

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЛИАЛ ОБЩЕСТВА С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЛУКОЙЛ-ИНЖИНИРИНГ» «КОГАЛЫМНИПИНЕФТЬ» В ГОРОДЕ ТЮМЕНИ

На правах рукописи



ФАТТАХОВ МАРСЕЛЬ МАСАЛИМОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ
РАЗВЕТВЛЕННЫХ МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН**

Специальность 25.00.15 - Технология бурения и освоения скважин

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Бакиров Данияр Лябипович

Уфа - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Актуальность темы исследований	4
Степень разработанности темы исследования.	6
Цель работы	7
Основные задачи исследования	7
Научная новизна	7
Теоретическая и практическая значимость работы	8
Положения, выносимые на защиту:.....	9
Объем и структура работы	10
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПЫТА СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН.....	11
1.1. Технология бурения многозабойных скважин.....	11
1.2. Опыт ПАО «Газпромнефть»	26
1.3. Опыт ПАО «Роснефть» и ПАО «Газпром».....	30
1.4. Опыт ПАО «Татнефть».....	35
1.5. Планирование РГС в компании «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.».....	42
1.6. Опыт компании ОАО «ТНК-ВР Холдинг» (ПАО «Роснефть»)	43
1.7. Опыт РУП «Производственное объединение «Белоруснефть».....	46
1.8. Опыт ПАО «ЛУКОЙЛ»	50
1.9. Ранжирование профилей РГС по сложности их реализации	54
1.10. Результаты анализа технико-технологических решений, применяемых при строительстве РГС.....	57
Выводы по главе 1.....	59
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН.....	60
2.1. Постановка задачи.....	60
2.2. Методы расчета профилей РГС	61
2.3. Методы оценки напряженного состояния бурильного инструмента.....	65
2.4. Методы контроля траекторий РГС.....	65
2.5. Оценка эффективности бурения всех стволов РГС с использованием компоновки с неизменной «жесткостью»	68
Выводы по главе 2.....	72
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МНОГОЗАБОЙНОЙ СКВАЖИНЫ.....	73
3.1. Постановка задачи.....	73
3.2. Совершенствование профилей РГС на различных фазах проектирования развития активов (месторождений)	73
3.3. Обоснование «критериев» (показателей) технологичности («сложности») профиля РГС ...	77

3.4. Методы оперативной оценки основных параметров профиля разветвленной РГС	80
3.5. Определение основных технологических факторов, существенно влияющих на конфигурацию профиля РГС	94
3.6. Обоснование величины минимального смещения забоя бокового ответвления и минимально необходимой длины ответвления из условия минимизации интерференции с основным стволом РГС.....	103
3.7. Обоснование величины минимального смещения забоя бокового ответвления от основного ствола из условия разведения стволов под прямым углом (по отношению друг к другу).....	108
3.8. Методика выбора координат забоев разветвленных многозабойных скважин на стадии их планирования.....	115
Выводы по главе 3.....	123
ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН С ТРЕМЯ И БОЛЕЕ ЗАБОЯМИ.....	124
4.1. Общие требования к профилям РГС	124
4.2. Теоретические предпосылки выбора схемы строительства многозабойных скважин с тремя и более забоями	125
4.3. Требования к профилям разветвленных РГС	128
Выводы по главе 4.....	132
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫСЛОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН.....	133
5.1. Методика промысловых испытаний разработанных решений.....	133
5.2. Результаты внедрения методики проектирования РГС.....	134
5.3. Результаты внедрения технологии строительства РГС	140
5.4. Результаты оценки продуктивности РГС	156
Выводы по главе 5.....	162
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	166
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	170
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Западная Сибирь остается и будет основной нефтегазоносной провинцией России еще в течение многих десятков лет. При этом для значительного количества месторождений региона становится актуальным применение новых технологий вовлечения в разработку экономически нерентабельных категорий запасов углеводородов. Кроме того, вновь вводимые месторождения удалены от центров концентрации баз поставки оборудования, инструмента, материалов, в связи с чем, возрастают затраты на разбуривание и обустройство месторождений. К примеру, по месторождениям ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь» из общего фонда скважины с проблемами выработки запасов составляют (Рисунки 1, 2):

- 29 % относится к категории контактных запасов (в условиях тонких глинистых перемычек до водонефтяного контакта (ВНК)), преимущественно по группам пластов А, Б;

- 22 % характеризуется низкой плотностью запасов (высокорасчлененные пласты с большим объемом промытых каналов), преимущественно по группам пластов Б;

- 30 % относится к категории низкопродуктивных запасов (низкопроницаемые, в т.ч. высокотемпературные объекты), преимущественно пласты групп Ач, Ю, Т.

В связи с этим задача исследование и внедрение технологий для эффективного вовлечения в разработку трудноизвлекаемых и низкорентабельных запасов углеводородов является актуальной. Многозабойные скважины (МЗС) являются одним из известных инструментов вовлечения в разработку продуктивных пластов, эффективным механизмом повышения охвата залежей дренированием и заводнением. Бурение многозабойных скважин с разветвленно-горизонтальными окончаниями (РГС) позволяет повысить степень охвата пласта дренированием, обеспечить меньшую депрессию в системе «скважина-пласт» при

дебитах, превышающих дебиты скважин с горизонтальным окончанием (ГС). Эффект от применения РГС значительно возрастает при учете профилей и ориентации их боковых ответвлений в процессе проектировании систем разработки месторождений.

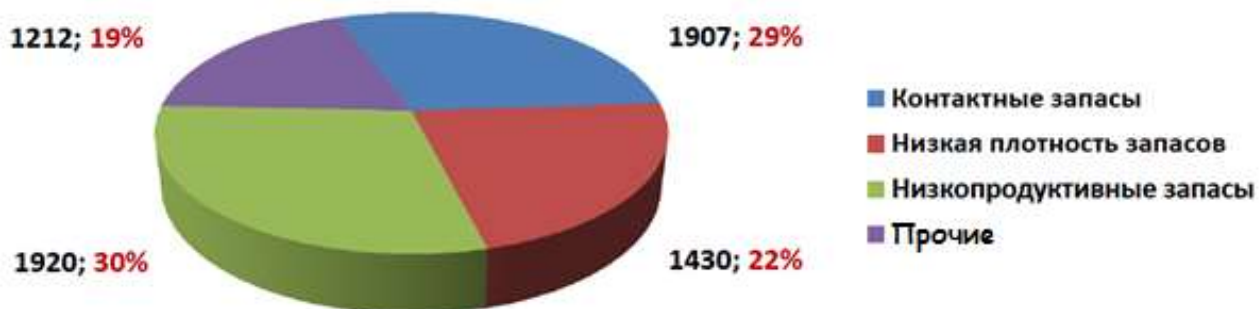


Рисунок 1 – Ранжирование добывающего фонда скважин по проблемам выработки запасов

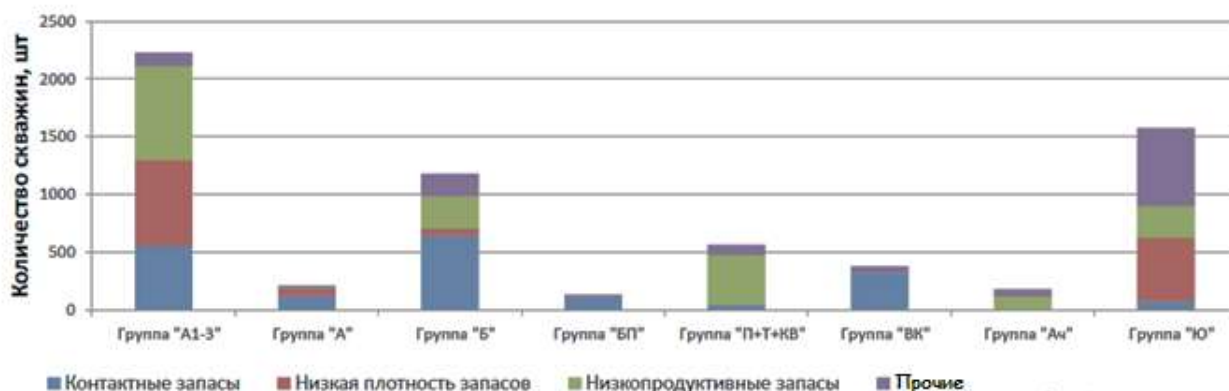


Рисунок 2 – Распределение добывающего фонда скважин по проблемам выработки запасов в разрезе групп пластов

Опыт бурения РГС в Западной Сибири выявил необходимость учета при их проектировании таких факторов, как форма профиля, место и технологии зарезки и бурения ответвлений, а также крепления ствола и последующего освоения. Отсутствие исследований по оценке значимости этих факторов на первоначальном этапе обусловило рост непроизводительного времени строительства РГС на 30-40 и более суток. В частности, отмечены проблемы с зарезкой ответвлений, необходимость многократных спускоподъемных операций

(СПО) с целью подбора эффективной компоновки низа бурильной колонны (КНБК) для одновременного бурения и зарезок ответвлений, и ряд других технологических проблем строительства РГС. Поэтому комплексное совершенствование проектирования профилей и технологии бурения РГС является, несомненно, актуальной задачей, решение которой позволит эффективно внедрять многозабойное бурение и повысить эффективность вскрытия продуктивных пластов на месторождениях Западной Сибири и в других нефтегазоносных провинциях.

Степень разработанности темы исследования.

Решение вопросов совершенствования проектирования, бурения и заканчивания многозабойных и многоствольных скважин, формирования новых методов разработки залежей с использованием ГС и МЗС и оценки их эффективности рассматривалось в работах А.М. Григоряна, А.И. Архипова, Д.Л. Бакирова, К.С. Басниева, С.Н. Бастрикова, М.Г. Гейхмана, С.И. Грачева, В.Г. Григулецкого, М.В. Двойникова, Динг Жу (Ding Zhu), Г.И. Зозули, В.А. Иктисанова, Р.А. Исмакова, Н.Ф. Кагарманова, А.Г. Калинина, Е.В. Колесника, В.В. Кульчицкого, А.С. Ларионова, Л.М. Левинсона, С.В. Левковича, И.С. Матиешкина, Т.М. Муртазиной, Н.А. Низамова, Б.А. Никитина, С.А. Обухова, А.С. Оганова, Г.С. Оганова, В.П. Овчинникова, А.С. Повалихина, С.В. Позднышева, А.А. Рощина, Н.Г. Салери (N.G. Saleri), В.Х. Самигуллина, К.М. Солодкого, С.Х. Сохошко, Б.З. Султанова, О.О. Тагирова, Л.Х. Фокеевой, И.Н. Хакимзянова, А.Д. Хилла (A.D. Hill), Р.С. Хисамова, В.М. Шенбергера, А.В. Щebetова и других исследователей [1–20 и др.]. Ими обоснованы эффективность и перспективность применения МЗС на месторождениях для увеличения показателей разработки, нефтеизвлечения, представлен опыт строительства МЗС и рассмотрены различные конфигурации МЗС с точки зрения повышения эффективности выработки запасов в различных горно-геологических условиях; изложены технологические решения по совершенствованию отдельных этапов строительства МЗС и ряд технических средств; рекомендованы возможные профили ответвлений, в том числе и из условия создания требуемой депрессии и т.д.

Цель работы

Повышение эффективности строительства РГС совершенствованием технологии их бурения (научным обоснованием, проектированием, реализацией).

Основные задачи исследования

1. Провести анализ используемых в современной нефтегазовой практике профилей МЗС различной конфигурации, технологии их бурения, осуществить их ранжирование по сложности технической реализации.

2. Разработать:

- методику определения технически возможной конфигурации РГС: максимального количества ответвлений и минимального расстояния между точками их зарезки, координат её забоев исходя из существующих геолого-технологических ограничений;

- технологию строительства РГС, обеспечивающую технологичность и сокращение процесса зарезки нового ствола в открытом горизонтальном участке (ГУ) и гарантированный спуск хвостовика в основной горизонтальный ствол.

3. Провести апробацию разработанных по итогам исследований методических и технологических решений.

4. Разработать нормативно-техническую документацию для осуществления промышленного внедрения предложенных по результатам исследований решений.

Научная новизна

1. Разработана и научно обоснована методика определения в РГС максимального количества ответвлений и минимально допустимых расстояний между точками их зарезки, допустимых областей заложения забоев ответвлений с учетом существующих геолого-технических ограничений (характеристик КНБК, геолого-геофизических характеристик пласта на участке бурения).

2. Научно обоснована и реализована в промысловых условиях технология строительства РГС с последовательным «сверху-вниз» забуриванием боковых ответвлений вдоль основного горизонтального ствола, повышающая успешность зарезок нового ствола из горизонтального участка на 60 % и обеспечивающая

гарантированный безаварийный спуск хвостовика в основной горизонтальный ствол, за счет применения в интервалах зарезок специальных профилей основного ствола и ответвлений.

3. Теоретически установлено, что в процессе бурения и зарезки стволов РГС с использованием одной КНБК постоянной «жесткости» площадь контакта вооружения долота с горной породой в нарабатываемом уступе увеличивается до двух раз, в случае применения специального профиля с локальным подъемом траектории открытого ствола и зарезки в нем ответвления с падением зенитного угла (ЗУ).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. По сравнению с ГС, кроме геометрического увеличения охвата пласта дренированием за счет бурения ответвлений, до 25 % прироста вскрытых проницаемых нефтенасыщенных интервалов при строительстве РГС обеспечивается за счет осуществления более точного проложения второго и последующих ответвлений по нефтенасыщенным пропласткам, по результатам уточнения геологического разреза в процессе бурения предшествующих ответвлений.

2. По результатам теоретических и опытно-промышленных исследований разработан и внедрен в ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» «Технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» (Приказ о введении в действие № 23 от 04.02.2015 г.).

3. Разработаны 4 групповых проекта на строительство МЗС в различных условиях вскрытия продуктивного пласта, на основании которых успешно пробурены 15 четырех-шести и 106 трехзабойных РГС на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

4. Разработанные в диссертации методические и технологические решения за счет снижения непроизводительных работ позволяют повысить коммерческую скорость строительства РГС на 15%.

5. На основании научных и промышленных исследований изданы монография «Многозабойные скважины: практический опыт Западной Сибири», учебное пособие для ВУЗов «Сооружение боковых отводов при строительстве многозабойных скважин».

Методология и методы исследования

Методика исследований носит экспериментально-теоретический характер и включает анализ теоретических и технологических решений в области строительства ГС и РГС, методов проектирования конструкций таких скважин; использовался комплекс математико-статистических расчетов показателей и критериев оценки сложности технической реализации профилей скважин.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технология бурения РГС, предусматривающая применение специального профиля скважины и очередности бурения ответвлений, повышающая успешность зарезок нового ствола из горизонтального участка на 60% и обеспечивающая гарантированный безаварийный спуск хвостовика в основной горизонтальный ствол.

