависимости и ее очередности может быть построена линейная функция, вида $kx+b$ аппроксимирующая поведение NPV в зависимости от реализации ВНК, $NPV=F(ВНК)$.

Данная процедура показана на примере двух скважин S-2, S-7. Для скважины S-2 получение линейных зависимостей для разной очередности отражено в Таблица 1, Рисунок 9, Рисунок 10. Для скважины S-7 получение линейных зависимостей для разной очередности показано в Таблица 2, Рисунок 11, Рисунок 12.

Процесс построения зависимостей NPV–ВНК обобщен в [Приложении 1](#).

Таблица 1. NPV скважины S-2 в зависимости от уровня ВНК и порядка бурения.

S-2	NPV, миллионов долларов					
	1	2	3	4	5	6
3574	49.91	28.41	33.01	16.66	25.39	26.19
3760	148.30	117.85	114.32	90.58	92.59	87.28

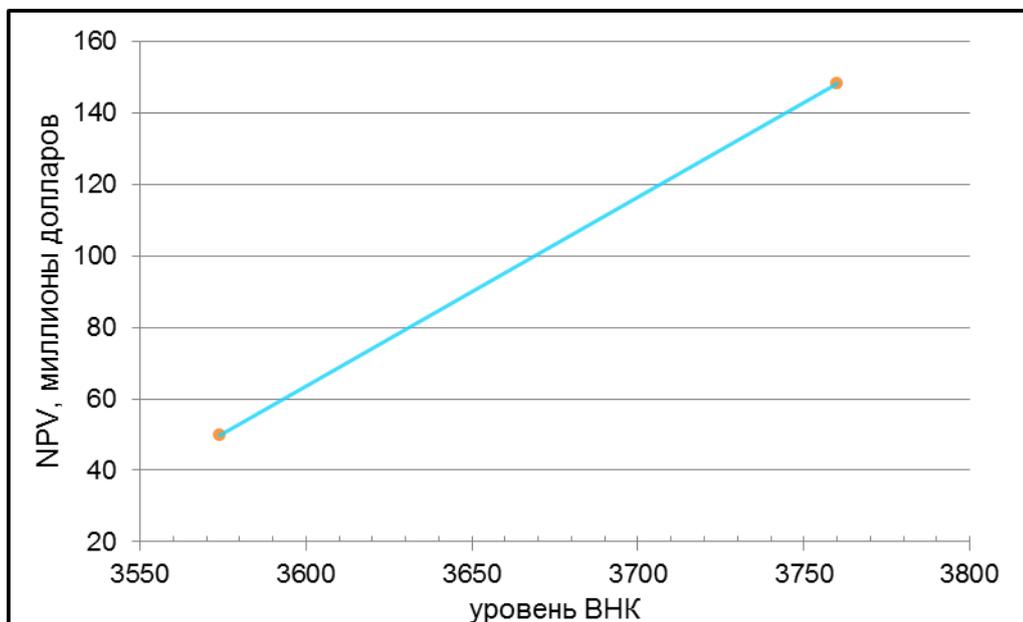


Рисунок 9. Аппроксимирующая зависимость NPV - ВНК, скважина S-2, порядок бурения – 1ая.

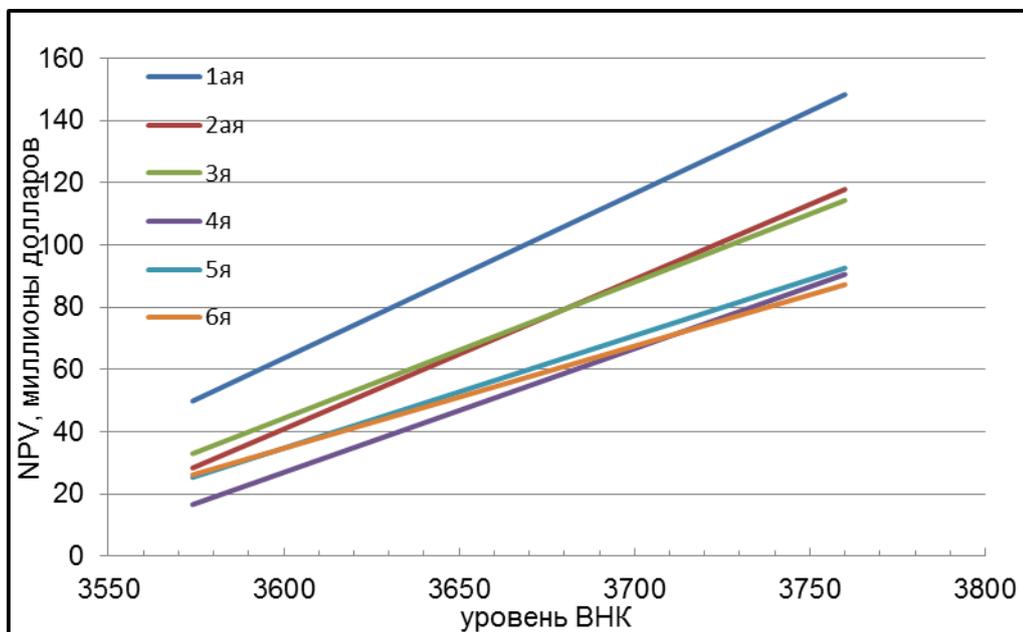


Рисунок 10. Зависимости NPV-ВНК, скважина S-2, порядок бурения 1-6

Таблица 2. NPV скважины S-7 в зависимости от уровня ВНК и порядка бурения.

S-7	NPV, миллионов долларов					
	1	2	3	4	5	6
3574	-39.54	-46.54	-47.03	-46.33	-31.88	-25.87
3760	87.47	68.92	57.94	49.10	54.88	52.99

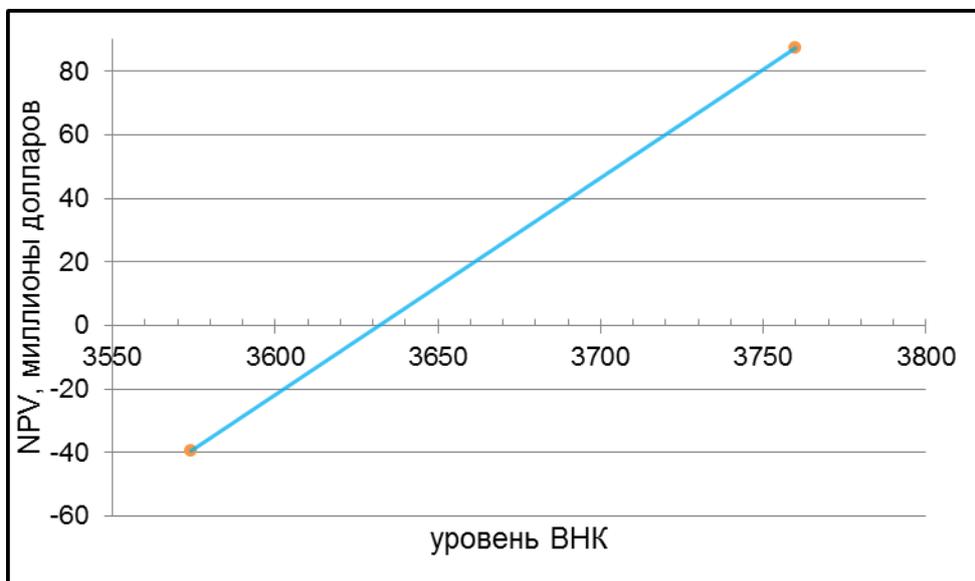


Рисунок 11. Аппроксимирующая зависимость NPV - ВНК, скважина S-7, порядок бурения – 1ая