2. Методика обоснования технически реализуемой на практике конфигурации разветвленной РГС (количество стволов, оптимальные точки зарезки ответвлений и допустимые области заложения их забоев).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается уровнем и корректностью аналитических исследований, воспроизводимостью полученных данных и результатами опытно-промышленного внедрения.

Результаты диссертационной работы и основные положения докладывались на: III научно-практической конференции «Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности», г. Тюмень, 2011 г.; XX юбилейном Конкурсе на лучшую молодежную научно-техническую разработку по проблемам топливно-энергетического комплекса. – Минэнерго РФ, 2013 г.; Российской технической нефтегазовой конференции и выставке SPE по разведке и

добыче, 14-16 октября, 2014 г., Москва, Россия; конференции молодых ученых и специалистов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени, г. Тюмень, 2014 г.; IV, V и VI международных инновационных форумах «НЕФТЕГАЗТЭК» в г. Тюмень, 2013, 2014, 2015 годы; на семинарах заседаний кафедры «Бурения нефтяных и газовых скважин» УГНТУ, заседаниях Президиума научно-технического совета ПАО «ЛУКОЙЛ» 2014 г. (Протокол № 3 от 18.11.2014), ученого совета ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» 2015 г. (Протоколы заседаний № 10_13 от 18.11.2013, № 04_15 от 20.04.2015), семинарах и совещаниях с научными и производственным подразделениями ПАО «ЛУКОЙЛ» 2014 г., 2016 г. (Протокол № ВМ-01сл «Опыт строительства многозабойных и многоствольных скважин в ПАО «ЛУКОЙЛ» от 24.01.2014, Протокол № 13–01П «Выбор объектов, проектирование и строительство многозабойных и многоствольных скважин» от 27.02.2014, Протокол № 17/2–07–129 «Рассмотрение результатов строительства многоствольных и многозабойных скважин в 2013 году и планирование строительства многоствольных и многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» в 2014 году» от 08.04.2014, Протокол № 13–02П по результатам проведения «Тематического семинара по вопросам строительства многоствольных, многозабойных скважин и технологий их заканчивания ...» от 07–08 июня 2016 г.); на заседаниях кафедр «Бурение нефтяных и газовых скважин» УГНТУ и ТИУ.

Публикации

Основные научные положения и результаты диссертационной работы освещены в 23 научных трудах, из них 11 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 12 публикаций в изданиях, индексируемых в базе данных РИНЦ, одна монография.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и основных выводов; изложена на 186 страницах машинописного текста и содержит 79 рисунков, 21 таблицу, 49 формул и список литературы из 93 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПЫТА СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН

1.1. Технология бурения многозабойных скважин

В 1947 г. на Краснокамском месторождении (Башкортостан) отработан метод резки ответвлений из наклонно-направленно участка (приближенного к вертикали) - из основного вертикального ствола длиной 240 м пробурены в продуктивном пласте два дополнительных ответвления (30 и 35 м). Впервые многозабойное бурение реализовано А.М. Григоряном в 1951 г. на Карташёвском месторождении (Башкортостан), а в 1953 г. построена скважина № 66/45 уже с десятью наклонными, пологими и горизонтальными ответвлениями от основного ствола небольшой протяженности (Рисунок 1.1). При вертикальной глубине 600 м общая длина ствола скважины составила 1993 м, из которых 1760 м пройдено непосредственно в продуктивном пласте [1, 15]. Профиль многозабойной скважины с десятью ответвлениями был в 1954 г. был представлен в Риме в ходе IV Международного Нефтяного Конгресса и опубликован в американском журнале «Дриллинг» (1955, декабрь, стр.187). Скважину № 66/45 можно считать первой полноценной МЗС в мире ввиду того, что забои скважины смещены друг от друга на 100 м и более. Благодаря этому минимизируется взаимная интерференция стволов, а технология реализует свой потенциал, обеспечивая кратный прирост дебита.

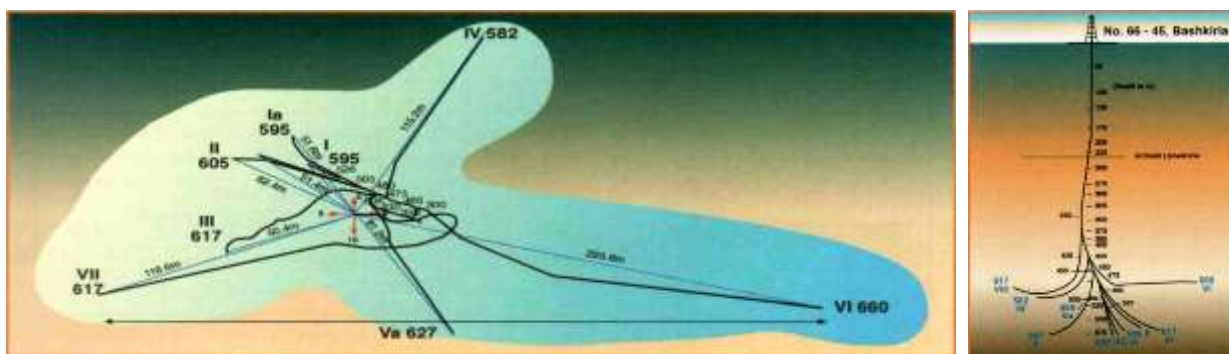


Рисунок 1.1 - Горизонтальная проекция и профиль скважины № 66/45 Карташёвского месторождения

Особенностью предложенного М.Г. Григорьяном принципиальной схемы многозабойного вскрытия пластов является [1] бурение разветвленных скважин, при этом извлечение нефти осуществляется из одного, наиболее близкого к вертикали основного ствола, а по ответвлениям, выполняющим в пласте функции дренажных каналов, нефть поступает в основной ствол из отдаленных участков нефтеносного пласта, вскрытых бурением высокопродуктивных пропластков или локальных ловушек, не приобщаемых к разработке при бурении стандартных ГС. При этом автор предполагал, что стволы могут резаться на различном удалении от подошвы продуктивного пласта или расстоянии друг от друга и с различными радиусами искривления, иметь вертикальную, наклонно-направленную, пологую или горизонтальную траектории в интервале вскрытого пласта. Автором, исходя из достигнутого в отрасли уровня технико-технологических решений и точности измерительных приборов, отмечалось, что технология может быть реализована в пластах с глубиной залегания до 800 м и мощностью более 5 м, а при глубине залегания пласта до 2000 м – ее мощность должна быть не менее 10 м. Автор также отмечает, что целесообразно пересекать такие продуктивные пласты под небольшим углом к направлению напластования (субгоризонтальными стволами), а также перспективность увеличения продуктивности горизонтальных стволов и продления срока их службы (в условиях низких пластовых давлений) при окончании стволов с подъемом вверх (горизонтально-восходящим окончанием).

Автор выделил особенность выполнения новых операций при бурении МЗС, таких как необходимость повторного, быстрого и безошибочного попадания в требуемое разветвление, исходя из принятой автором технологии бурения таких скважин. Кроме того, автором были определены следующие операции, специфичные для предложенной технологической схемы: во-первых, быстрое (до одного часа) забуривание ответвления из открытого ствола без установки опорного цементного моста; во-вторых, попадание бурильного инструмента, обсадных колонн и геофизических приборов в требуемое ответвление без использования специального инструмента и приспособлений для ориентирования.

Для этого автором были разработаны специальные формы разветвленных скважин, технология и очередность забуривания разветвлений и измерений в них.

С этой целью были установлены следующие требования к технологии:

- целесообразно обсаживание верхней части разреза (до кровли продуктивного пласта) перед началом вскрытия пласта с многозабойным окончанием, при наличии технической и экономической целесообразности;

- все ответвления должны были забуриваться в пределах продуктивного пласта – исходя из этого, первоочередными объектами бурения были массивные рифовые залежи, не имеющие водонасыщенных пропластков, а в дальнейшем, после разработки и внедрения КНБК с коротким нижним плечом и реализации бурения ответвлений с малым радиусом кривизны – пласты с нефтенасыщенной толщиной от 10 м и более (при глубине залегания пласта до 2000 м);

- выбор места зарезки ответвлений – в интервалах устойчивых пород, за счет чего в дальнейшем обеспечивается возможность повторного доступа в пробуренные ответвления (из условия, чтобы нижние и верхние края интервала зарезки отстояли не менее чем на 1-2 м от кровли и подошвы прослоя устойчивых пород). При зарезке нового ствола применяются отклоняющие компоновки с максимально возможным искривлением для обеспечения значительного бокового усилия на долоте и формирования «окна» правильной формы и минимальной длины (направление забуривания не менее 8-10 м);

- для зарезки разветвлений углы наклона основного ствола должны быть более 8° и не превышать $55-60^\circ$, при этом наиболее технологически удобными являются $15-25$ градусов. Вследствие принятых технологических приемов по повторному доступу в стволы предложенная автором технология не могла быть эффективно реализуема в вертикальном стволе и при больших зенитных углах (ЗУ).

Проектирование и расчет МЗС выполнялся по следующей схеме:

- а) подбор конфигурации скважины: определение профиля скважины и количества ответвлений исходя из геолого-эксплуатационных условий (оценка выполнялась исходя из результатов бурения предшествующих скважин, в соответствии с расчетами К.А. Царевича (рисунок 1.2) прирост дебитов

происходит преимущественно при доведении числа стволов до 4-6, при большем количестве заметный прирост дебитов отсутствовал);

б) подбор КНБК для зарезки и дальнейшего бурения ответвлений: исходя из технико-технологических возможностей определение диаметра дополнительных стволов (при необходимости для забуривания могли использовать долота меньшего диаметра), расчет допустимых величин «плеч» отклоняющей компоновки и соответствующим им интенсивностей искривления профилей;

в) подбор бурильных и обсадных труб (для каждого рейса): осуществляется по номограмме изгиба из условия прохождения колонн в соответствующий ствол;

г) определение заканчивания скважины: подбор параметров траекторий дополнительных стволов (углы наклона, протяженность, глубину по вертикали и т.д.) и диаметра последней обсадной колонны для обсаживания основного ствола (глубина спуска, необходимость крепления и т.д.).

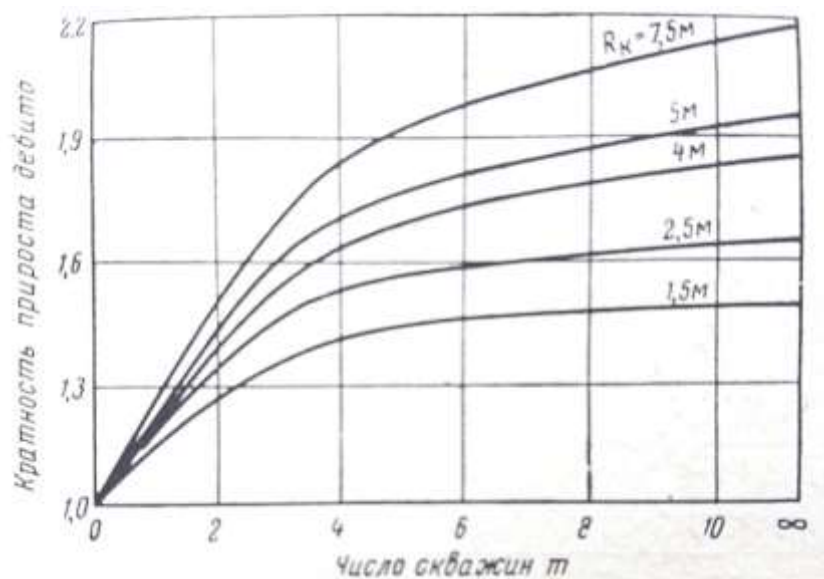


Рисунок 1.2 – Зависимость прироста дебита от числа скважин, расположенных на окружности с заданным радиусом [1]

Автором были предложены и реализованы следующие новшества:

- в 1944 году совместно с Я.А. Гельфгатом и М.Т. Гусманом предложено создать щель в продуктивном пласте постепенным срезанием «нижней» стенки наклонной скважины посредством забуривания уступа и последующего его расширения до забоя (рисунок 1.3). Затем в 1946 г. автором совместно с

В.А. Брагиным предложен более простой метод, предусматривающий забуривание наклонных ответвлений, отстоящих на небольшие (1-2 м) расстояния друг от друга с последующим торпедированием перемычек между ними (Рисунок 1.4) – метод испытан в 1947 г. на одной скважине в тресте Краснокамскнефть, в 1948-1949 годах в том же тресте на промысле Полазна реализован еще в двух скважинах, но уже без взрывов, а только бурением нескольких коротких стволов, расстояние между которыми не превышало 5-6 метров. Данный метод зарезки ствола наработкой желоба в открытом стволе в дальнейшем был использован А.М. Григоряном при реализации многозабойного бурения;

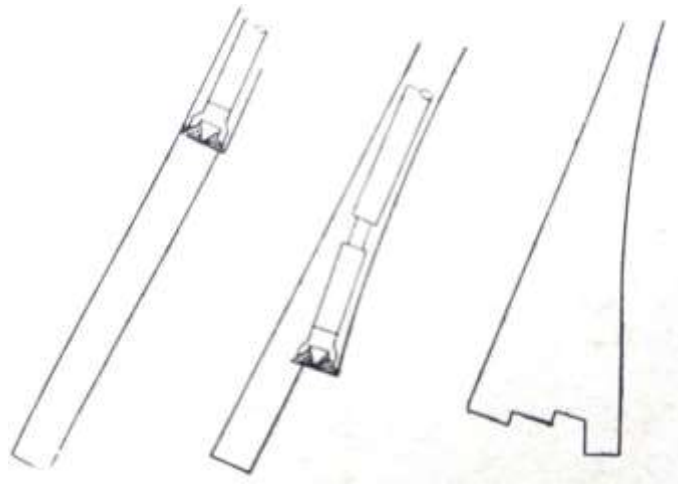


Рисунок 1.3 – Создание щели в продуктивном пласте срезанием «нижней» стенки [1]

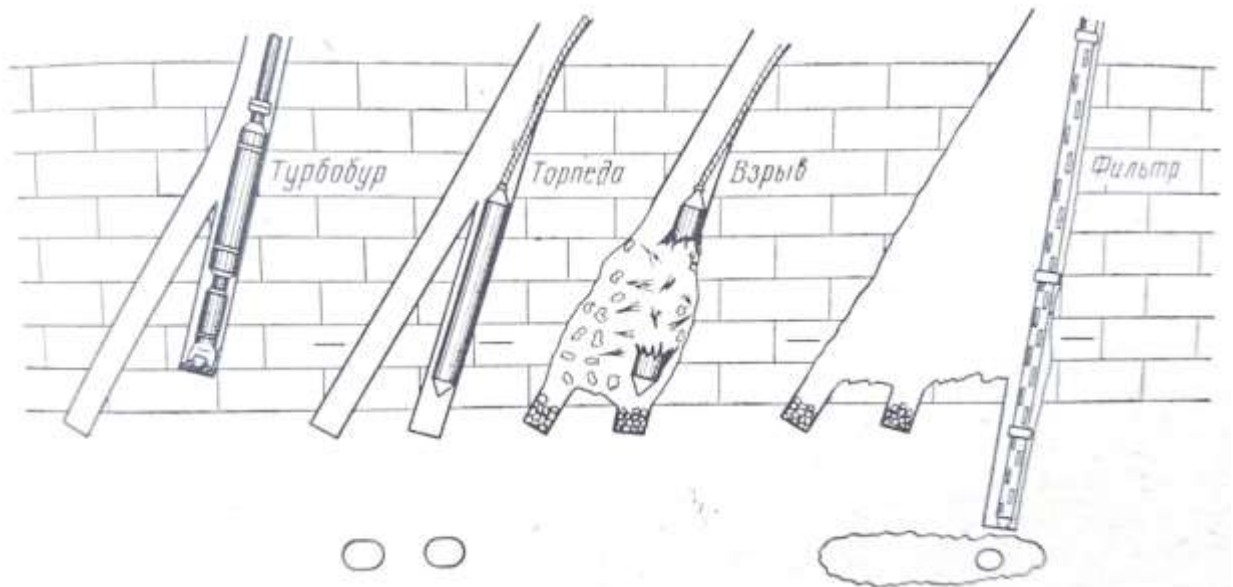


Рисунок 1.4 – Расширение призабойной зоны забуриванием нового ствола с последующим торпедированием перемычки [1]

- предложена технология резки разветвлений, когда наклон отклоняющей компоновки направлен в сторону, противоположную наклону основного ствола. Для обеспечения успешного забуривания нового ствола, исходя из опыта, автором указывается необходимость наработки желоба под вооружением долота размером не менее половины диаметра долота скважины;

- обнаружено и впервые использовано для целей резки ответвлений явление «самориентирования» отклонителя, суть которого заключается в том, что инструмент освобождается от напряжений скручивания именно тогда, когда направление изгиба компоновки совпадает с направлением наклона ствола скважины, а в остальных положениях проворачивать компоновку становится труднее, так как в ней увеличивается изгиб. Исходя из этого на практике искривленный инструмент вводился в ответвление, путем принудительного поворота компоновки в сторону ответвления, на 2-3 м выше его начала, и пропускался вниз с фиксацией в этом направлении. Дальнейшее свободное продвижение инструмента вниз свидетельствует о входе его в ответвление и о самоориентировании компоновки уже в кривизне нового ответвления. Однако, как отмечает сам автор, надежное самоориентирование в МЗС обеспечивается при углах наклона скважине не менее 10-15 градусов в достаточно устойчивых разрезах, где нет каверн, уступов и желобов;

- очередность бурения «снизу-вверх»: бурится основной ствол с зенитным углом в диапазоне от 8° до 55-60°, проводится комплекс геофизических исследований (ГИС), затем приступают к забуриванию первого (самого нижнего) разветвления с забуриванием в сторону, противоположную относительно наклона основного ствола (а именно с падением ЗУ, за счет чего появляется возможность повторного доступа в ответвление геофизических приборов на кабеле), после добуривания ответвления и проведения в нем ГИС производится резка следующего ответвления в точке основного ствола, расположенного выше точки забуривания предшествующего ствола;

- отличительная особенность предложенной А.М. Григорьяном технологии бурения МЗС заключается в использовании при резке новых стволов

отклоняющих КНБК, имеющих малый радиус кривизны, в то время как основной горизонтальный ствол имел небольшую интенсивность набора кривизны и бурился другой компоновкой. При необходимости бурения новых стволов в интервале продуктивного пласта (ниже интервала зарезки) с меньшей интенсивностью также требовалась смена бурильной компоновки.

Эффективность применения МЗС автор объясняет тем, что в таких скважинах в разработку вовлекаются большее количество продуктивных пропластков как по вертикали, так и по простиранию пласта, за счет чего получены дебиты, кратно большие, чем в базовых наклонно-направленных скважинах (ННС). В работе М.Г. Григоряна [1] отмечается, что одновременно с разветвлением в стволах скважины применимы и иногда используются те или иные из перечисленных мер увеличения проницаемости близлежащих пород – кислотная обработка, гидроразрыв, перфорация и др.

Приведем также некоторые значимые этапы становления технологии строительства скважин, предшествовавшие началу промышленного разбуривания месторождений Западной Сибири с применением ГС и МЗС.

К 1930 г. уровень техники и технологии строительства скважин был уже на достаточно хорошем уровне, что позволяло бурить условно вертикальные скважины глубиной до 3 км (к концу 1950-х годов глубины доходили до 5 км). 1936 г. – первый в мире опыт применения турбобура для искривления скважины, СССР. 1941 г. – первая в мире наклонная скважина, пробуренная турбобуром (Баку, СССР), в 1951 г. – с использованием электробура (СССР). Апробированная в Урало-Поволжье А.М. Григоряном в 1947–1953 годах технология строительства МЗС могла применяться в массивных залежах, в условиях же месторождений Западной Сибири, имеющих в основном пласты незначительной мощности, в связи с отсутствием в тот период требуемого геонавигационного оборудования, а также по причине высоких дебитов в ННС, не сложных, с точки зрения бурения, строительство МЗС не нашло массового внедрения.

1976–1978 гг. – первые семь ГС в республике Татарстан пробурены Альметьевским УБР на кизеловский горизонт турнейского яруса Сиреневского и

Тавельского месторождений. Первую ГС № 1947 (длина 306 м) пробурил А.М. Григорян на Сиреневской площади НГДУ «Альметьевскнефть». Две ГС (№№ 1918, 1947) на Западно-Сиреневском участке в 2003 г. эксплуатировались со средним дебитом по нефти 5,7 и 6,1 т/сут (за весь период эксплуатации) при обводненности продукции соответственно 21,2 % и 14,5 % (к началу 2003 г. накопленная добыча составила 47,7 и 51,4 тыс. т), третья была переведена в нагнетательный фонд [16].

1982 г. - первые пологие скважины в Западной Сибири пробурены на Северо-Покурском и Аганском месторождениях (пласты вскрыты с ЗУ 30–48°), что позволило увеличить протяженность ствола в продуктивном пласте до 50% [17, 18]. 1990 г. – при бурении на пласт АВ₁¹⁺² Ермаковского месторождения пологой скважины № 817 на глубине 2098 м был достигнут ЗУ 77° [19]. В этом же году пробурена ГС № 25738 на пласт АВ₁¹⁺² Самотлорского месторождения, причем горизонтальный ствол проводили по волнообразной траектории (максимальный ЗУ в ГУ 101°), обеспечивающей двойное пересечение всех нефтеносных пропластков [20].

В рамках реализации комплексной отраслевой Программы «Горизонт» (утвержденной МНП СССР) в 1991–1994 годах было пробурено свыше 130 ГС с малым, средним (40–150м) и большим (более 300м) радиусами искривления ствола. В том числе: в ПАО «Татнефть» - 70 ГС, в ПАО «Башнефть» - 33 ГС, в ПАО «Саратовнефтегаз» - 24 ГС. На экспериментальной скважине 1–ЭС Лемезы (рифовое месторождение БАССР) впервые в мировой практике была достигнута рекордная длина горизонтального ствола 850м при вертикальной глубине 450м. Отмечены первые значимые достижения зарубежных компаний: «Elf Aquitaine» (ГС Lacq 90, Lacq 91, в 1978г., Роспе-Маре, Италия), «Unocal Netherland Sohio» (UNS), «British Petroleum» (BP).

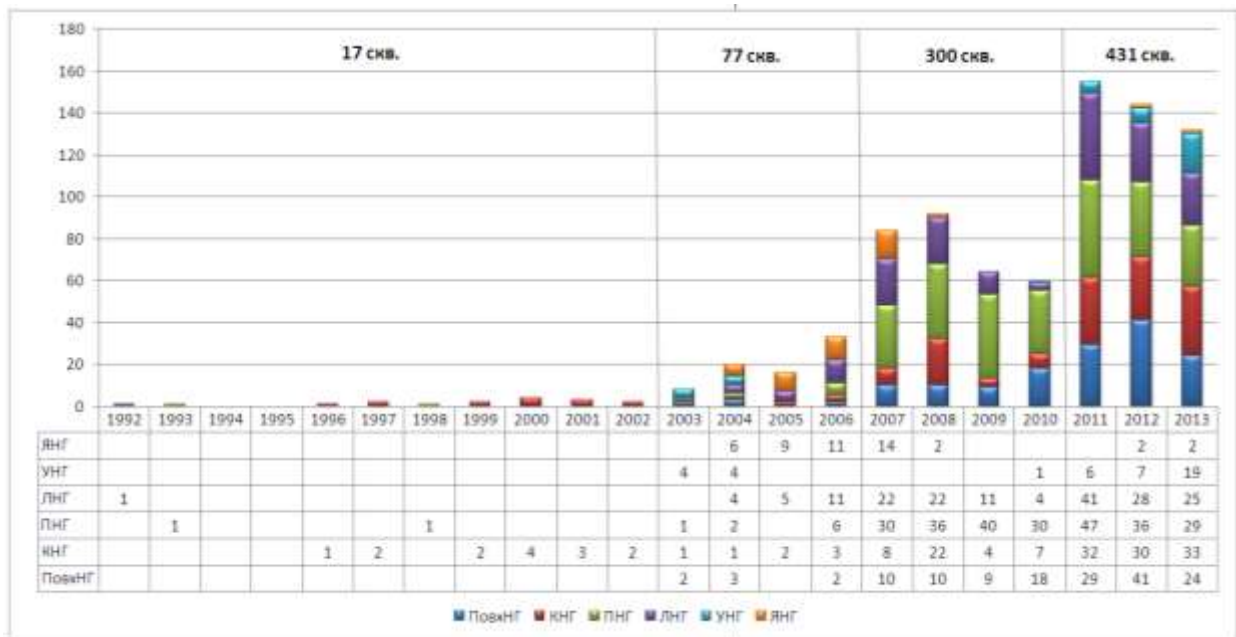
Распространение технология горизонтального бурения в Западной Сибири получила в 1990–х годах и на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». Если в 1992–1993 гг. длина ГУ первых ГС не превышала 250 м, то к 1997–2002 гг. их протяженность увеличилась до 500 м. При этом были

апробированы различные варианты конструкций ГС, в том числе ГУ с открытым забоем без обсаживания обсадной колонной или фильтром (например, на Толумском месторождении), конструкции с обсаживанием транспортного и горизонтального участков обсадной колонной одного либо комбинированного диаметра, спускаемой за один рейс (например, 9 ГС на Тевлинско-Русскинском, 5 ГС на Южно-Тарасовском месторождениях). По итогам испытаний различных вариантов, наиболее технологичной была признана конструкция со спуском эксплуатационной колонны диаметром 168 мм в кровлю продуктивного пласта и ее креплением, с последующим вскрытием продуктивного пласта горизонтальным стволом и его обсаживанием 102 мм хвостовиком. Использование данной конструкции позволило избежать несовместимых условий бурения (неустойчивости пород при больших зенитных углах), особенно в условиях низкого и аномально низкого пластового давления [87].

В 2003–2006 гг. - технология строительства ГС с указанной конструкцией внедряется во всех территориальных предприятиях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», а с 2007 года используется в промышленных масштабах – по 60–90 скважин в год (Рисунок 1.5). Одновременно с этим начинается испытание перспективных для региона технологий заканчивания: первичного вскрытия скважин и боковых стволов с горизонтальным окончанием в режиме депрессии, многозабойного бурения, набухающих пакеров в компоновке хвостовика заканчивания, буровых растворов, облегченных микросферами и на углеводородной основе, и других решений. К концу 2014 г. пробурено более 40 ГС с применением депрессионного оборудования, более 60 скважин облегченными буровыми растворами плотностью 920–1040 кг/м³ введены в эксплуатацию 71 РГС [88].

Таким образом, технология горизонтального бурения в Урало-Поволжье в рамках опытно-промышленных работ применяется с конца 1970–х годов, в Западной Сибири с 1990–х годов. Опытно-промышленное бурение РГС на новом технологическом уровне с современными системами ориентированного бурения начинается как в Урало-Поволжье, так и в Западной Сибири в 2000–х годах.

Широкому применению технологии многозабойного бурения способствовали технико-технологические достижения в горизонтальном бурении и зарезках боковых стволов в 1990–х –2000–х годах. К тому же в условиях ухудшающейся сырьевой базы у большинства недропользователей возникла потребность в освоении трудноизвлекаемых запасов и разработке залежей со сложными геологическими условиями.



Сокращенные наименования территориально-производственных предприятий (ТПП):
 ПовхНГ – «Повхнефтегаз», КНГ – «Когалымнефтегаз», ПНГ – «Покачевнефтегаз»,
 ЛНГ – «Лангепаснефтегаз», УНГ – «Урайнефтегаз», ЯНГ – «Ямалнефтегаз»

Рисунок 1.5 – Динамика ввода ГС в разрезе предприятий в составе ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» (без учета РГС)

Полученный опыт внедрения МЗС способствовал дальнейшему развитию решаемых задач для обеспечения строительства отдельной категории скважин – многоствольных, в которых сочленение основного ствола и ответвления обсажено специальными техническими средствами, позволяющими обеспечить гарантированный доступ в оба ствола при длительной эксплуатации скважины. Хронология развития технологий строительства многоствольных скважин (МСС) следующая: компанией Shell первая МСС по уровню 3 сложности была пробурена в 1993 г. в провинции Альберта (Канада), по уровню 4 – там же в 1994 г. Первая МСС по уровню 5 сложности построена в 1995 г. компания British Petroleum в

акватории Мексиканского залива (США). С учетом накопленного опыта в 1997 г. была сформирована группа специалистов, которая в дальнейшем предложила общеизвестную классификацию TAML.

Строительство РГС в настоящее время реализуется с использованием традиционно применяемого в бурении оборудования и инструмента [21, 27, 79], за счет чего технология многозабойного бурения апробирована на территории деятельности некоторых российских нефтегазодобывающих предприятий [22-25, 27 и др.]. При этом основная часть МЗС реализуется по 1 и 2 уровням сложности согласно классификации TAML.

Технологию бурения МЗС рассматривают как эффективный метод заканчивания скважин для разработки залежей со следующими особенностями [21, 25-31, 89 и др.].