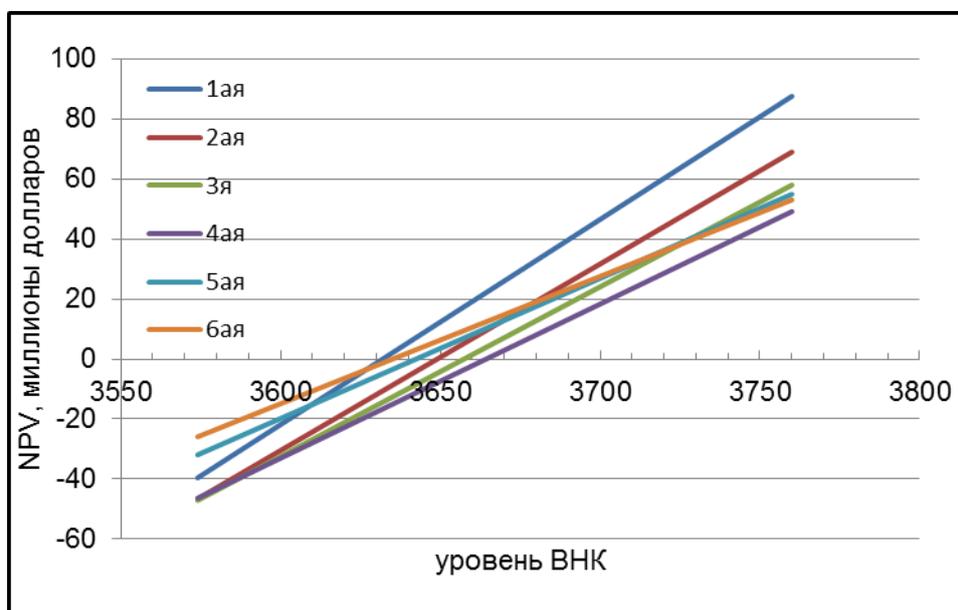


Рисунок 12. Аппроксимирующая зависимость NPV - ВНК, скважина S-7, порядок бурения 1-6

6.2 Расчет EMV скважин

В связи с тем, что ВНК не имеет фиксированного уровня на данный момент, и находится в диапазоне неопределенности, то вместо NPV необходимо использовать индекс EMV – expected monetary value – понятие «ожидаемая денежная стоимость» [1]

$$EMV = \sum p_i \cdot NPV_i \quad (1)$$

С учетом того, что уровень ВНК распределен непрерывно и равномерно в интервале $[-3574; -3760]$, то вычисление EMV для скважины определенной очередности с текущей неопределенностью ВНК будет производиться по формуле:

$$EMV = \frac{\int_{-3760}^{-3574} (kx + c) dx}{3760 - 3574} \quad (2)$$

где k и c коэффициенты линейной функции, аппроксимирующие NPV скважины в зависимости от реализации геологии.

В случае снятия неопределенности до определенного уровня – бурения скважины, которая имеет вероятность попасть в ЧНЗ, ВНЗ или ЧВЗ, EMV скважины может быть посчитан по той же, формуле:

$$EMV = \frac{\int_a^b (kx + c) dx}{b - a} \quad (3)$$

где a и b – неопределенность ВНК после получения информации об уровне ВНК – частичного снятия неопределенности.

Если неопределенность снята полностью, то из данной зависимости легко можно получить NPV скважины подстановкой уровня ВНК в формулу.

В общем виде EMV скважины можно представить как

$$EMV = \frac{\int_a^b f(x) dx}{b - a} \quad (4)$$

Где $f(x)$, функция аппроксимирующая зависимость NPV скважины от реализации геологии – уровня ВНК, в предположении, что реализации геологии в неопределенности $[a, b]$ равновероятна.

6.3 Проверка сделанных допущений

Для проверки достоверности линейной аппроксимации между профилями скважин крайних случаев ВНК было добавлено еще 3 профиля для промежуточных реализаций геологии, то есть дополнительных три точки на график накопленный ЧДД – ВНК.

Сравнивая Рисунок 13 и Рисунок 14 видно, что для скважины S-2 линейная зависимость не является достоверной аппроксимацией поведения ЧДД – ВНК. В таком случае искалась квадратичная аппроксимация поведения ЧДД – ВНК, Рисунок 15.

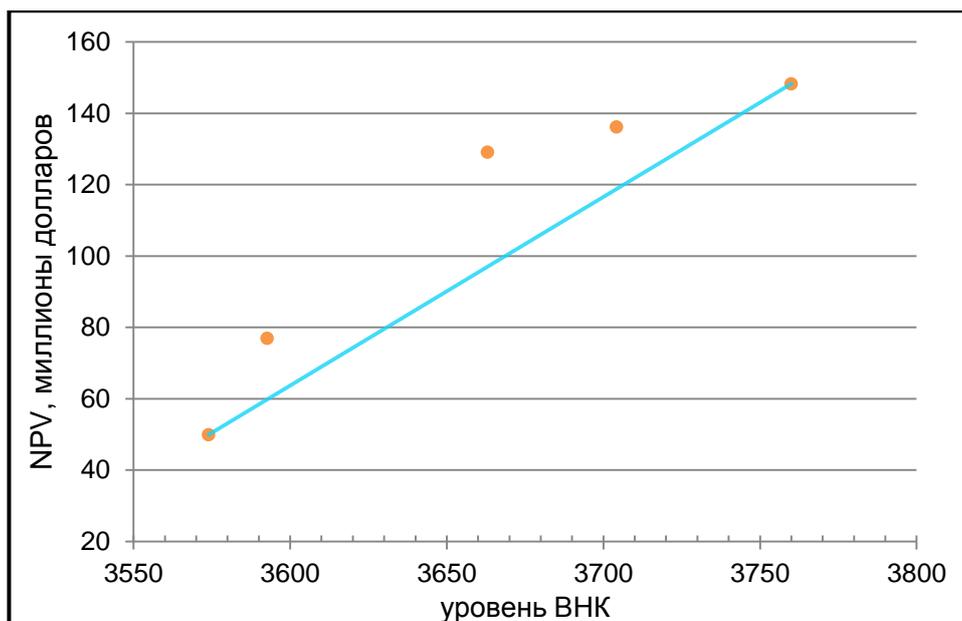


Рисунок 13. Проверка достоверности линейной аппроксимации поведения накопленного NPV в зависимости от уровня ВНК, скважина S-2

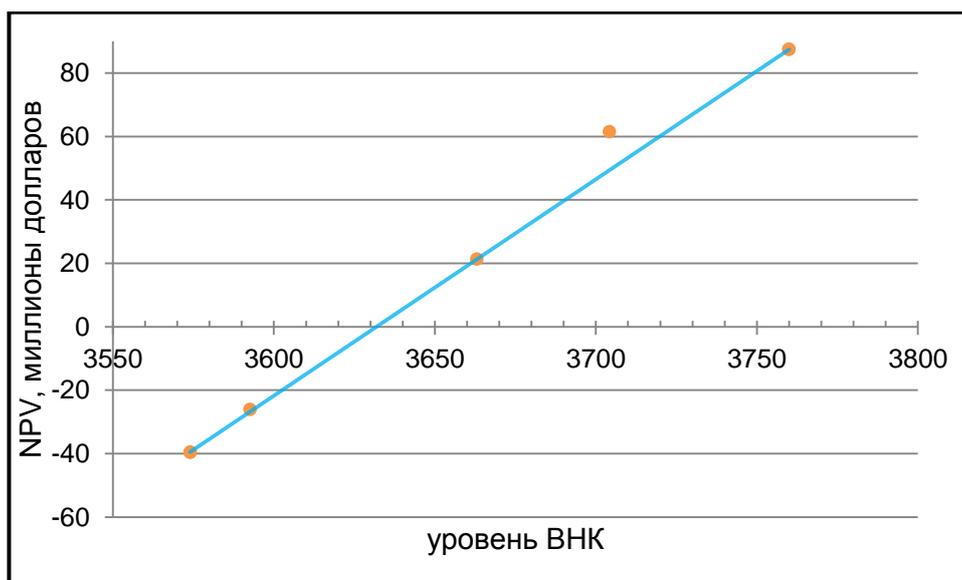


Рисунок 14. Проверка достоверности линейной аппроксимации поведения накопленного NPV в зависимости от уровня ВНК, скважина S-7

В случае если точки не имели линейного тренда, то добавлялось еще 3 точки – 2 промежуточные реализации геологии и искалась квадратичная функция в качестве аппроксимирующей: $f(x)=kx^2+px+q$.