1. В процессе разработки залежей с «вязкими» нефтями применение РГС позволяет повысить эффективность закачки пара посредством обеспечения более равномерного охвата залежи нагнетанием/дренированием. К примеру, для добычи тяжелой нефти на месторождении Зуата в Венесуэле в конце 1990-х гг. были пробурены РГС (Рисунок 1.6) с максимально возможным количеством и разной конфигурацией ответвлений (необсаженные), что обеспечило примерно двукратный прирост дебитов [26]. На территории России подобные месторождения разрабатываются в Татарстане, Коми и ряде других регионов.

2. На длительно разрабатываемых залежах, характеризующихся недокомпенсацией отборов и низким пластовым давлением, а также разбуриванием краевых участков в подстилающей пластовой водой, в отличие от ГС, возможно рентабельное эксплуатирование РГС с минимальным перепадом давления в системе «скважина-пласт», в том числе за счет минимизации рисков подтягивания конуса обводнения. Положительный опыт внедрения РГС в таких условиях получен на ряде месторождений в Западной Сибири [27-29, 89 и др.].

3. На эксплуатационных объектах с пониженными проницаемостью или естественной трещиноватостью бурение РГС позволяет добиться больших дебитов, поскольку ответвления, проложенные по простиранию пласта на

удалении друг от друга, могут пересекать большее число трещин или относительно более проницаемые участки. Имеется положительный опыт реализации подобного подхода в условиях терригенных коллекторов, характеризующихся анизотропией ФЕС по простиранию пласта [29, 79, 89].

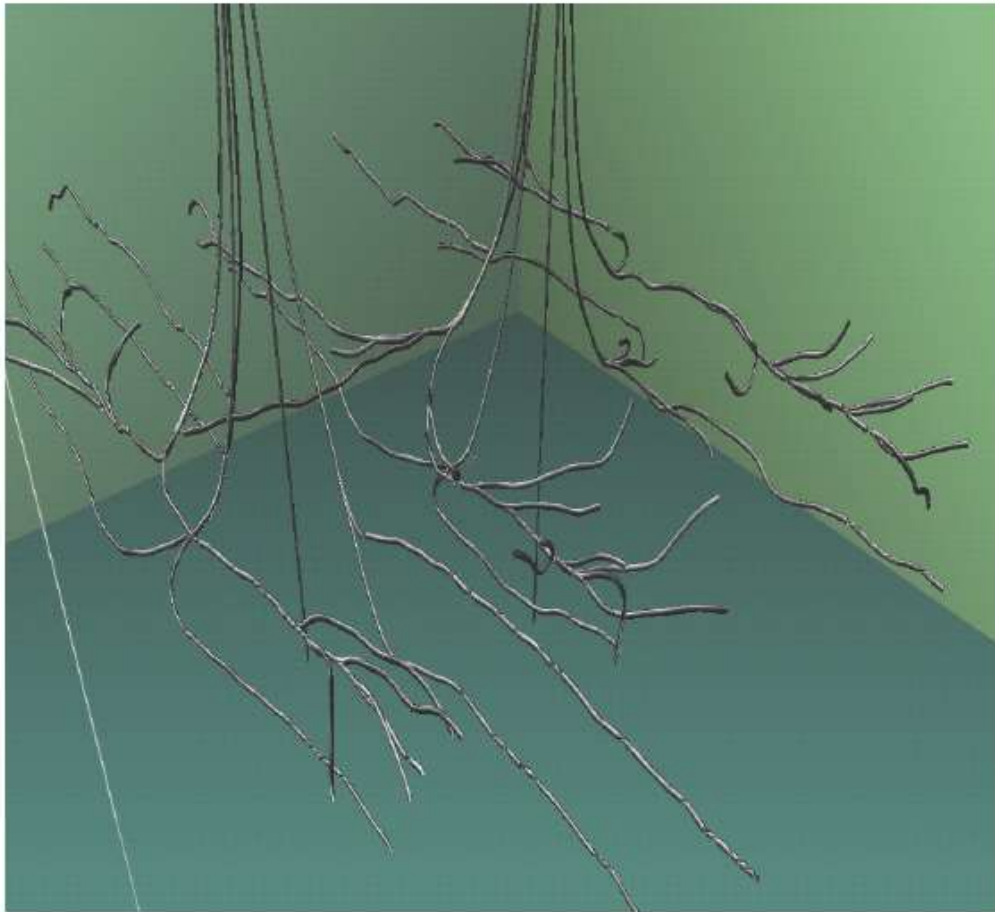


Рисунок 1.6 – Траектории МЗС, пробуренных на месторождении Зуата (Венесуэла) из двух кустовых площадок [25]

4. В условиях тонкослоистых и неоднородных по строению пластов существуют ограничения по эффективному их дренированию обычными ГС по причине высоких рисков выхода из проектного «коридора бурения» (обусловленной точностью измерений геонавигационных приборов в процессе проводки стволов) и незначительной долей вскрываемого горизонтальным стволом проницаемых интервалов. При этом низкая плотность запасов не позволяет рентабельно эксплуатировать эти пропластки самостоятельной сеткой скважин. Использование РГС позволяет каждым стволом вскрывать многократно

тонкие пропластки (мощностью 2 м и менее, в которых сложно обеспечить поддержание траектории в границах целевого пласта), что в совокупности увеличивает общую поверхность дренирования целевого коллектора и позволяет эффективно вовлекать в разработку подобные залежи.

5. В невовлечённых разработкой локальных участках залежей (невыработанные участки или пропластки) бурение МЗС взамен ГС может обеспечивать более полную выработку запасов и обеспечить прирост извлекаемых запасов на одну скважину, в том числе посредством многозабойного бурения при строительстве боковых стволов на недействующем, простаивающем фонде скважин. На месторождениях Западной Сибири строительство многозабойных боковых стволов [29, 30] реализовано как с использованием мобильных буровых, так и колтюбинговых установок.

6. На объектах, где технология заканчивания ГС с МГРП неэффективна по причине отсутствия (малой мощности) литологических перемычек и близкого залегания с целевым пластом водонасыщенных интервалов или пропластков с водонефтяными (газонефтяными) контактными зонами, бурение РГС является «щадящей» технологией вовлечения запасов жидких углеводородов в эксплуатацию. Многозабойное заканчивание позволяет контролировать в процессе бурения осуществлять проводку стволов на удалении от водонасыщенных интервалов и обеспечивать управляемость процесса приобщения удаленных нефтенасыщенных зон/участков коллектора с минимизацией риска обводнения скважинной продукции из водонапорных горизонтов [29]. В таких случаях ответвления РГС являются в определенной мере аналогами трещин многозонного гидроразрыва в ГС. Кроме этого, при «интенсификации» добычи в скважинах посредством многозабойного бурения (совершенствования степени дренирования пласта) возможно оптимизировать затраты на ввод автономных месторождений, кустов в эксплуатацию за счет исключения затрат на мобилизацию флота, завоз материалов для гидроразрыва пород.

7. В природно-охраняемой местности или морских проектах, в рамках которых количество устьев для бурения скважин ограничено, использование одной МЗС может быть альтернативой бурению несколько скважин. К примеру, для треугольной сетки разработки с размерностью 600 м, одна РГС с тремя забоями может заменить две ГС или большее количество ННС [85], благодаря чему общее количество устьев уменьшается (Рисунок 1.7) и снижаются затраты на обустройство месторождения. При этом протяженность основного горизонтального ствола РГС составляла около 800 м, а боковых ответвлений – около 600 м. Замена одной РГС двух ГС экономически более рентабельный вариант, по сравнению со строительством на один эксплуатационный объект двухствольной МСС с 3-5 уровнем сложности согласно классификации TAML, в связи с тем, что использование механических стыков для строительства МСС обусловлено высокой аварийностью и необходимостью выполнения многочисленных СПО при формировании механического стыка двух стволов [90]. Для учета добычи/закачки жидкости по каждому из проектных точек в сетке разработки ответвления МЗС изолируют друг от друга заколонными пакерами по затрубному пространству хвостовика, размещаемого в основном ГУ. Исходя из опыта внедрения учет добываемой продукции по каждому ответвлению РГС обеспечивается, при этом отсутствует возможность доступа непосредственно в ответвления [85].

8. В условиях высоких рисков неподтверждения геологического строения, например при изменчивости абсолютных отметок границ коллектора и контактных поверхностей насыщающих пласт флюидов, бурение РГС позволяет обеспечить большую долю вскрытого коллектора на каждый 100 м проходки, чем в соседних ГС. При этом есть предпосылки к тому, что возможно достичь большей точности расположения стволов в интервале коллектора при постоянной актуализации геолого-гидродинамической модели по участку бурения после завершения проводки каждого ствола РГС.

9. Технология бурения РГС может рассматриваться как одно из потенциальных решений для залежей, в которых требуется более полный охват

участка нагнетаемым агентом (водой, газом и другими) и обеспечение равномерного воздействия на содержащиеся в залежи запасы углеводородов.

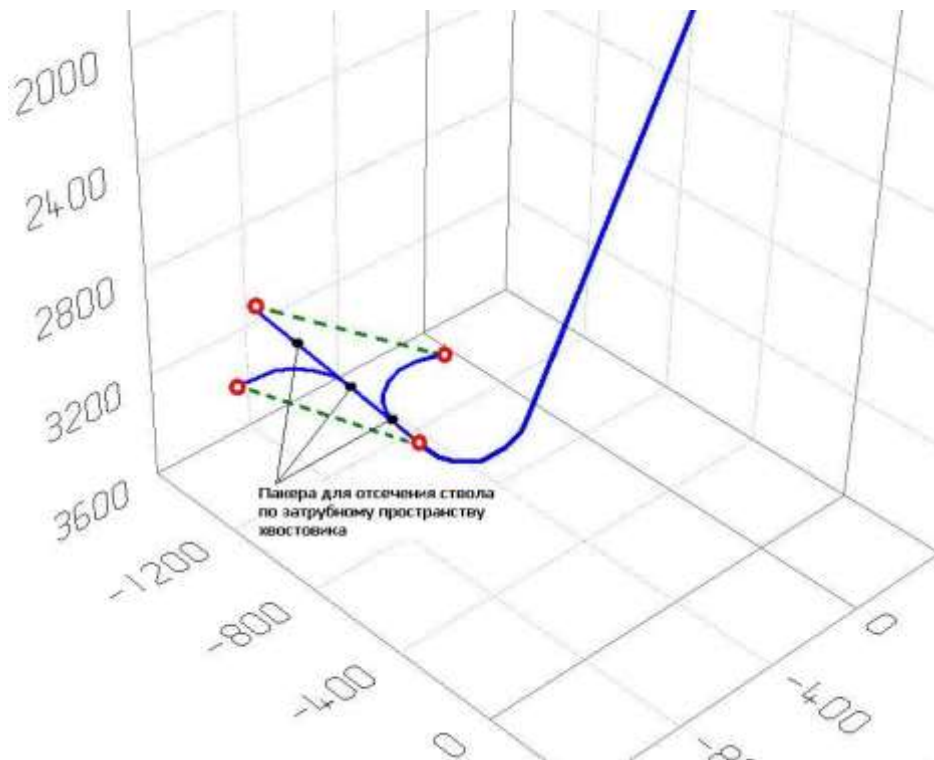


Рисунок 1.7– Пример замены одной РГС двух ГС или четырех ННС

10. Оконтуривание стратиграфических ловушек для углеводородов посредством бурения стволов РГС позволяет определять одной или несколькими скважинами внешние контуры новых залежей. Технология реализуема в тех случаях, когда разломы делят месторождение на блоки (присутствуют тектонические нарушения коллектора - разломы, сбросы, взбросы), при этом многозабойное бурение позволяет уточнить границы блоков при бурении, к примеру, первого ствола (ответвления РГС), за счет чего обеспечивается минимизация осложнений и успешная проводка по коллектору последующих стволов или последующих скважин.

11. При низкой плотности запасов, эксплуатация которых самостоятельной сеткой скважин нерентабельна, строительство РГС позволяет вводить такие объекты в эксплуатацию и, тем самым, поддерживать стабильные уровни добычи на длительно эксплуатируемых месторождениях. Эффективность такого решения

обеспечивается тем, что кратно позволяет повысить дебиты РГС (к примеру, для терригенных коллекторов с проницаемостью 10–150 мД в 1,5–2,7 раза) при относительно небольшом росте затрат на их строительство [29, 31]. Данный подход, к примеру, также является одним из вариантов системы разработки при рассмотрении проектов на приобретение нефтяными компаниями новых активов в труднодоступных регионах с автономными месторождениями.

Обобщая представленный обзор областей применения МЗС, следует отметить, что многозабойное бурение является эффективным решением по вовлечению в разработку залежей и месторождений со сложными геологическими условиями и в новых районах нефтедобычи. Для подобных объектов включение МЗС в элементы системы разработки залежей является одним из потенциально возможных вариантов.

Далее представлен обзор опыта бурения РГС в российской практике и странах ближнего зарубежья, для удобства информация указана в разрезе нефтегазодобывающих предприятий.

1.2. Опыт ПАО «Газпромнефть»

ООО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» в течении 2006–2008 гг. на Чатылкинском месторождении (ЯНАО) пробурило 7 ГС, из которых пять скважин двухзабойные: №№ 1Г, 2Г, 3Г, 4Г, 5Г (Рисунок 1.8) [32, 33].

Скважины вскрывали пласт Ю₁^a с мощной нефтенасыщенной толщиной (13,5–8,4 м). Строительство РГС реализовано для обеспечения равномерности выработки участков расчлененного пласта с глинистыми перемычками. Технология предусматривает проводку основного (наиболее длинного) обсаживаемого хвостовиком горизонтального ствола по наиболее мощному пропластку, горизонтального ответвления – в трудно вырабатываемые области пласта без обсаживания ствола колонной (Рисунок 1.9).