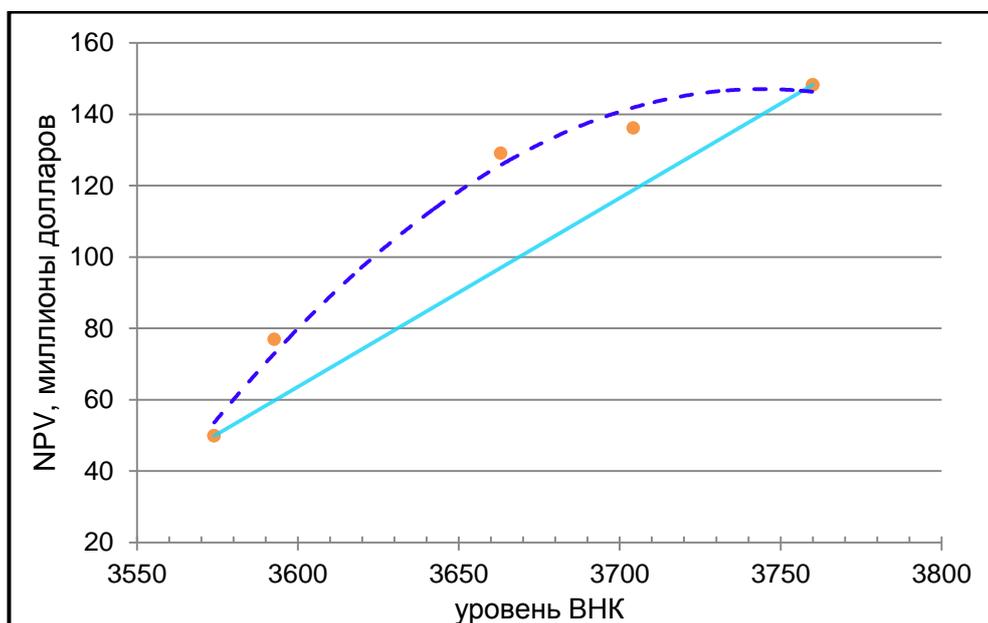


Рисунок 15. Поиск наилучшей аппроксимирующей зависимости NPV-ВНК, скважина S-2

S-2	NPV, миллионов долларов					
	1	2	3	4	5	6
3574	49.91	28.41	33.01	16.66	25.39	26.19
3593	76.95	53	55.36	36.98	43.86	42.98
3663	129.11	100.41	98.47	76.17	79.49	75.37
3704	136.14	106.81	104.28	81.45	84.29	79.73
3760	148.30	117.85	114.32	90.58	92.59	87.28

6.4 Итоги расчета EMV планируемых скважин

Итогом данной главы можно считать получение для каждой скважины и ее очередности линейных и квадратичных аппроксимаций, которые описывают поведение NPV скважины в зависимости от уровня ВНК. Получив для каждой скважины в зависимости от ее очередности функцию накопленный ЧДД – ВНК можно посчитать EMV каждой скважины в условии неопределенности ВНК и составить таблицу EMV скважин, Таблица 3.

Таблица 3. EMV скважины в зависимости от порядка ее бурения для изначальной неопределенности ВНК

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Дальнейший анализ данной таблицы и выбор базовой стратегии бурения скважин освещен в главе Базовая стратегия бурения.

7 Базовая стратегия бурения

Из полученной таблицы видно, что существует $6!=720$ различных последовательностей бурения, из которого необходимо выбрать одну оптимальную последовательность.

В качестве базовой стратегии разработки было принято решение рассмотреть стратегию бурения по «жадному алгоритму» – greedy algorithm [3]. Стратегия жадного алгоритма заключается в принятии локально оптимальных решений на каждом шаге, в предположении, что в итоге это приведет к оптимальному результату.

В рамках данной задачи, стратегия жадного алгоритма будет заключаться в максимизации EMV на каждом шаге выбора скважины. Чтобы сделать это нам необходимо для каждой очередности сравнить EMV каждой скважины между собой и выбрать максимально значение.

Методика такого подхода продемонстрирована для выбора первой скважины.

1. В первую очередь строятся аппроксимирующие функции поведения NPV в зависимости от ВНК для очередности 1, Рисунок 16.

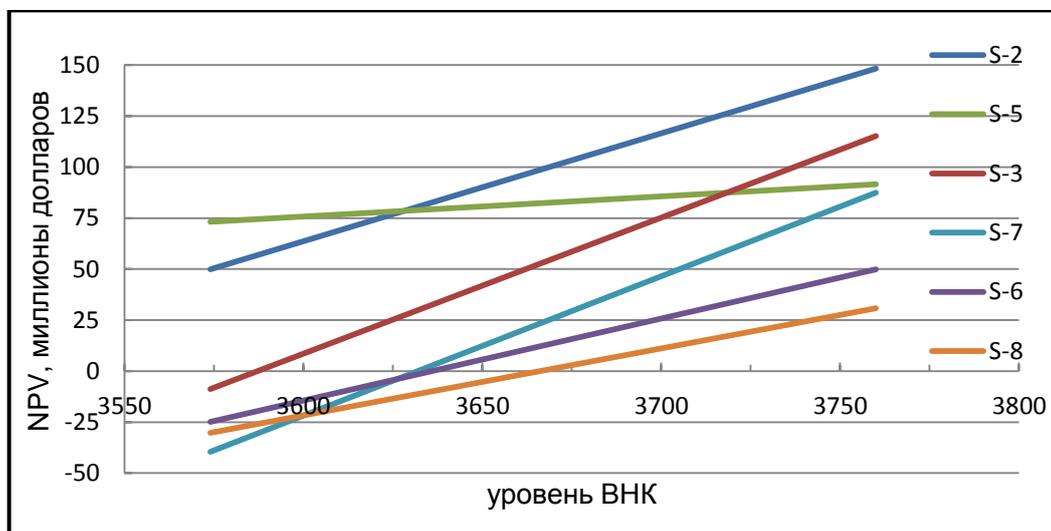


Рисунок 16. Поведение накопленного NPV скважины в зависимости от уровня ВНК, для очередности – 1.

2. Рассчитывается EMV для каждой скважины по формуле (4), Таблица 4.

Таблица 4. Расчет EMV планируемых скважин для очередности 1.

Well drilled first	k	p	q	OWC uncertainty	EMV, млн. \$
S-2	0	0.53	1840.58	-3574	99,1
S-3	0	0.10	-280.17		53,2
S-5	0	0.67	-2391.55		82,4
S-6	0	0.68	-2480.14	-	12,5
S-7	0	0.40	1460.94	-3760	23,9
S-8	0	0.33	-1203.15		0,270

3. Ранжируем скважины согласно значению EMV

Well drilled first	EMV, млн. \$
S-2	99,1
S-5	82,4
S-3	53,2
S-7	23,9
S-6	12,5
S-8	0,270

4. Выбираем скважину с максимальным значением EMV, именно эта скважина должна быть пробурена первой.

Такой подход удобно осуществить, анализируя построенную таблицу. Выбирая на каждом шаге максимальное значение столбца не принимая во внимание строки уже пробуренных на предыдущих шагах скважин, Рисунок 17.

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Рисунок 17. Поиск базовой стратегии бурения скважин – максимизации EMV на каждом шаге.

Полученная базовая стратегия согласно жадному алгоритму представлена на Рисунок 18.

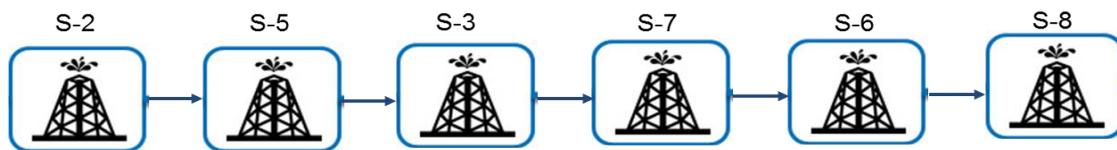


Рисунок 18. Базовая последовательность бурения (жадный алгоритм).

График NPV скважин базовой стратегии бурения. Анализируя данный график, видно, что скважины S-3, S-6, S-7, S-8 находятся в зоне экономического риска – имеется

вероятность, что данные скважины окажутся нерентабельными. В таблице представлено минимальное рентабельное значение ВНК для скважин. Следовательно, если до момента бурения скважин находящихся в зоне экономического риска, получить информацию об уровне ВНК, то в зависимости от полученной информации может быть принято решение о прекращении бурения, так как дальнейшее бурение – нерентабельно.

скважина	Рентабельный уровень ВНК
S-2	-3574
S-5	-3574
S-3	-3608
S-7	-3664
S-6	-3654
S-8	-3673

Поэтому необходимо провести анализ как планируемые скважины могут снизить

неопределенность уровня ВНК. На Рисунок 20 и в Таблица 5 представлены интервалы входа и выхода в/из пласта каждой из планируемых скважин.

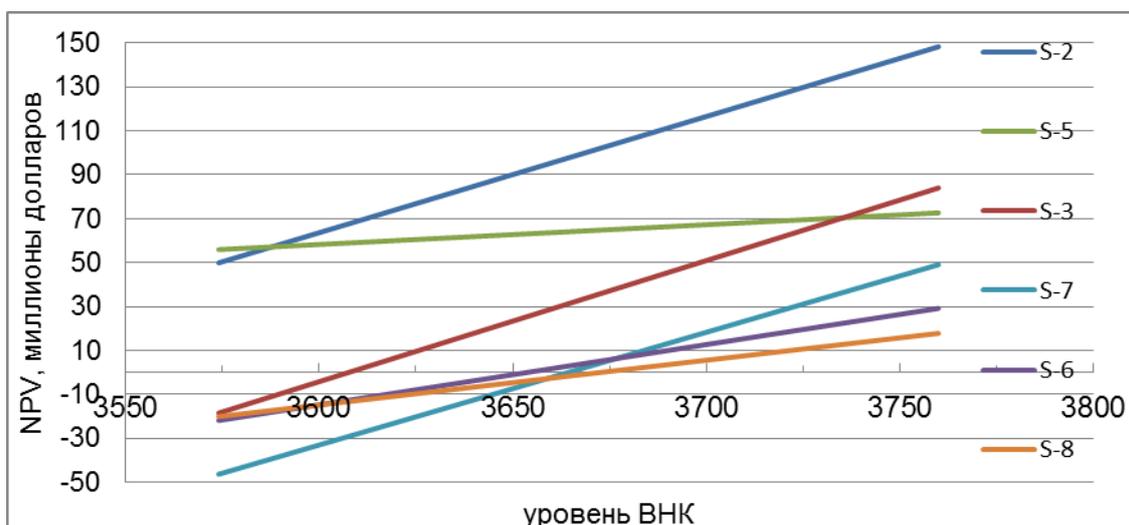


Рисунок 19. Зависимость NPV – ВНК для базовой стратегии бурения скважин, S-2-S-5-S-3-S-7-S-6-S-8.

Анализируя таблицу глубин входа и выхода скважин из продуктивного интервала, можно заметить, что скважина S-7 принесет нам первую информацию – снизит неопределенность уровня ВНК и в зависимости от исхода ее бурения может быть принято решение бурить ли скважину S-6. В случае если скважина S-7 подсчет ВНК, то бурение S-6 будет неоправданным, так как из Таблица 5 видно, что рентабельный уровень ВНК для скважины S-6 начинается с глубины –3654 метров и решение о бурение будет оправдано с точки зрения EMV, если скважина S-7 окажется в ЧНЗ.

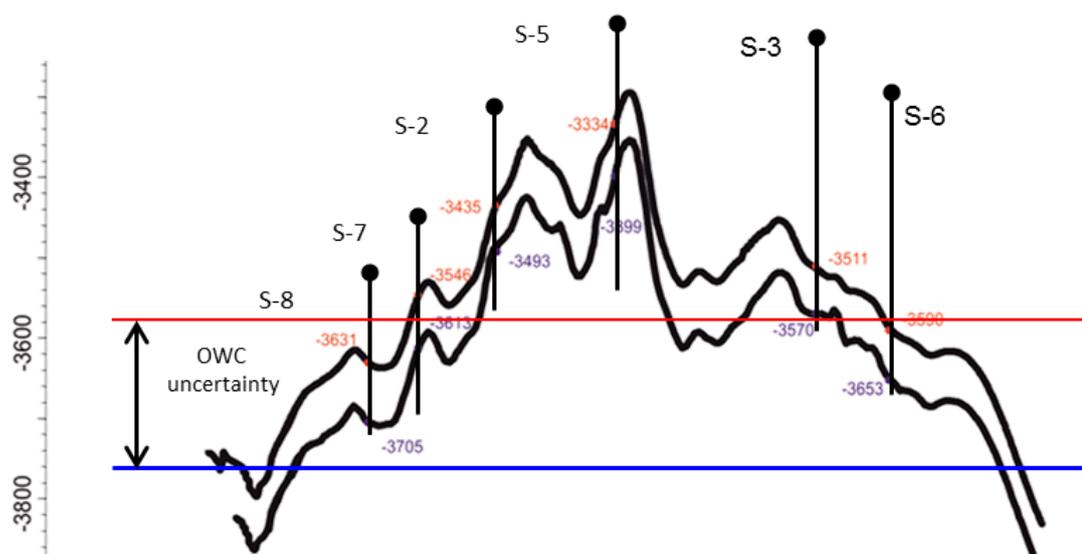


Рисунок 20. Положение планируемых скважин, глубины входа/выхода в/из интервала Jeribe – U.Dhiban.

Таблица 5. Глубины кровли и подошвы для планируемых скважин.

скважина	TVDSS кровли, м	TVDSS подошвы, м
S-2	-3435	-3493
S-5	-3334	-3399
S-3	-3511	-3570
S-7	-3546	-3613
S-6	-3590	-3653
S-8	-3631	-3705

Подобные выводы можно будет сделать после бурения скважины S-6, если скважина подсчет ВНК – ВНЗ или окажется в ЧВЗ, то можно сразу прекращать бурения,

так как EMV скважины S–8 будет отрицательным. В случае же попадания скважины S–6 в ЧНЗ решение о бурении скважины S–8 будет оправданным.

В итоге базовую стратегию разработки можно представить в виде дерева, ветвящееся после бурения скважин S–7, S–6 в зависимости от реализации геологии, Рисунок 21.

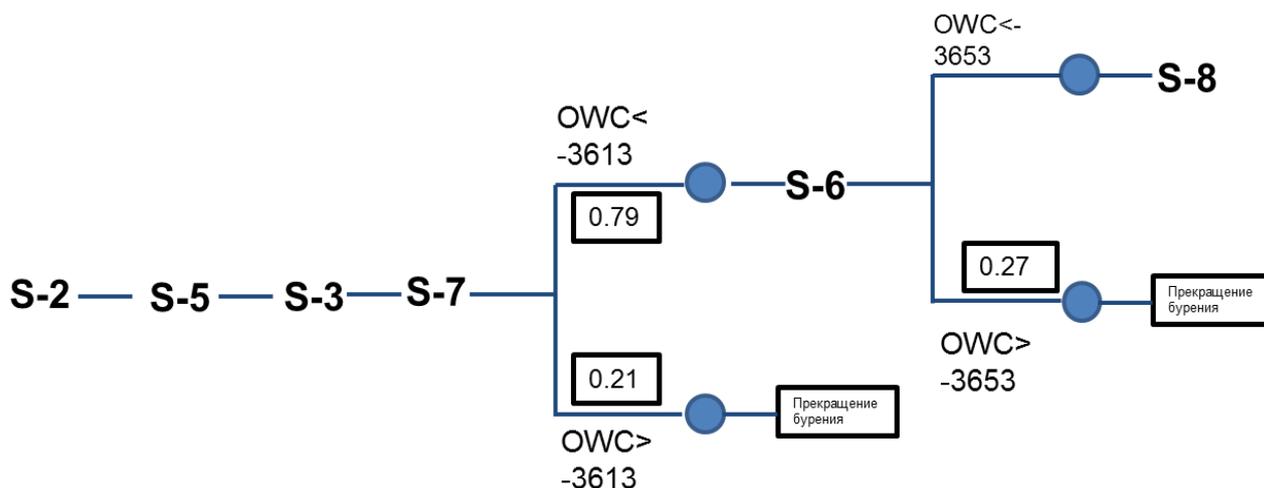


Рисунок 21. Дерево базовой стратегии бурения.

Видно, что пробуренная скважина S – 7 в случае попадания в ЧВЗ или ВНЗ даст нам сигнал прекращения бурения, так как при таком исходе скважины S – 6, S – 8 бурить нерентабельно. Исход попадания скважины в ЧНЗ и продолжения бурения – скважиной S-6 имеет свою вероятность, соответственно после выполнения данного исхода все дальнейшие реализации геологии будут ограничены, тем самым моделируется снижение неопределенности по ВНК после бурения скважины S–7.

Пробуренная скважина S – 6 в случае попадания в ЧВЗ или ВНЗ даст нам сигнал прекращения бурения, так как при таком исходе скважины S – 8 бурить нерентабельно. Исход попадания скважины в ЧНЗ и продолжения бурения – скважиной S – 8 имеет свою вероятность, соответственно после выполнения данного исхода все дальнейшие реализации геологии будут ограничены, тем самым моделируется снижение неопределенности по ВНК после бурения скважины S–6.

В итоге мы получаем 3 терминальных узла которые не имеют дочерних элементов:

- прекращения бурения после пробуренной S-7;
- прекращения бурения после пробуренной S-6;
- окончание полной стратегии бурения – после S-8.

Для того чтобы посчитать ожидаемый NPV данной стратегии бурения необходимо посчитать ожидаемый NPV для каждого терминального узла а затем сложить полученные ожидаемые NPV, взвешенные по вероятностям исходов – оказаться в этом терминальном узле.