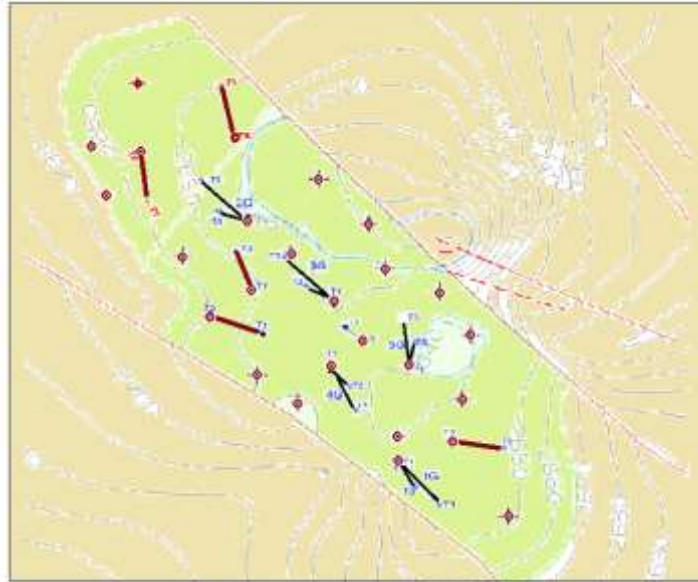
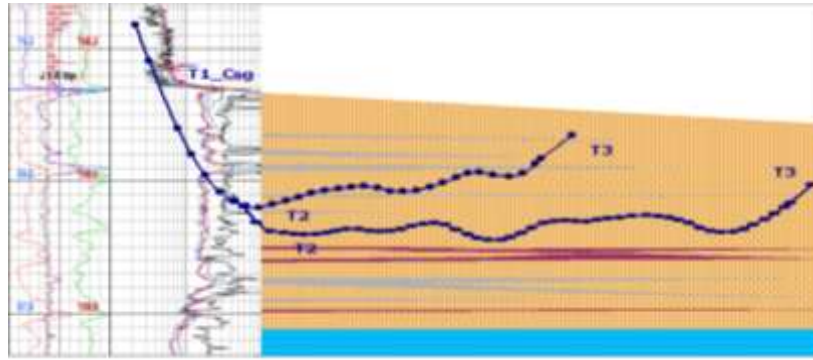
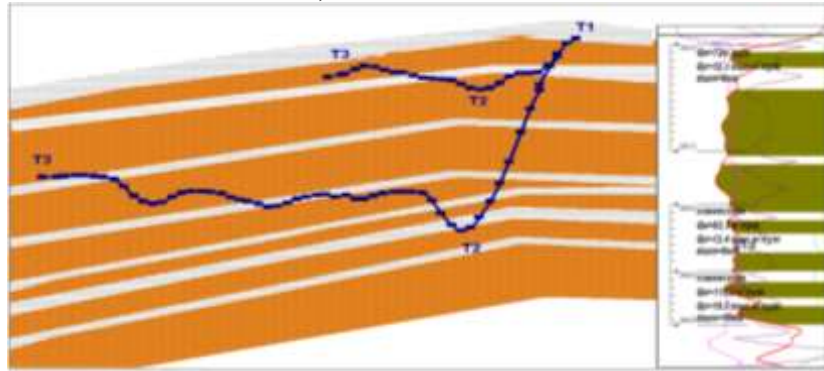


Рисунок 1.8 – Сетка разбуривания Чатылгинского месторождения с РГС

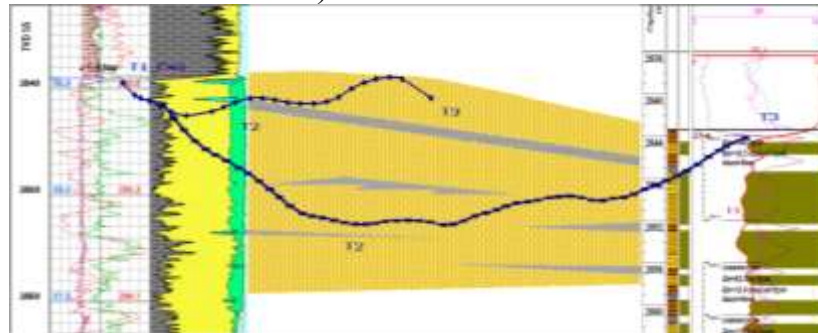
Технология бурения скважины следующая: после проведения комплекса ГИС пилотный ствол ликвидируется, в транспортный ствол осуществляется спуск эксплуатационной колонны (с перекрытием кровли целевого пласта) и ее цементирование. Бурение первого горизонтального ствола выполняется в подкупольной части объекта, после подъема инструмента выполняется срезка вниз и бурение основного горизонтального ствола, его обсаживание перфотрубками диаметром 114 мм. Ответвление в МЗС имеет среднюю длину 350 м (333,5–384,3 м), основной ГУ – 700 м (650–767,5 м), азимут бурения по обоим стволам совпадает (друг над другом). Бурение осуществляло ООО«Сервисная буровая компания». Нумерация стволов идет сверху-вниз, основным считается обсаживаемый перфотрубками наиболее длинный ствол. Продуктивность скважин составляла при вводе в эксплуатацию (период с июля 2006 г. по февраль 2007 г.) по нефти 262,8–523,4 т/сут (по жидкости 277,4–556,4 т/сут) и обводненности 0,1–5,9%, к 01.08.2008 г. – соответственно по нефти 205,5–454,5 т/сут и обводненности 0,2–0,6 %.



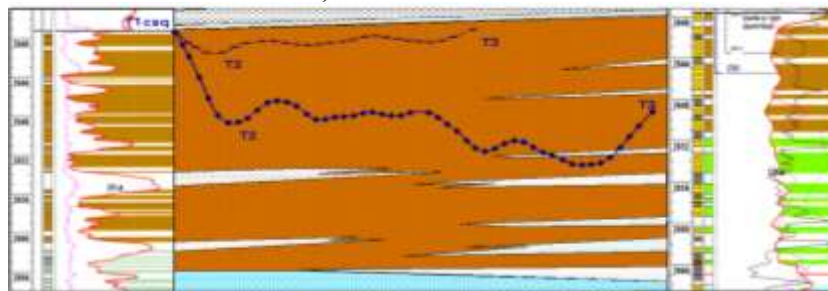
а) скважина 1Г



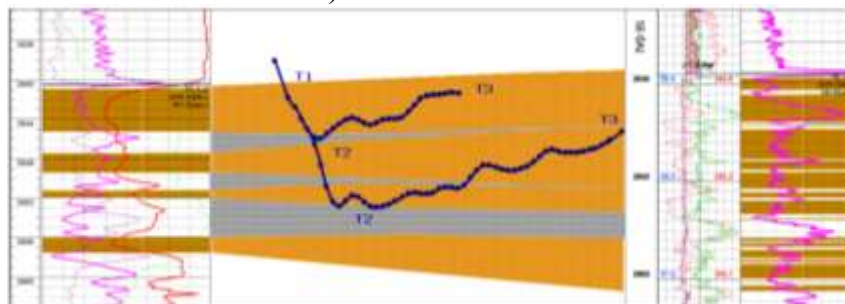
б) скважина 2Г



в) скважина 3Г



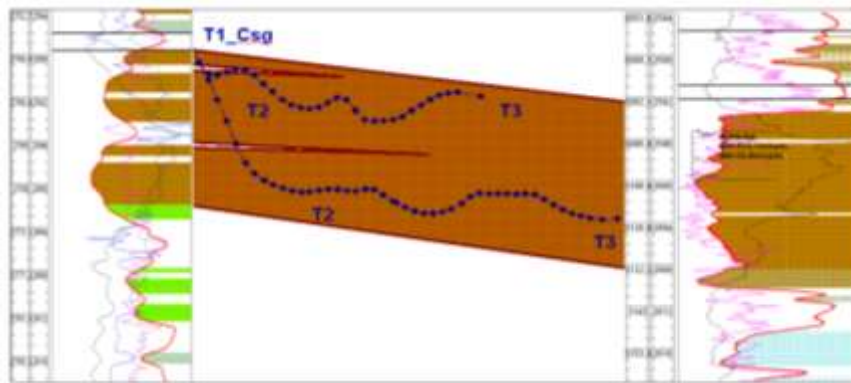
г) скважина 4Г



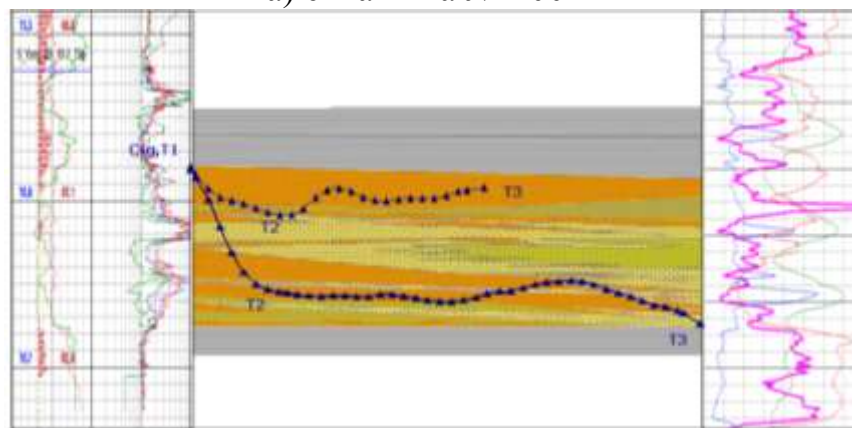
д) скважина 5Г

Рисунок 1.9 – Схематичные профили РГС Чатылкинского месторождения

Также в числе первых в ООО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз» пробурены схожие РГС на пласты БС10–11 Северо-Янгтинского месторождения: скважины №№ 1002Г, 2000Г (Рисунок 1.10). Технология бурения РГС идентична применяемой на Чатылкинском месторождении, со следующими отличительными особенностями: стволы были разведены по азимуту на 45° , при этом протяженность ответвления составляла 300 м и 470–550 м по основному ГУ. РГС были введены в эксплуатацию (№ 1002Г – декабрь 2006 г., № 2000Г – декабрь 2007 г.) со следующими показателями: дебит по нефти соответственно 866,2 и 413 т/сут (дебит по жидкости 884,5 и 424,7 т/сут). Кроме этого, была успешно пробурена одна ГС (№ 1001Г) с длиной ГУ 526 м (дебит при вводе в эксплуатацию в июле 2006 г. составил по жидкости 565,7 т/сут, нефти - 533, т/сут).



а) скважина № 1002Г



б) скважина № 2000Г

Рисунок 1.10 – Профили РГС на Северо-Янгтинском месторождении

Промысловые замеры и расчеты по данным гидродинамических исследований (ГДИ) скважин свидетельствуют, что дебиты ответвлений

преимущественно пропорциональны их длинам и толщинам пласта на участке их бурения. Из восьми рассматриваемых двухзабойных скважин в шести активно работали оба ствола в течение 2–3 лет (к моменту публикации – май 2009 г.).

Авторы статьи считают, что описанный вид РГС рассчитан для объектов разработки (эффективной мощностью более 8–10 м) с двумя пропластками, различающихся по ФЕС и разделенных между собой плотной перемычкой. Описание осложнений, полученных при строительстве РГС на Чатылкинском и Северо-Янгтинском месторождениях, в статье не указывается. Из геологических ограничений применимости данной технологии следует отметить наличие подошвенной воды между верхним и нижним пластами, в связи с чем, данный способ бурения РГС имеет ограничения по применимости.

По данным авторов [24] в ПАО «Газпромнефть» за 2012–2014 гг. было пробурено 52 РГС, преимущественно двухзабойные скважины без механического сочленения стволов, причем в одном из двух стволов крепление ствола обсадными трубами не проводилось. В 2013 г. компанией на Умсейском месторождении была пробурена четырехзабойная ГС, в 2014 г. - двухзабойные скважины с обсаживанием обоих стволов хвостовиком (уровень TAML2). Работы выполнены с привлечением отечественных сервисного и бурового подрядчиков.

Специалистами ПАО «Газпромнефть» также отмечается [24], что опыт бурения РГС с четырьмя и большим количеством забоев имеет технико-технологические риски, обусловленные недостатком оборудования, компетенцией кадров и т.д., в связи с чем, бурение подобных скважин требует дальнейшего совершенствования.

1.3. Опыт ПАО «Роснефть» и ПАО «Газпром»

Первая в ПАО «Удмуртнефть» (ПАО «Роснефть») РГС была пробурена в 2009 г. на Красногорском месторождении, а в 2010 г. было построено еще четыре РГС [34]. При бурении первой РГС получено удорожание на 20%, в основном связанное с наработкой опыта и временными потерями. При дальнейшей реконструкции последующих двух РГС Красногорского месторождения

временные потери снижены и дополнительные затраты составили 10 %. При этом дебит скважины вырос в два раза. Цель строительства РГС заключалась в увеличении эффективной длины ГУ и степени охвата дренированием как по простиранию пласта, так и по пропласткам с разными фильтрационно-емкостными свойствами (Рисунок 1.11) и была достигнута - рост дебитов составлял до 3–6 раз (Рисунок 1.12).

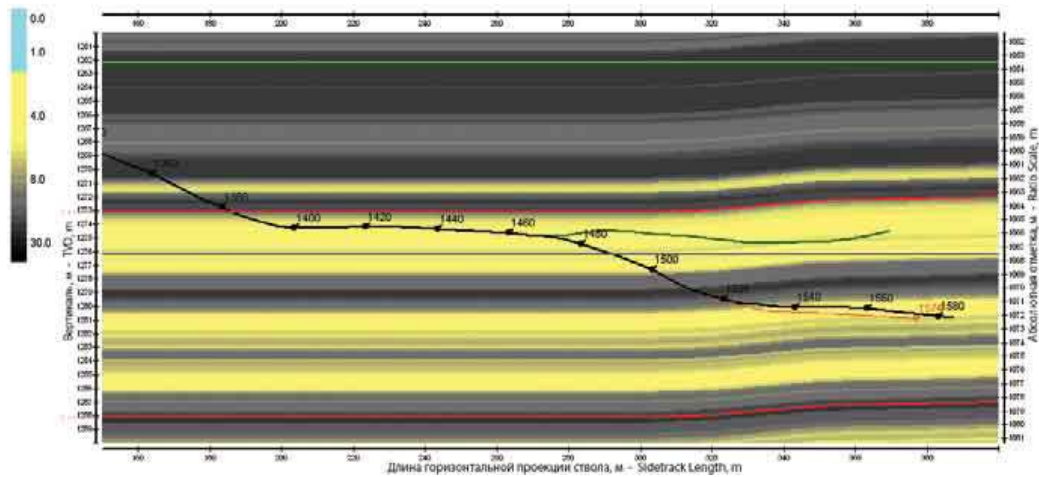


Рисунок 1.11 – Траектория РГС на Красногорском месторождении, пробуренной по продуктивным пластам В-2 и В-3а

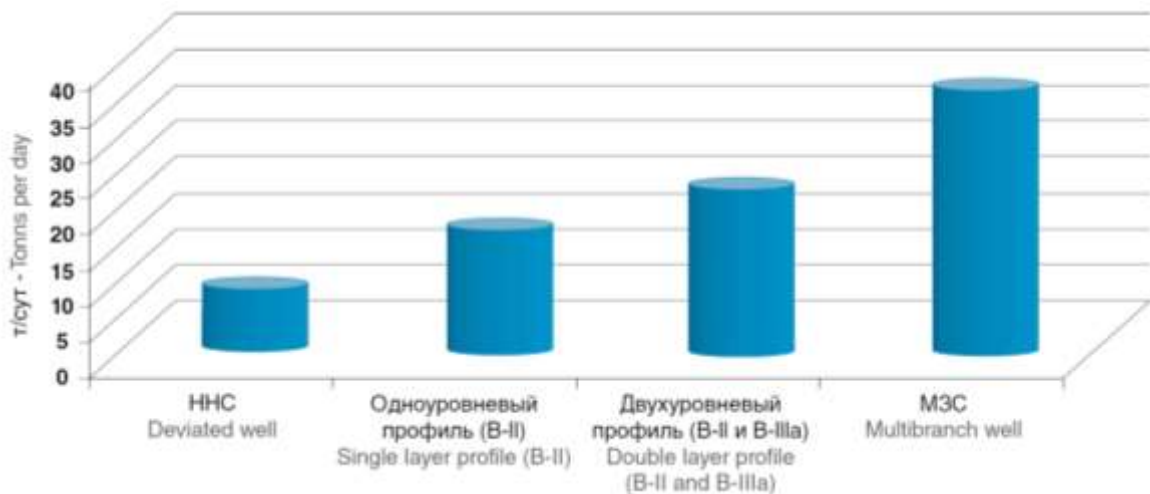


Рисунок 1.12 – Средний запускной дебит по категориям скважин [34]

Также строительство РГС реализовано на Среднемакарихинском месторождении ООО «РН-Северная нефть». По первым пробуренным в 2010 и 2011 гг. РГС получен средний дебит в 1,8 раз превышающий дебит скважин традиционной конструкции [35].