В терминальном узле ожидаемый NPV рассчитывается только для тех реализаций геологии, которые к нему приводят, :

- в узле – «прекращения бурения» после пробуренной скважины S - 7 EMV рассчитывается только для реализаций в которых ВНК <-3613 м.
- в узле – «прекращения бурения» после бурения скважины S – 6 EMV рассчитывается для случаев -3613 м > ВНК > -3653 м.
- В узле – «окончания программы бурения» после пробуренной скважины S-8 EMV рассчитывается для реализаций -3653>ВНК>-3760.

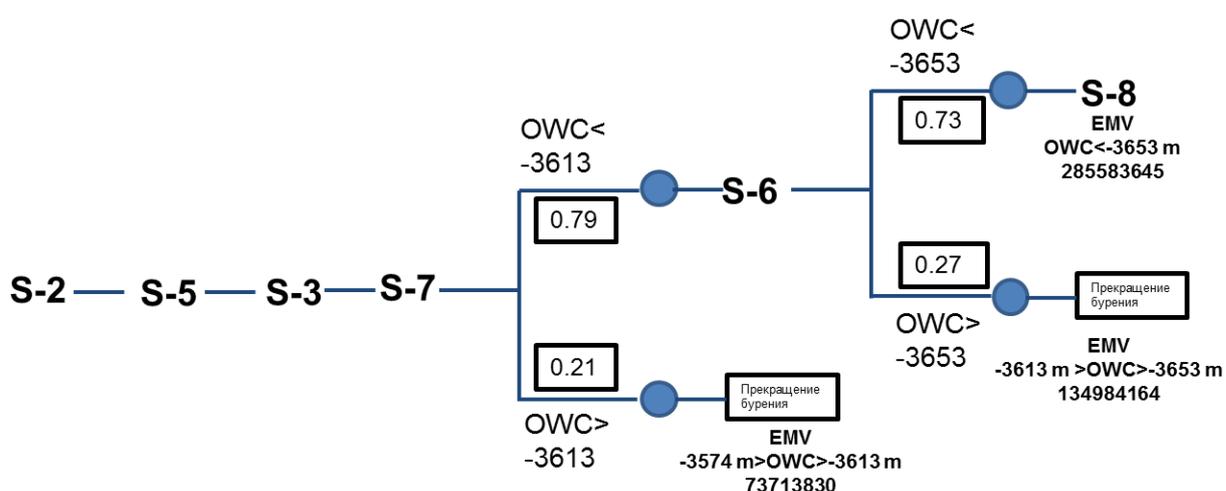


Рисунок 22.Базовая стратегия бурения, расчет EMV стратегии.

Общий EMV данной стратегии бурения:

$$EMV = 0,21 \cdot (73713830) + 0,79 \cdot (0,73 \cdot 285583645 + 0,27 \cdot 134984164) = 208772344 \text{ млн } \$$$

Данная стратегия бурения максимизирует EMV на каждом шаге – в первую очередь бурятся скважины дающие максимальный EMV. Однако такой подход не всегда дает оптимальный конечный результат.

Во–первых, он не учитывает ценовую синергию, явление описанное в главе Экономическая модель.

Во–вторых, он не берет во внимание стоимость информации, которую мы можем получить от скважин, имеющих геологический риск и с помощью данной информации –

вовремя прекратить бурение, тем самым не потерять деньги на бурении следующих скважин и поверхностном обустройстве для них.

В третьих данная стратегия была рассчитана в предположении гибкости системы поверхностного обустройства.

Анализ оптимальной стратегии бурения с учетом вышеприведенных факторов рассматривается в следующих главах.

8 Оптимизация последовательности бурения

Для поиска оптимальной стратегии бурения относительно базовой, необходимо предложить другие возможные варианты очередности скважин – другие последовательности и сравнить EMV других стратегий с EMV базовой стратегии (208.8 млн. долларов). Если EMV другого варианта больше, то стратегия является наиболее оптимальной для данного месторождения, данных мест для бурения и данной экономической ситуации.

Большее значение EMV может быть получено за счет выбора экономически оптимальной стратегии разработки с учетом изменения цены на бурения в зависимости от очередности и цены на поверхностное обустройство.

Также более выгодная стратегия бурения может за счет получения информации на более раннем этапе, в случае если информация, полученная с помощью данной скважины, будет полезной при принятии решения таким образом, что EMV данной стратегии окажется больше EMV базовой стратегии. В данном случае разность является индекс ценности информации – VOI [7, 9, 10].

Оптимальная стратегия будет считаться найденной, если в результате работы будет предложена стратегия бурения скважин EMV которой больше базового или же будет показано, что такой стратегии нет.

Алгоритм поиска оптимальной стратегии бурения будет состоять из следующих этапов:

1. поиск оптимальной стратегии бурения исходя из экономической модели без учета стоимости информации;
2. оптимизация получившейся стратегии с учетом стоимости информации – индекса VOI, которую могут дать скважины в результате снятия неопределенности.

8.1 Оптимизация с учетом гибкой модели поверхностного обустройства

Для осуществления этапа 1 необходим анализ все возможных вариантов размещений скважин. Количество возможных размещений скважин равно $6! = 720$. Данную задачу можно разрешить методом динамического программирования – полного перебора – «brute force»[2]. Однако, стоит заметить, что в данной таблице элементы матрицы рассчитаны для изначальной неопределенности ВНК и не учитывают ее снижение после бурения скважин 7,6,8. Поэтому был предложен следующий способ анализа. Определить

первые две скважины, которые будут оптимальны в любом случае, а затем проанализировать перестановки оставшихся 4-х. Такой подход сокращает количество вариантов с 720 до 28 и возможно рассмотреть все эти варианты с учетом того, что скважины, имеющие геологический риск снизят неопределенность ВНК.

Предлагается рассмотреть стратегии вида **S-2 – S*** – далее **жадная стратегия (максимизация EMV на каждом последующем шаге)**, где S* – любая из скважин, кроме S-5, так как данная стратегия является базовой. Сравнив EMV данных стратегий мы определим оптимальную S* – скважину которую необходимо бурить второй.

Таких стратегий получается 4:

$$S_2 - S_3 - S_5 - S_7 - S_6 - S_8$$

$$S_2 - S_7 - S_5 - S_3 - S_6 - S_8$$

$$S_2 - S_6 - S_5 - S_3 - S_7 - S_8$$

$$S_2 - S_8 - S_5 - S_3 - S_7 - S_6$$

В случае если данные стратегии не дадут превосходства над базовой стратегией, то последовательность S₂ – S₅ может считаться оптимальной. Выбор отправной точки в качестве скважины S–2 обусловлен тем, что в случае переноса изменения ее очереди с первой на вторую или следующие мы видим максимальные потери по экономике (–26) млн. долларов.

S₂ – S₃ – S₅ – S₇ – S₆ – S₈, EMV=213140259, Рисунок 23, Рисунок 24.

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Рисунок 23. Последовательность 2-3-5-7-6-8

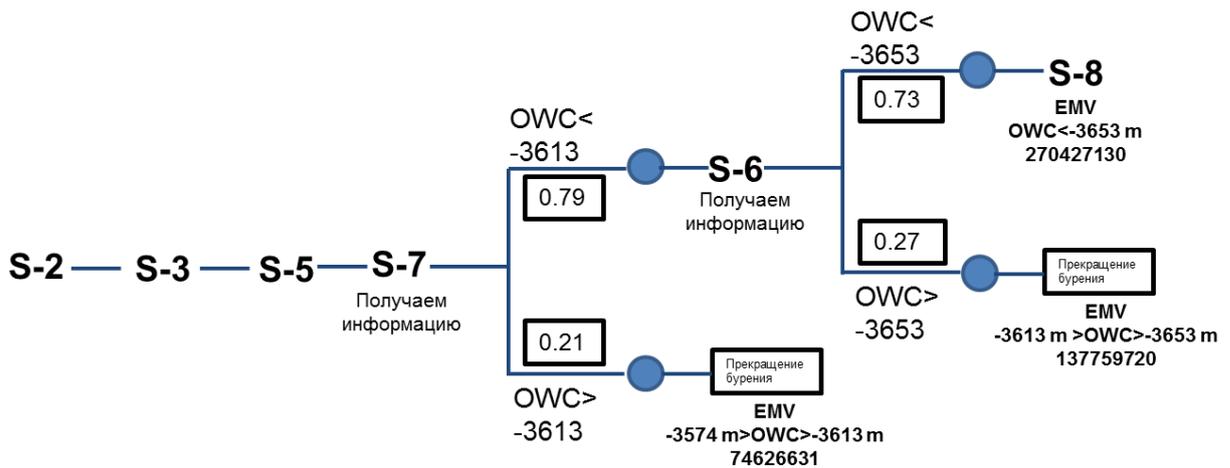


Рисунок 24. Дерево решений стратегии 2-3-5-7-6-8.

Таблица 6. Определение рентабельного ВНК

скважина	Благоприятный уровень ВНК
S-2	-3574
S-3	-3605
S-5	-3574
S-7	-3664
S-6	-3654
S-8	-3673

$S_2-S_7-S_5-S_3-S_6-S_8$, $EMV = 211486666$, Рисунок 25, Рисунок 26.

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Рисунок 25. Последовательность 2-7-5-3-6-8

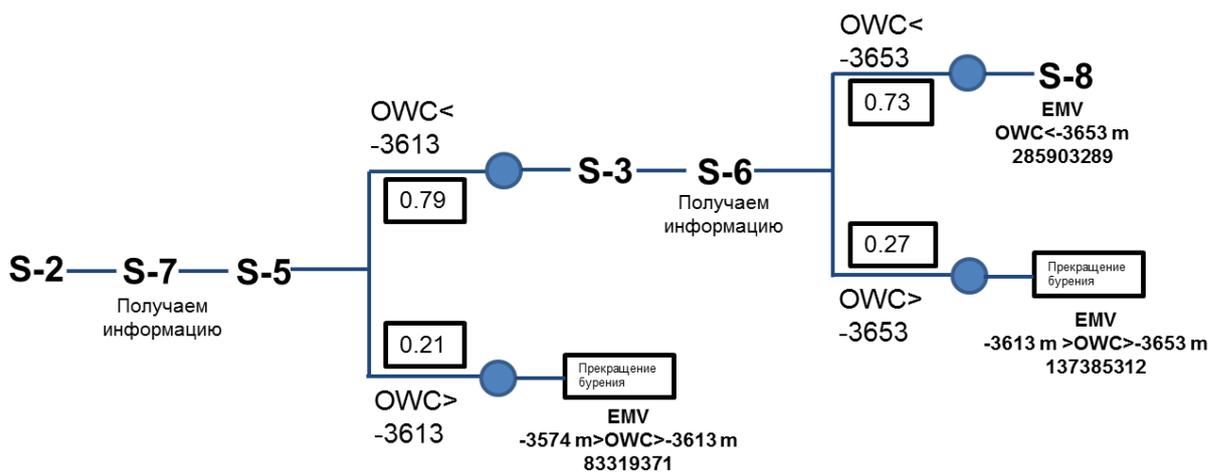


Рисунок 26. Дерево решений стратегии 2-7-5-3-6-8

Таблица 7. Определение рентабельного ВНК.

скважина	Благоприятный уровень ВНК
S-2	-3574
S-7	-3649
S-5	-3574
S-3	-3623
S-6	-3654
S-8	-3673

$S_2-S_6-S_5-S_3-S_7-S_8$, $EMV = 210408449$, Рисунок 27, Рисунок 28.

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Рисунок 27. Последовательность 2-6-5-3-7-8

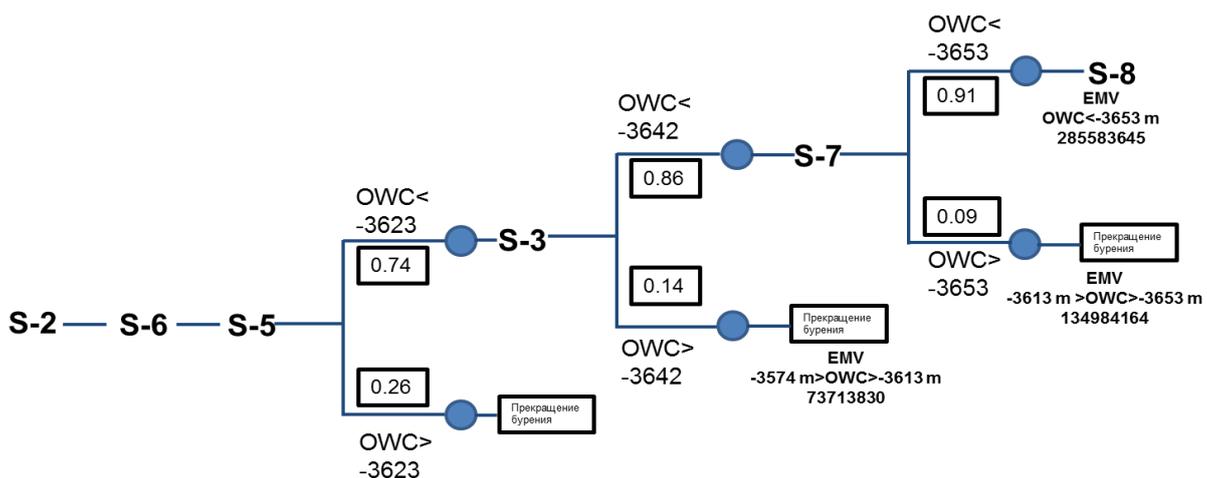


Рисунок 28. Дерево решений стратегии 2-6-5-3-7-8

Таблица 8. Определение рентабельного ВНК

скважина	Благоприятный уровень ВНК
S-2	-3574
S-6	-3665
S-5	-3574
S-3	-3623
S-7	-3642
S-8	-3673

$S_2-S_8-S_5-S_3-S_7-S_6$, $EMV = 204536819$, Рисунок 29, Рисунок 30.

	EMV, млн \$					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
S-2	99.1	73.1	73.6	53.6	59	56.7
S-3	53.2	37.7	32.7	21.9	30.2	30.6
S-5	82.4	64.3	63.7	54	59.3	57
S-6	12.5	0.743	-4.04	-7.25	3.65	6.42
S-7	23.9	11.1	5.4	1.33	11.5	13.5
S-8	0.27	-10.4	-14.1	-16.4	-4.68	-1.15

Рисунок 29. Последовательность 2-8-5-3-7-6

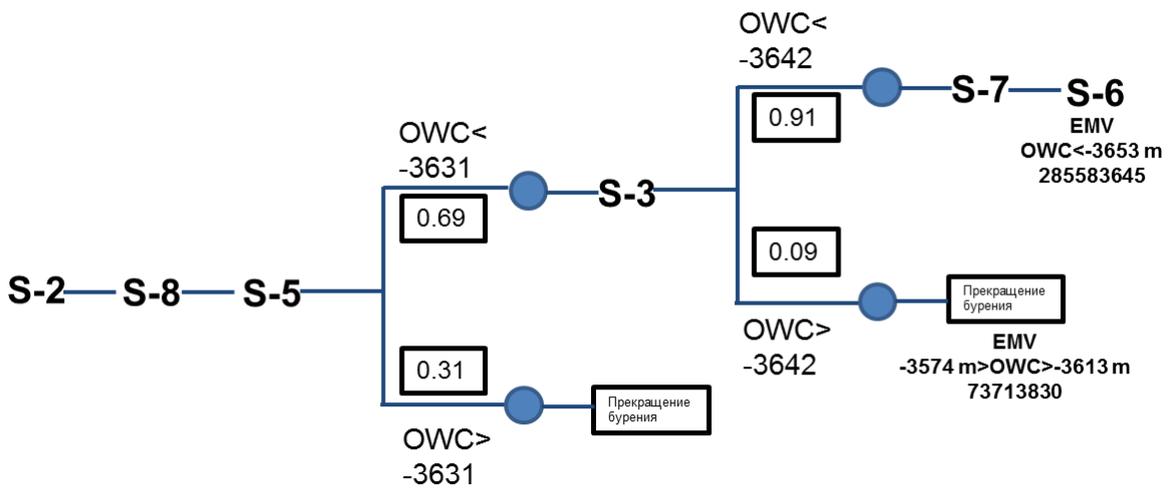


Рисунок 30. Дерево решений стратегии 2-8-5-3-7-6

Таблица 9. Определение рентабельного ВНК

скважина	Благоприятный уровень ВНК
S-2	-3574
S-8	-3702
S-5	-3574
S-3	-3623
S-7	-3643
S-6	-3641

Наибольшее значение EMV дает стратегия S-2-S-3-S-5-S-7-S-6-S-8, следовательно, в качестве оптимизации базовой стратегии бурения может быть рекомендована изменение последовательности бурения скважин S-5 и S-3.

Таблица 10. Сравнение EMV предложенных стратегий и базовой.