В 2012 г. ЗАО «Ванкорнефть» и ПАО АНК «Башнефть» успешно реализовали проекты по строительству МЗС соответственно на Ванкорском и Лемезинском месторождениях (Рисунок 1.13) [36].

К концу 2014 г. на Лемезинском нефтяном месторождении были пробурены четыре РГС №№ 63Г, 64Г, 52Г и 65 Г (Рисунок 1.14). Основной и боковой стволы имели разную ориентацию по азимуту, вертикальным отметкам и эксплуатируют разные этажи нефтеносности рифового массива артинско-сакмарского возраста. Фактическая суммарная длина ГУ составила в РГС № 63Г – 441 м, № 64Г – 511 м, № 52Г – 391 м, № 65Г – 566 м.

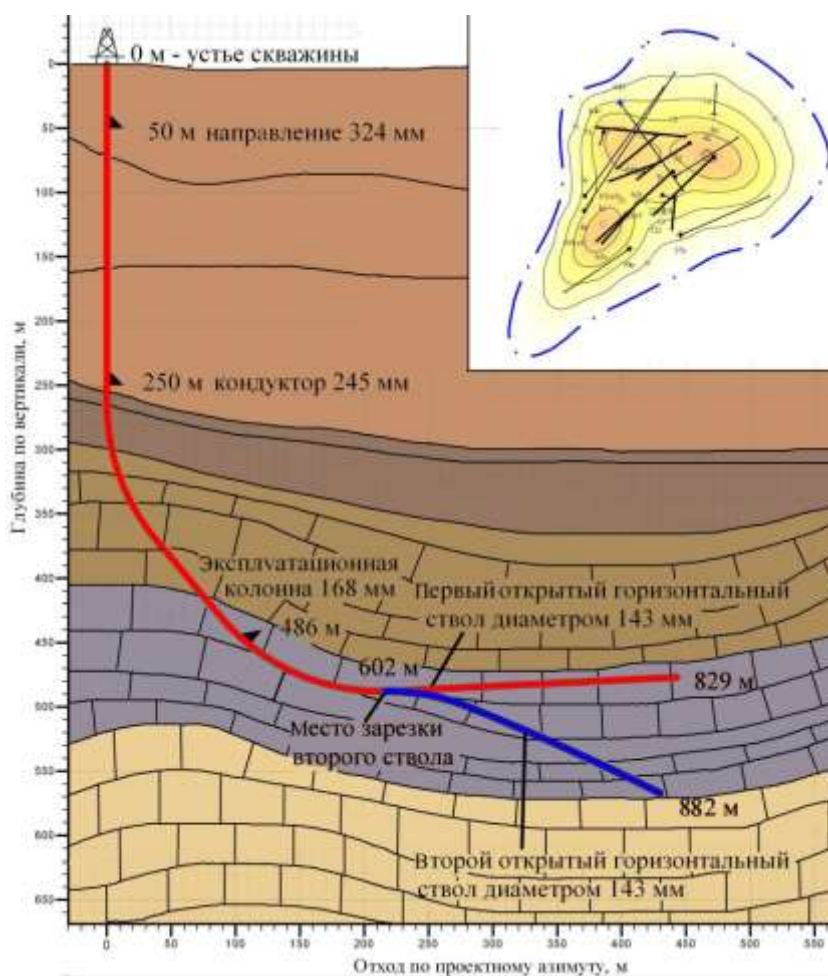


Рисунок 1.13 – Пример профиля двухзабойной скважины ПАО «Башнефть»



Рисунок 1.14 – Фрагмент карты Лемезинского месторождения [36]

Несмотря на меньшую длину ГУ в отдельных РГС, в сравнении с ранее пробуренными соседними ГС, коэффициенты продуктивности и дебиты РГС оказались выше, чем в ГС и ННС (Рисунок 1.15). Данный эффект получен за счет более полного охвата дренированием рифового массива по вертикали (этаж нефтеносности достигает 120 м) [36]. Информация по технологиям бурения РГС в ПАО «Удмуртнефть» и ПАО «Башнефть» в открытых источниках отсутствует.

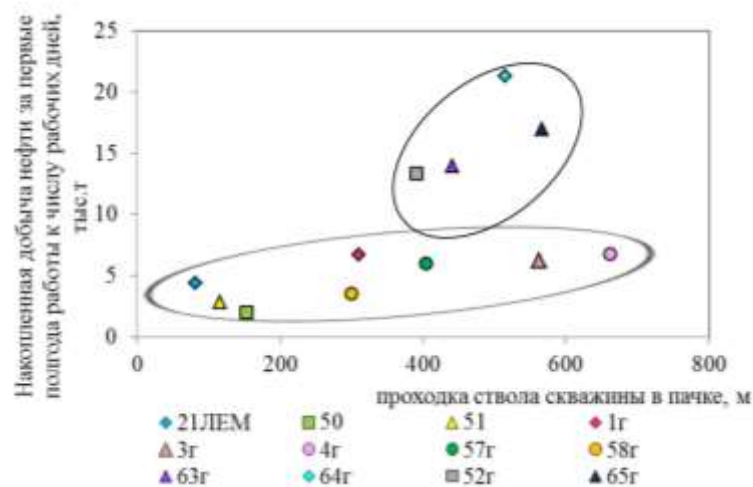


Рисунок 1.15 – Зависимость накопленной добычи нефти за первые полгода работы скважин, отнесенной к рабочему времени, от длины ствола, вскрывшего пачку [36]

Ванкорское месторождение введено в эксплуатацию с 2009 г., основной фонд добывающих ГС имеет протяженность ГУ 300–1000 м. На основной объект разработки (пласт Нх-1), приуроченный к меловым отложениям, с нефтенасыщенной толщиной в пределах 1–2 м, пробурена МЗС с 9 ответвлениями от основного ствола. Диаметр основной ГУ составляет 152,4 мм, в восьми ответвлениях – 123,8 мм и в одном – 152,4 мм. Продуктивность таких скважин в 1,5–2 раза превышает показатели по соседним ГС [37].

Применение долот разного диаметра при бурении РГС требует дополнительных СПО, что с точки зрения технологии работ несовершенное решение, в то же время применение долот разного диаметра можно объяснить задачей исключения попадания хвостовика в ответвления РГС при его спуске. В целом такое решение является ограничивающим фактором, требующим проведения дополнительных СПО и значительных временных затрат при большой глубине скважин. В Таблице 1.1 представлена обобщенная информация по началу внедрения технологии бурения РГС в ПАО «Роснефть».

Таблица 1.1– Первые РГС в ПАО «Роснефть» [24]

Нефте-добывающая компания	Начало бурения РГС, год	Среднесуточный дебит, т/сут		Количество РГС, скв.	
		по базовым скважинам	РГС	на начало 2012 г.	план на 2012 г.
ПАО «Удмуртнефть»	2009	3,0–3,5	10–20	10	11
ООО «РН-Северная нефть»	2010	50–150	170–200	2	1
ЗАО «Ванкорнефть»	2012	240–350	350–600	0	4
ПАО АНК «Башнефть»	2012	8–10	30–40	0	4

Одним из проектов, где планировались РГС, является Приразломное нефтяное месторождение на российском Арктическом континентальном шельфе (19 добывающих ГС, в том числе 2 - двузабойные, 16 - нагнетательных и 1 специальная скважина для закачки отходов бурения в поглощающие пласты

триасового комплекса) [38]. Необходимость большой площади охвата бурением из одной морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП), расположенной в центральной части залежи, подразумевает значительное смещение ствола от вертикали и сохранение в пределах продуктивного пласта большой протяженности эксплуатационного ствола. В октябре 2013 г. на месторождении было завершено бурение первой скважины, в апреле 2014 г. была отгружена первая партия нефти [39]. Информация из открытых источников по технологиям строительства и конструкциям РГС на данном месторождении отсутствует.

Также имеется ограниченный опыт бурения РГС на газовых залежах [40–47], не получивший широкого применения вследствие необходимости применения сложных технических средств для формирования стыков не ниже уровня TAML3.

1.4. Опыт ПАО «Татнефть»

После организации в 1998 г. под задачи компании сервисной службы по сопровождению горизонтального бурения, в ПАО «Татнефть» были пробурены РГС с двумя, тремя и четырьмя горизонтальными забоями, к 2009 г. построено уже более 70 МЗС, в основном с горизонтальными разветвленными стволами [48].

При строительстве РГС с целью перекрытия неустойчивых пород осуществляется двухэтапный цикл строительства ГС с предварительным спуском 168 мм эксплуатационной колонны под кровельную часть продуктивного пласта и последующим вскрытием коллекторов долотами малого диаметра с применением легких полимерных, полисахаридных или глинистых растворов. Разветвленные стволы бурятся долотами различных диаметров (120,6 и 144 мм) и различной протяженности, что обеспечивает спуск в них оборудования при геофизических и ремонтных работах. Как и в случае Ванкорского месторождения, при бурении РГС использование долот разного диаметра требует дополнительных временных затрат на СПО. Распределение дебитов в разрезе объектов эксплуатации по

первым 10 эксплуатируемым в ПАО «Татнефть» РГС представлено в Таблице 1.2 [16].

Таблица 1.2 – Распределение технологических показателей РГС по НГДУ и по продуктивным горизонтам (по состоянию на конец 2003 г.)

НГДУ	Кол-во, скв.	Горизонт, ярус	Дебит жидкости, т/сут	Дебит нефти, т/сут	Обводненность, %
Альметьевскнефть	2	турнейский	10,8	8,7	16,2
Елховнефть	1	турнейский	8,1	8,1	0,0
Иркеннефть	1	бобриковский	6,7	2,5	64,5
Азнакаевскнефть	6	бобриковский	29,8	24,8	20,0

В конце 1990-х годов три РГС были пробурены на отложения турнейского яруса, с проводкой двух горизонтальных стволов скважин в одном азимуте с разницей по абсолютным отметкам от 4 до 12 м по вертикали, оба ствола имеют открытый забой с номинальным диаметром 139,7 мм. Из семи скважин, пробуренных на продуктивные отложения бобриковского горизонта, горизонтальные стволы имеют разницу по вертикали от 1,5 до 2 м и разведены по азимуту на удалении от 50 до 150 м (длина ГС составляет от 80 до 470 м). При этом первый ствол РГС пробурен с номинальным диаметром 120,6 мм, а второй ствол – с диаметром 144 мм, оба ствола не обсажены и имеют открытый забой. На Рисунке 1.16 приведена схема расположения стволов подобных РГС.

В 2003 г. было выполнено моделирование разработки участка залежи месторождений с применением МЗС с четырьмя ответвлениями из основного горизонтального ствола (Рисунок 1.17) [16]. На основании этих расчетов в НГДУ «Елховнефть» пробурена четырехствольная скважина № 8249ГР на турнейский горизонт. При этом четыре ствола направлены вверх по отношению к основному стволу и в разные стороны для увеличения области дренирования вырабатываемого участка залежи.

При строительстве РГС был применен следующий технологический прием: зарезка и бурение участка стабилизации осуществлялась прямой компоновкой

с ЗУ 89–90° с дальнейшим разворотом азимута в противоположную сторону (относительно предыдущего ответвления). Интенсивность набора кривизны в интервале изменения ЗУ и разворота азимута при бурении горизонтальных стволов по восходящему профилю составляла 4–6 °/10 м. Башмак 168 мм эксплуатационной колонны спущен на глубину 1258 м. Самый глубокий забой имеет длину 1575 м по стволу, остальные - 1455, 1495 и 1540 м. Скважина вскрыла по вертикали 14–27 м отложений кизеловско-черепетского возраста. Расстояние между забоями составляет 48–57 м. При максимальной длине горизонтального ствола 317 м, длина вскрытого пласта составляла 542 м. Эта скважина работает с декабря 2004 г. с текущим дебитом в среднем 9,5–10 т/сут, при вводе в эксплуатацию - 14,5–15 т/сут (соседние скважины работают с дебитом 3–4 т/сут). Стоимость строительства четырехзабойной скважины № 8249ГР выше стоимости строительства традиционной ГС примерно на 30 % [49].