Стратегия	EMV, \$
S ₂ -S ₅ -S ₃ -S ₇ -S ₆ -S ₈ базовая	208772344
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₇ -S ₆ -S ₈	213140259
S ₂ -S ₇ -S ₅ -S ₃ -S ₆ -S ₈	211486666
S ₂ -S ₆ -S ₅ -S ₃ -S ₇ -S ₈	210408449
S ₂ -S ₈ -S ₅ -S ₃ -S ₇ -S ₆	204536819

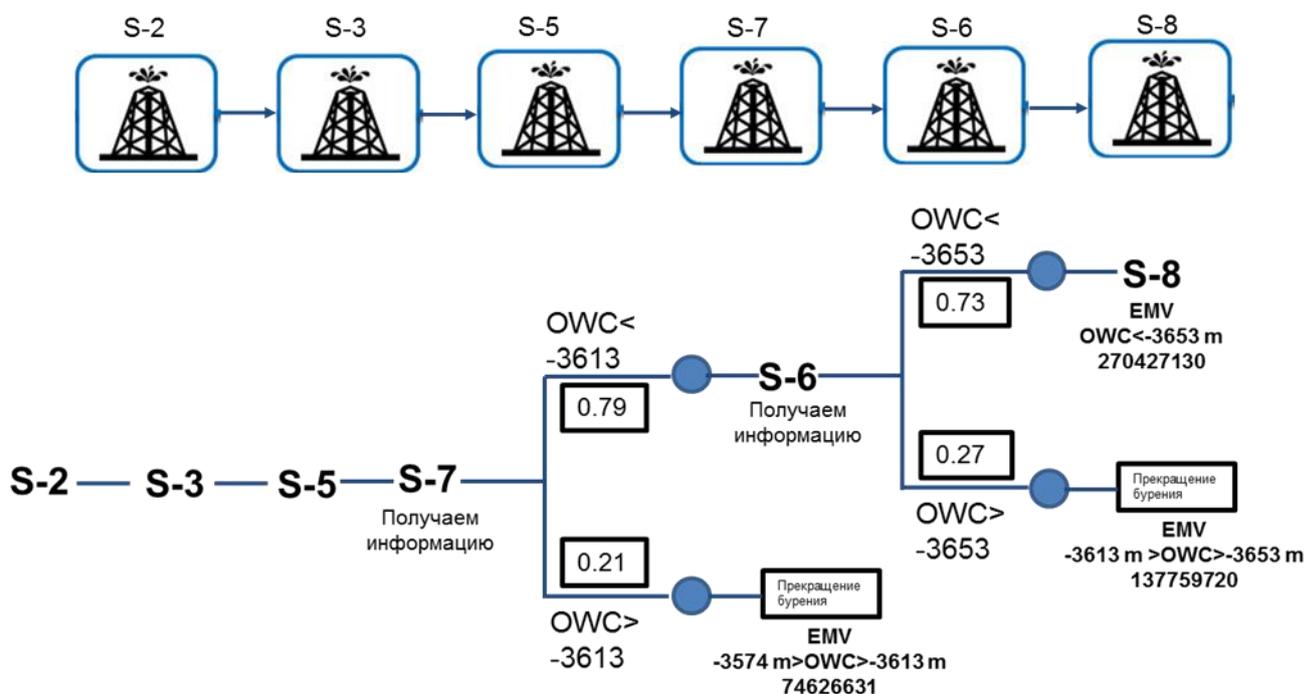


Рисунок 31. Оптимизированная базовая стратегия бурения с учетом ценовой синергии.

Из Рисунок 31 видно, что шаг получения информации о неопределенности ВНК остался прежним, поэтому оптимизация произошла, за счет ценовой синергии. Однако и данная последовательность, может быть оптимизирована, если учесть стоимость

информации, которая может быть получена от изменения очередности скважин S-7, S-6, S-8.

Скважина S-5 не является подверженной геологическому риску – попасть в ВНЗ, оказаться экономически нерентабельной. Поэтому последовательность S-2–S-3–S-5 можно считать оптимальной. Исходя из этого встает вопрос о выборе порядка скважин S-7, S-6, S-8, после последовательности S-2–S-3–S-5.

Перестановка 3 скважин дает $3!=6$ стратегий, которые необходимо рассмотреть, одна из которых уже была рассмотрена.

$S_2 - S_3 - S_5 - S_7 - S_6 - S_8$

$S_2 - S_3 - S_5 - S_8 - S_6 - S_7$

$S_2 - S_3 - S_5 - S_8 - S_7 - S_6$

$S_2 - S_3 - S_5 - S_7 - S_8 - S_6$

$S_2 - S_3 - S_5 - S_6 - S_7 - S_8$

$S_2 - S_3 - S_5 - S_6 - S_8 - S_7$

Оптимальная стратегия будет определяться как стратегия дающая максимальное значение индекса VOI – разности между оптимизированной с учетом стоимости информации и стратегии S-2–S-3–S-5–S-7–S-6–S-8, которая является оптимальной с точки зрения ценовой синергии.

В случае если во при всех рассмотренных стратегиях $VOI \leq 0$, то стратегия S2 – S3 – S5 – S7 – S6 – S8– оптимальная.

Чтобы найти оптимальный порядок бурения скважин были рассмотрены 5 стратегий и сравнены со стратегией S-2-S-3-S-5-S-7-S-6-S-8.

Последовательность	EMV	VOI
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₇ -S ₆ -S ₈	213140259	Была взята за базовую
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₈ -S ₆ -S ₇	210957463.	-2182796
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₈ -S ₇ -S ₆	207174542	-5965717
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₇ -S ₈ -S ₆	211232608	-1907651
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₆ -S ₇ -S ₈	214691412	1551153
S ₂ -S ₃ -S ₅ -S ₆ -S ₈ -S ₇	213178953	38694

Из таблицы, видно, что положительный VOI дают две стратегии из которых оптимальной стратегией является S₂ - S₃ - S₅ - S₆ - S₇ - S₈, имеющая максимальный VOI = 1,5 млн. долларов.

S₂-S₃-S₅-S₆-S₇-S₈, EMV=214691412, VOI=1551153,

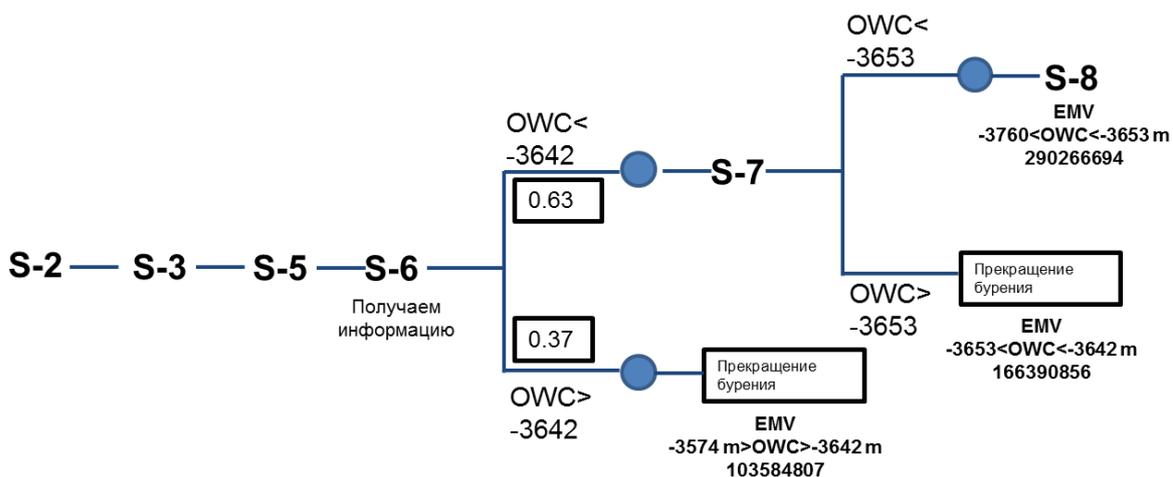


Рисунок 32. Оптимизированная с учетом стоимостм информации, VOI=1,5 млн.долларов.

Таблица 11.Определение рентабельного ВНК.

скважина	Благоприятный уровень ВНК,м
S-2	any
S-3	-3605
S-5	any
S-6	-3691
S-7	-3642
S-8	-3673

В результате оптимизация была рекомендована последовательность бурения $S_2-S_3-S_5-S_6-S_7-S_8$, EMV которой оценивается в 214691412 \$, что на 5.9 млн. долларов больше EMV базовой стратегии разработки. Данный алгоритм бурения был достигнут за счет оптимизации с учетом ценности информации скважины S-6 и синергии очередности бурения и цены бурения скважин S_2, S_3, S_5 .

8.2 Оптимизация с учетом временного ограничения

Предложенная в качестве оптимальной, в предыдущей главе, последовательность бурения будет являться оптимальной в том случае, если поверхностное обустройство имеет гибкую систему достройки. С решением о бурении новой скважины мы принимаем решение о выделении денег на поверхностное обустройство и достраиваем его.

Стоит заметить, что такой подход не всегда возможен и зачастую решение о поверхностном обустройстве должно быть принято к определенному сроку. Изначально на месторождении Саркала планировалось принять решение о финальном обустройстве к концу второго года начала разработки.

Поэтому в данной главе будет смоделирован случай оптимизации стратегии бурения с внешним временным ограничением о принятии решения о поверхностном обустройстве.

Из Таблица 12 видно, что за 2 года максимальное количество скважин, которое можно пробурить – 2. В самом начала проекта выделяются деньги на поверхностное обустройство для 2 скважин, затем после бурения 2 скважин – по истечению 2 лет, принимается решения о разовой достройке поверхностного обустройства.

Таблица 12. Время бурения скважин

Скважина	Период бурения, дни
S-2	210
S-3	334
S-5	273
S-6	304/284
S-7	284/304
S-8	200
Дополнительно: если S-2 не первая, то +87 дней к периоду бурения первой скважины	



Рисунок 33.Схема внешнего ограничения – 2 года на принятие решение о поверхностном обустройстве.

Если рассмотреть стратегии разработки, предлагаемые для гибкой системы обустройства, то в ситуации, когда решение будет принято после 2 лет начала разработки:

1)



2)



3)



Так как во всех 3х стратегиях за 2 года, до принятия решения мы не получим никакой информации, то обустройство будет построено для 4 планируемых скважин. Как мы видим в данной ситуации бурение скважины S-6 и получение информации – неоправданно, так как решение об обустройстве уже принято и информация, которую принесет скважина S-6 не покрывает потерь дохода от переноса бурения более продуктивной скважины S-7.

Из всех скважин S-6, S-7, S-8 могут снять неопределенность по уровню ВНК и изменить решение о поверхностном обустройстве. Так как у нас имеется два года, то скважину, способную снять неопределенность необходимо пробурить 2ой, так как не имеет смысла откладывать/переносить бурение скважины S-2.

Предлагается рассмотреть 3 динамические стратегии разработки, где на втором шаге бурится скважина, которая принесет информацию, а поверхностное обустройство и количество следующих скважин зависит от исхода ее бурения, Приложения 2, 3, 4. Результаты приведены в Таблица 13. Рекомендуемая стратегия бурения выбиралась по максимальному значению индекса VOI, который высчитывается по формуле:

$$VOI = EMV_{with\ information} - EMV_{without\ information} \quad (5)$$

Таблица 13. Стоимость достройки поверхностного обустройства от количества планируемых скважин спустя 2 года после начала разработки

Обустройство	Стоимость млн.долларов
+1	25,91
+2	56,57
+3	72,24
+4	82,91

Таблица 14. Выбор оптимальной стратегии разработки в условии временного ограничения.

	EMV	VOI	Примечание
$S_2 - S_3 - S_5 - S_7 - S_6 - S_8$	185355741		Принятая за Базовую стратегию
$S_2 - S_6 - S_3 - S_5 - S_7 - S_8$	196096605	10740864	Рекомендованная стратегия
$S_2 - S_7 - S_3 - S_5 - S_6 - S_8$	185336244	-19497	
$S_2 - S_8 - S_3 - S_5 - S_7 - S_6$	181974616	-3381125	

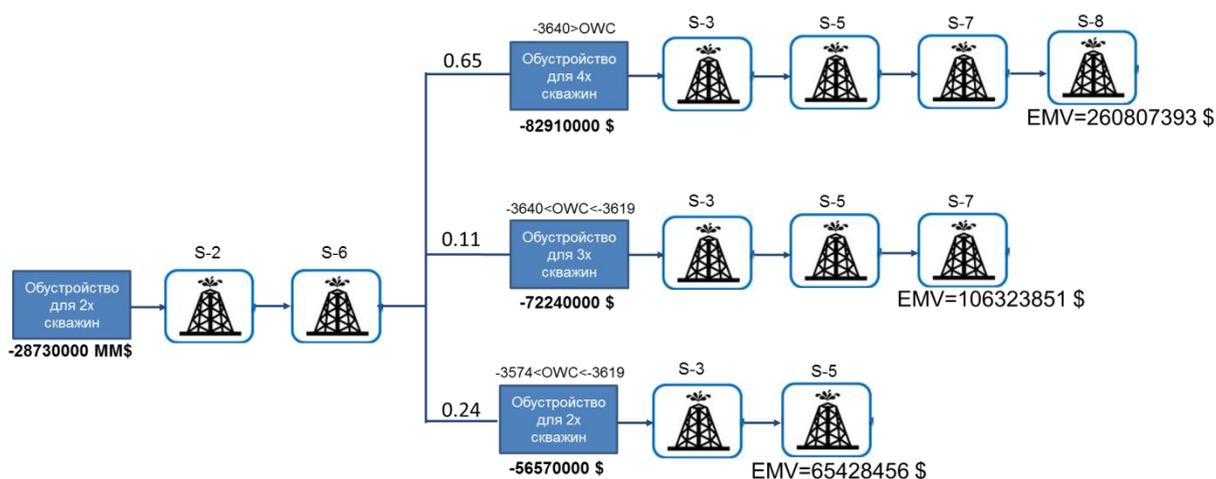


Рисунок 34. Рекомендуемая последовательность бурения в условиях временного ограничения.

8.3 Итоги оптимизации

Предложена базовая последовательность бурения скважин на месторождении Саркала по жадному алгоритму, максимизирующий EMV проекта на каждом шаге принятия решения о бурении следующей скважины. EMV данной стратегии составил 208,77 млн \$.

Данный алгоритм был оптимизирован с учетом синергии затрат на бурение. EMV после оптимизации оценивается в 213,14 млн. \$, ожидаемая выгода 4,37 млн.\$. В свою очередь данная стратегия была оптимизирована с учетом стоимости информации, расчета индекса VOI стратегий. По рекомендуемой стратегии **EMV=214.69 млн.\$, индекс VOI=1.55 млн.\$**. В итоге по сравнению с базовой стратегией бурения выгода составляет **5.92 млн.\$ – увеличение EMV на 2.8 %**.

С введением временного ограничение на принятие решения о поверхностном обустройстве, в качестве базовой стратегии была предложена стратегия, оптимальная стратегия так как показала наибольший EMV из рассмотренных 185,36 млн.\$. Далее данная стратегия была оптимизирована с учетом стоимости информации, VOI составил 10.74. Было показано, что в условия временного ограничения при получение информации в первые 2 года, экономическая выгода составит – 6%.

Заключение

В результате проведенного исследования по поиску подхода к выбору оптимальной последовательности бурения добывающих скважин

- разработана методология выделения основных факторов влияющих на EMV проекта;
- предложен подход к поиску оптимальной стратегии с учетом каждого из влияющих факторов;
- проанализирован фактор временного ограничения на принятие ключевого решения о поверхностном обустройстве.

Разработанная методология выделения основных факторов влияющих на EMV проекта разработки месторождения была апробирована на месторождении Саркала. Для месторождения Саркала основными факторами являются: геологическая неопределённость – уровень ВНК и синергия расходов бурения скважин и очередности бурения.

Предложенный подход по поиску оптимальной стратегии с учетом каждого из влияющих факторов, был применен к оптимизации бурения на месторождении. Задача оптимизации стратегии с учетом синергии расходов бурения скважин и очередности была решена применением метода динамического программирования – полного перебора возможных вариантов бурения. Изменение базовой стратегии бурения, согласно найденной оптимальной последовательности прогнозирует увеличение EMV проекта на 4,37 млн. долларов.

В случае геологической неопределенности – уровень ВНК – была проведена оптимизация бурения с учетом стоимости информации, которую могут принести скважины в случае исходов бурения: ЧНЗ, ЧВЗ, ВНЗ. Данная информация является ключевой при решении о бурении следующих скважин или его остановки, или изменении порядка бурения с целью увеличения EMV проекта. Оптимизация согласно данному подходу составила 1,55 млн. долларов. В совокупности оптимизация базовой стратегии бурения с учетом 2 основных параметров, составила – 5,92 млн. долларов.

Также был проанализирован фактор временного принятия решения о количестве выделяемых средств на поверхностное обустройство месторождения. В данном случае, основным инструментом по оптимизации стратегии стал подход, учитывающий ценность информации, которую могут обеспечить пробуренные скважины. Данный подход показывал высокую эффективность в условиях внешнего ограничения – раннее принятие решения о поверхностном обустройстве и прогнозирует увеличение EMV проекта разработки на 10,74 млн. долларов, что составляет 6 % от базового EMV проекта.