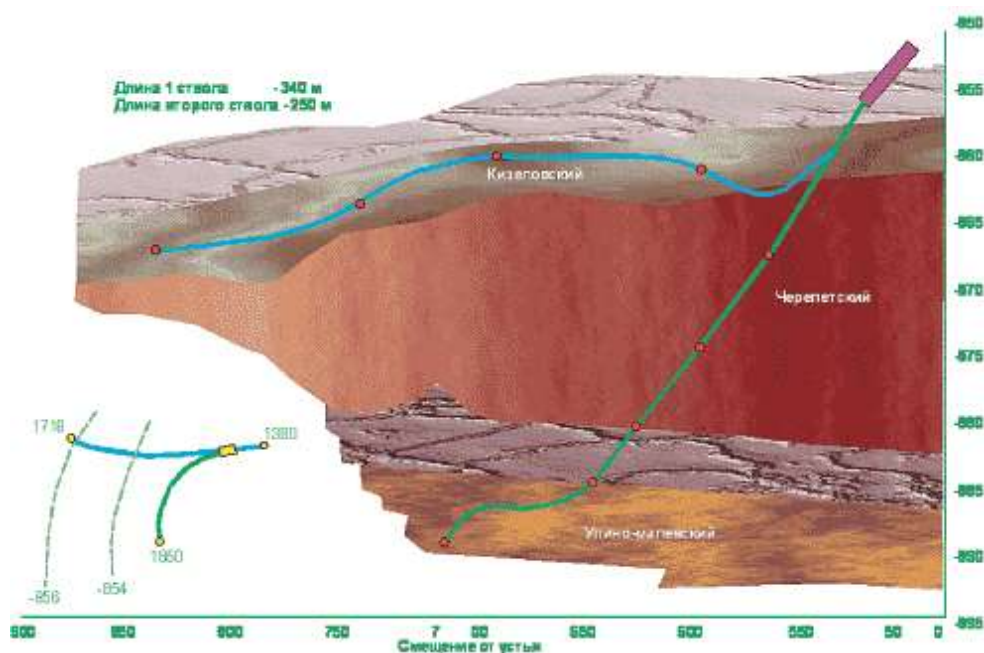
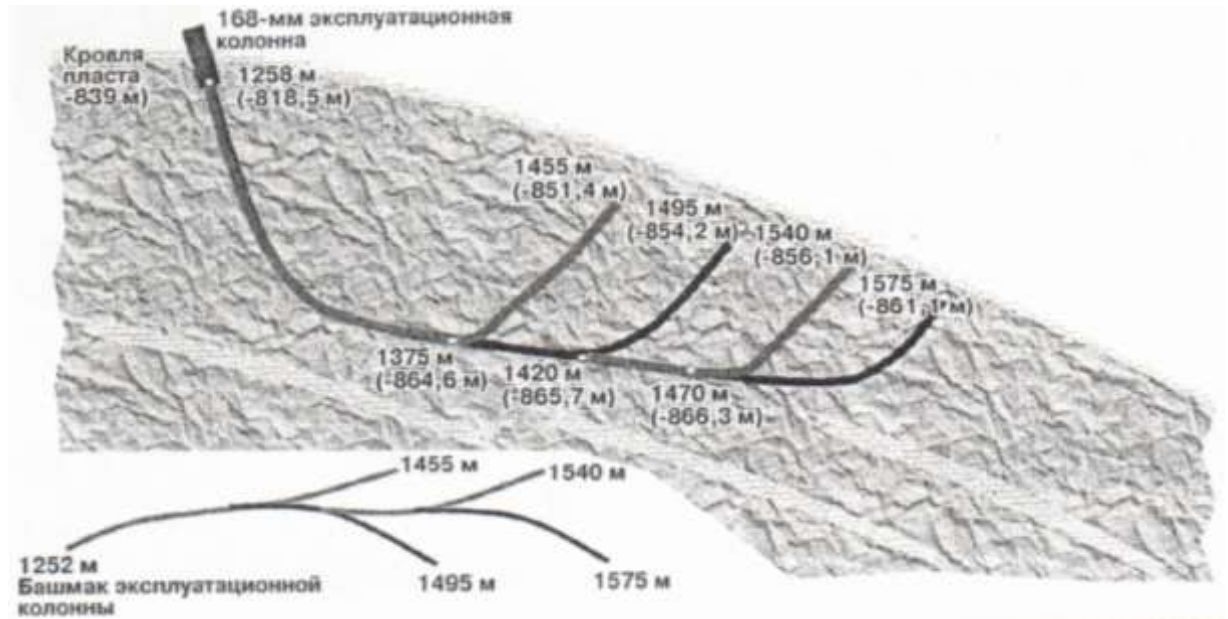
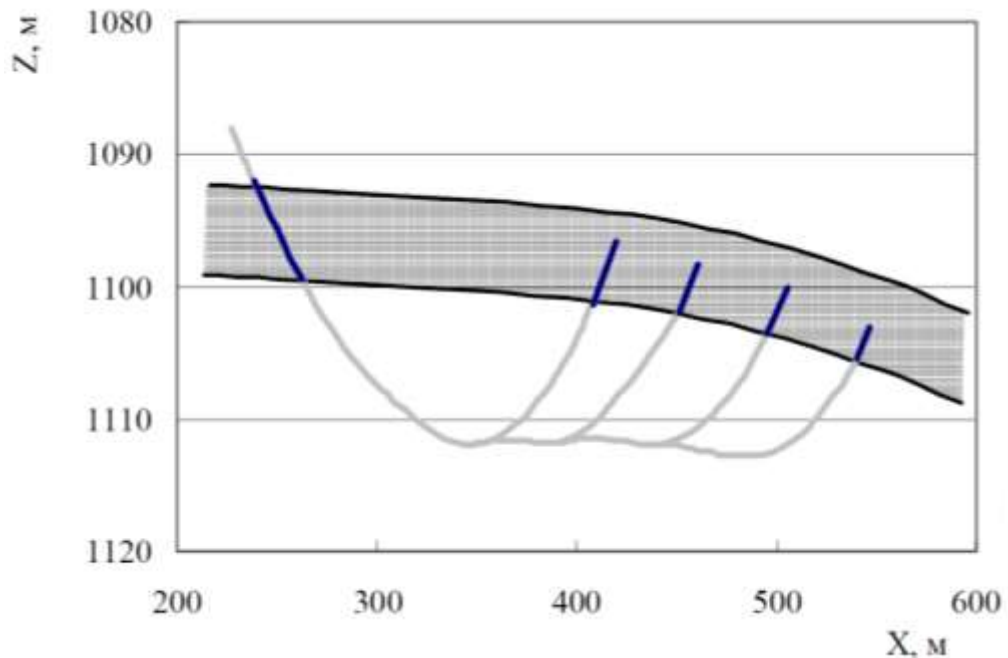


Рисунок 1.16 – Фактический профиль РГС № 8802«РГ», пробуренной на кизеловский (первый забой) и упино-малевский (второй забой) горизонты Ново-Елховского нефтяного месторождения [16]



а) профиль РГС [49]



б) работающие участки стволов РГС [51]

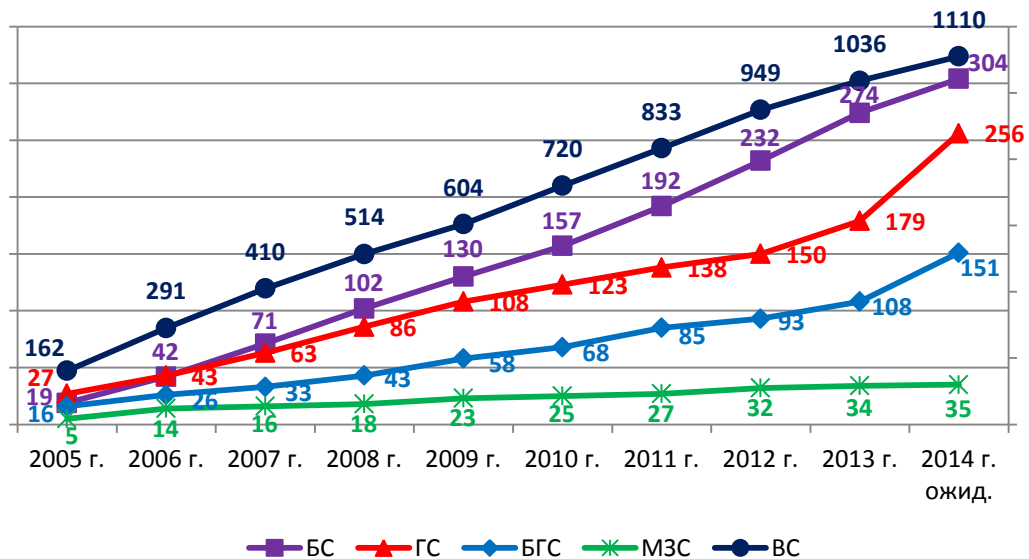
Рисунок 1.17 – Многозабойная скважина № 8249ГР

На технологию строительства РГС с описанной конструкцией авторами получен патент. Суть запатентованной технологии в следующем [50]: основной горизонтальный ствол до планируемого места зарезки дополнительного ствола бурят компоновкой с центраторами (стабилизирующими его направление), затем компоновкой с кривым переводником осуществляют бурение дополнительного ствола (ответвления) такого же диаметра, расширение интервала разветвления производят бицентричным долотом, бурят следующий участок основного

горизонтального ствола прежним диаметром, и в описанной последовательности забуривают последующие ответвления. Ответвления разведены не в стороны, а по восходящей траектории.

Описанная технология бурения РГС также предусматривает множество СПО для смены типоразмеров долот. При этом следует отметить достаточно большую интенсивность набора кривизны при бурении восходящих по профилю ответвлений $4\text{--}6^\circ/10\text{ м}$. Использование таких радиусов кривизны обосновано, вероятно, необходимостью уплотняющего бурения в интервале пласта (расстояние между забоями порядка 50 м). Данный тип профиля может быть применен в случае, когда покрышка целевого пласта представлена неустойчивыми породами, склонными к интенсивному обрушению при вскрытии с большими зенитными углами, препятствующему спуску и цементированию 168/178 мм эксплуатационной колонны с полным перекрытием неустойчивой покрышки. Также подобные профили могут применяться в случае проводки РГС по переслаивающимся маломощным пропласткам (с толщиной 1 м и менее), гарантированная проводка горизонтальных стволов по которым невозможна, для более равномерной выработки запасов углеводородов. Геологическим ограничением для данного типа профиля РГС является наличие или отсутствие водонасыщенных пропластков между основным горизонтальным стволом и целевым пластом (Рисунок 1.17).

Аналогом данной технологии является технология, описанная в работе [52], где предложено бурение ответвлений долотом меньшего диаметра. Некоторые детали технологии строительства РГС в ПАО «Татнефть» описаны также в работе [53]. За период 2005–2014 гг. на Ромашкинском месторождении пробурено около 230 РГС (Рисунок 1.18).



Условные обозначения: Скважины: ВС - вертикальные, ГС - горизонтальные, РГС - многозабойные, БС - боковые стволы, БГС - боковые горизонтальные стволы

Рисунок 1.18 – Динамика ввода скважин на Ромашкинском месторождении [23]

Одним из перспективных направлений внедрения РГС в Татарстане являются залежи со слоистыми слабопроницаемыми коллекторами, разделенными непроницаемыми глинистыми прослоями. При этом в РГС основной ГУ планируется пробурить посередине продуктивного пласта, а ответвления - по выше- и нижележащим продуктивным пластам (Рисунок 1.19). В ходе бурения РГС непроницаемые глинистые прослои перекрываются профильными перекрывателями, в каждом ГУ проводят гидрокислотный разрыв для создания гидродинамической связи между продуктивными пластами. С целью предотвращения обводнения основного ГУ в плотном прослое между основным и нижним ГУ размещают управляемый фильтр. В случае прорыва воды профильный перекрыватель, установленный в нижней части горизонтального ствола, закрывают и изолируют обводненный участок [54].

Для реализации данного решения коллектор должен быть представлен устойчивыми рифовыми отложениями. Идея селективной обработки ответвлений РГС реализована на ряде месторождений Урало-Поволжья. Отличительным, в данном случае, является заканчивание с установкой профильных перекрывателей между точками зарезки ответвлений. С технологической точки зрения, установку

профильных перекрывателей в ГУ лучше выполнять непосредственно в процессе ремонтно-изоляционных работ (РИР) по отсечению обводненного ответвления (после шаблонирования и подготовки ствола), а не в процессе строительства скважин, т.к. это повышает риски непрохождения приборов ГИС или инструмента для обработки призабойной зоны (ОПЗ) через профильные перекрыватели, а также ведет к удорожанию строительства скважин без явной необходимости в подобном заканчивании.

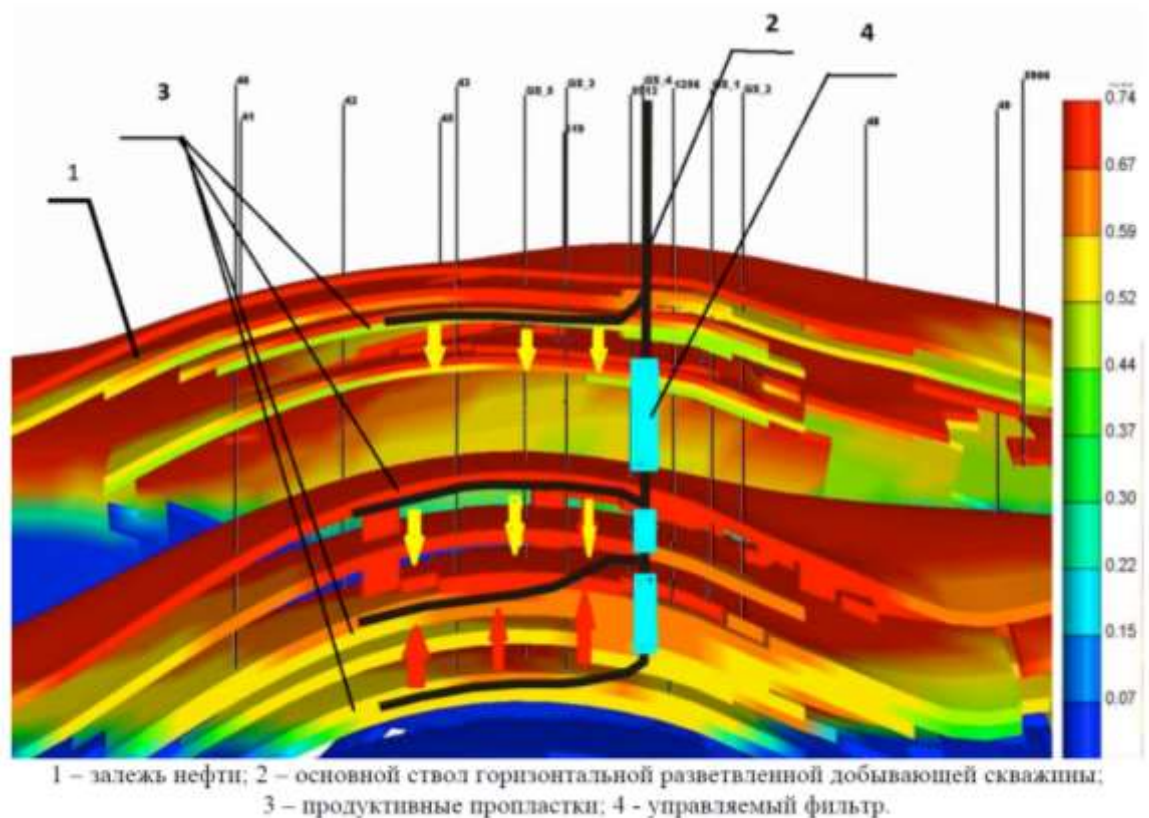


Рисунок 1.19 – Схема реализации технологии разработки залежи нефти в слоистых коллекторах Пионерского месторождения [54]

Профильный перекрыватель также может использоваться для изолирования водонасыщенных пропластков перед запуском РГС в эксплуатацию, но данное решение эффективно при наличии перемычек, отделяющих водонасыщенные пропластки от нефтенасыщенных.

Предложенная авторами идея проведения гидроразрыва пласта (ГРП) в каждом ответвлении МЗС встречается и в других источниках [1, 29, 92]. В рассматриваемом выше случае для производства ГРП необходим либо

селективный доступ и качественное пакерование лифта в интервале открытого ствола с последующим проведением ГРП, либо закачивание пропанта через фильтр, обсаживающий основной ГУ.

1.5. Планирование РГС в компании «Салым Петролеум Девелопмент Н.В.»

При разработке баженовской свиты Салымского месторождения рассматривалась возможность применения системы МЗС специальной архитектуры (Рисунок 1.20) [55].

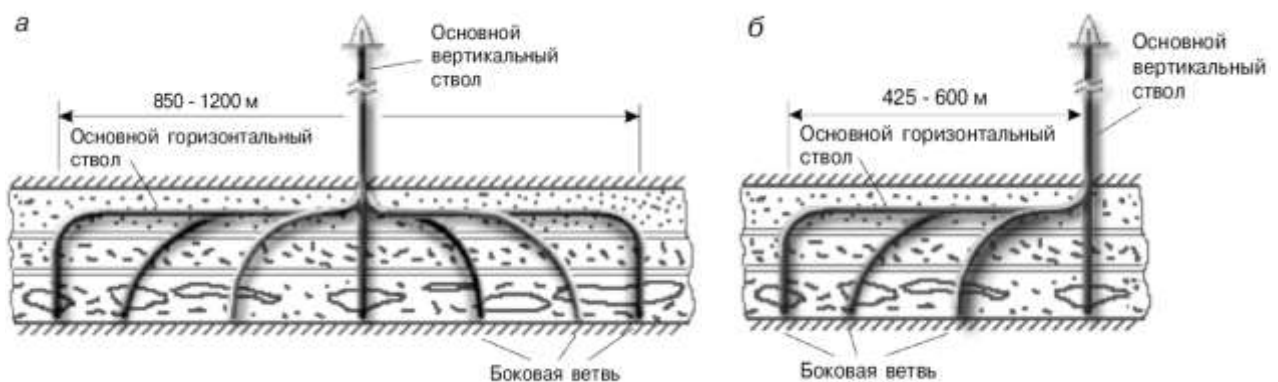


Рисунок 1.20– МЗС с основным горизонтальным стволом длиной 850–1200 м (а) и 425–600 м (б)

Рассматриваемая авторами технология строительства РГС заключалась в следующем: основной вертикальный ствол РГС проводится до подошвы пласта, горизонтальный ствол проводится на уровне кровли пласта в твердых породах. Длина его приблизительно 1200 м, предпочтение отдается двухстороннему стволу (от вертикального в противоположные стороны). Через каждые 200 м из горизонтального ствола забуриваются полого наклонные боковые стволы (ответвления) протяженностью до 150 м с чередованием их направлений влево и вправо. Каждый боковой ствол пронизывает всю эффективную толщину. На концах горизонтальных стволов бурятся вертикальные ветви также на всю толщину пласта. Вместе с центральным вертикальным стволом такая РГС включает семь забоев (7 ветвей). По мнению авторов, по эффективности дренирования такая РГС может стать эквивалентной 15–20 вертикальным

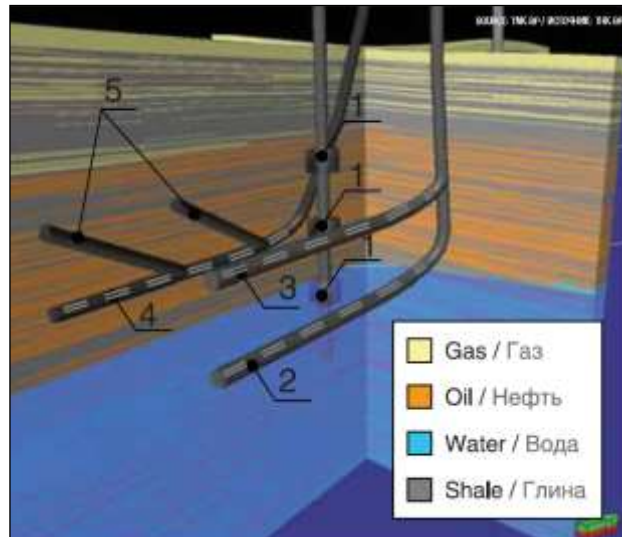
скважинам, особенно в начале очередного этапа разработки, в частности, после «массированных» ГРП, пока не снизится пластовое давление в окрестности действия ветвей РГС. По мнению авторов, стоимость сооружения такой РГС выше стоимости вертикальной скважины приблизительно в 2,5 раза, а экономическая эффективность значительно выше. Технология может быть применена в резко неоднородных пластах, имеющих мозаичный характер, низкие ФЕС, при отсутствии краевой или пластовой воды, «запечатанности» пласта, высокой гидрофобности и других геологических особенностях. При этом определяющим для внедрения технологии является устойчивость коллектора [55]. В источниках подробное описание конструкции и технологии бурения РГС не приведены.

1.6. Опыт компании ОАО «ТНК-ВР Холдинг» (ПАО «Роснефть»)

В 2007 г. компания пробурила первую РГС на 70 % превысившую плановую производительность: 270 тонн в сутки вместо плановых 150 тонн [56]. В дальнейшем РГС планировалось использовать в качестве стандартной технологии в ряде проектов.

В 2008 г. была утверждена технологическая схема опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) Русского месторождения, направленная на определение возможности промышленной эксплуатации как водонефтяной, так и подгазовой зоны месторождения. Содержание программы ОПЭ заключалось в создании на участке одного-двух элементов разработки (Рисунок 1.21). Программа предусматривала бурение вертикальной наблюдательной скважины, затем осуществляется отбор керна и проб пластовых флюидов, а также полный комплекс ГИС. За обсадной колонной скважины в интервале продуктивного пласта устанавливается несколько датчиков, регистрирующих изменение пластового давления и температуры в разных интервалах объекта. Затем бурится МЗС конструкции «рыбий хвост» либо ННС, пересекающая весь продуктивный интервал, с целью определения максимально возможной продуктивности объекта. После этого бурится ГС. Ее эксплуатация и регистрация давлений заколонными датчиками, расположенными на разном уровне в наблюдательной скважине,

позволяют определить фильтрационные свойства пласта (гидропрослушивание в горизонтальной плоскости), а также вертикальную сообщаемость объекта (гидропрослушивание по вертикали).



Условные обозначения: 1 – колонные датчики; 2 – первый горизонтальный ствол, обсаженный фильтром; 3 – второй боковой горизонтальный ствол, обсаженный фильтром; 4 – горизонтальный ствол, обсаженный фильтром; 5 – необсаженные боковые стволы

Рисунок 1.21 – Схематичное представление элемента разработки [56]

Разработка нефтенасыщенных пластов Русского месторождения, имеющих неоднородность и множество пропластков, реализована с использованием ГС и РГС. Так, по первой ГС № 1Г (пробурена в августе 2007 г.) получено 90 тонн нефти в сутки, сопоставимый с дебитом по второй скважине № 2Г (пробурена в начале 2008 г.). При этом на новых скважинах не применялись методы повышения нефтеотдачи пластов (ПНП). В апреле 2008 г., в целях большего охвата пласта дренированием, рядом с предыдущими была пробурена третья скважина № 3Г с обсаженным фильтром горизонтальным стволом длиной 725 м и двумя необсаженными ответвлениями, имеющими протяженность 150 м и 246 м (Рисунок 1.22).

Конструкция РГС предусматривает [57] обсаживание ствола от устья до кровли пласта ПК1 цементируемой технической колонной 245 мм (глубина 1099

м по стволу, 871 м по вертикали), донабор ЗУ и бурение в пределах пласта основного ГУ и двух ответвлений протяженностью 246 м и 150 м соответственно (Рисунок 1.19). При этом основной ГУ размещается в интервале 1099–2000 м. В основной ствол спускается 178 мм эксплуатационная колонна, с перекрытием первых 276 м ГУ и последующим манжетным цементированием этого интервала и вплоть до устья (начало ГУ цементируется, возможно по причине его близкого залегания к подошве пласта ПК1), оставшиеся 725 м ГУ обсаживаются фильтром 168 мм, вероятно, спускаемым одновременно с 178 мм эксплуатационной колонной. Способы зарезки ответвлений РГС авторами не приводятся.

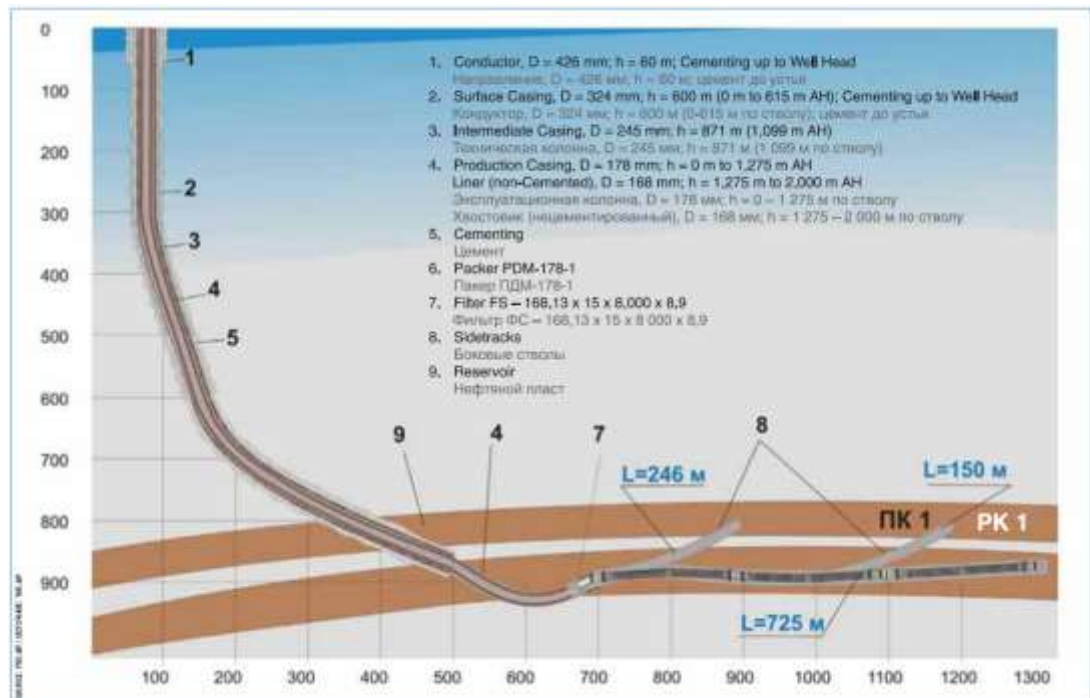


Рисунок 1.22 – Конструкция РГС № 3Г [57]

В августе 2009 г. завершено строительство пятизабойной РГС. Длина скважины в субгоризонтальном направлении составила около 900 м. При этом длина основного ствола – около 800 м, а длина каждого из 4 боковых – около 200 м. Суммарная протяженность всех участков в продуктивной части пласта составляет около 1,5 тыс.м. Дебит пятизабойной скважины существенно превысил показатели ранее пробуренных ГС [57, 58].

Проведенные в компании расчеты по Самотлорскому месторождению свидетельствовали, что [59]:

- бурение РГС на объекте разработки АВ₁¹⁻² экономически целесообразно в эффективных нефтенасыщенных толщинах 9–12 м проницаемостью менее 30–40 мД, при условии, что стоимость РГС не превысит стоимость ГС более чем на 50%;

- бурение РГС второго уровня сложности на пласте ЮВ1 экономически оправдано в широком диапазоне проницаемости и эффективных нефтенасыщенных толщин.

В данной работе также не приводится описание конструкций РГС, технологии их бурения и заканчивания.

1.7. Опыт РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»

Строительство РГС применяется в качестве одного из эффективных методов для разработки низкопроницаемых коллекторов [60]. Первой пробурена трехзабойная скважина № 52 Северо-Домановичского месторождения, 2 уровня по классификации ТАМЛ с разветвлением стволов из обсаженного участка скважины (Рисунок 1.23).

Мощность вскрытых продуктивных коллекторов по стволам скважины отличается более чем в 2 раза, а дебит при испытаниях в открытом стволе – в 10 раз (Таблица 1.3). При этом расстояние между забоями крайних стволов скважины составляет 400 м. Эксплуатационная колонна диаметром 168 мм спущена на глубину 2535 м. Боковой ствол 52г2 забурен из обсадной колонны на глубине 2498 м, забой – 2863 м. Боковой ствол 52г3 забурен из обсадной колонны на глубине 2517 м, забой – 2966 м. Ствол 52г пробурен из-под башмака эксплуатационной колонны до глубины 2996 м.

Судя по профилю РГС [60], боковые ответвления вырезаются ориентировочно при зенитных углах 50–60° и набором угла до 80–81° при добурировании ответвления (Таблица 1.3).



Рисунок 1.23 – Профиль РГС № 52 Северо-Домановичского месторождения [60]

Таблица 1.3 – Геолого-технические характеристики РГС № 52 Северо-Домановичского месторождения

Параметр	Ствол скважины		
	52г	52г2	52г3
Протяженность открытого ствола, м	461	364	448
Глубина зарезки, м	2535	2498	2517
Забой, м	2996	2863	2966
Максимальный угол наклона	90,3	80,2	81,3
Мощность продуктивного коллектора, м			
- по вертикали	9,9	8,3	17,8
- по стволу	53,3	32,1	83,1
Дебит ствола при испытаниях в открытом стволе, м ³ /сут	1,11	2,55	14,15

Скважина введена в эксплуатацию из бурения в октябре 2010 года. Перед запуском в эксплуатацию на скважине производились работы по освоению с применением механизма ориентации гибкой трубы (Рисунок 1.21). Была выполнена промывка и кислотная обработка каждого из стволов скважины в отдельности. По результатам освоения коэффициент продуктивности скважины увеличился с 0,86 до 5,92 (в 6,7 раза). На момент запуска в эксплуатацию дебит скважины составил 24 м³/сут. Во время работ по освоению были проведены исследования по определению продуктивных интервалов ствола скважины 52г с углом наклона до 80° с помощью автономного прибора, спускаемого на гибкой

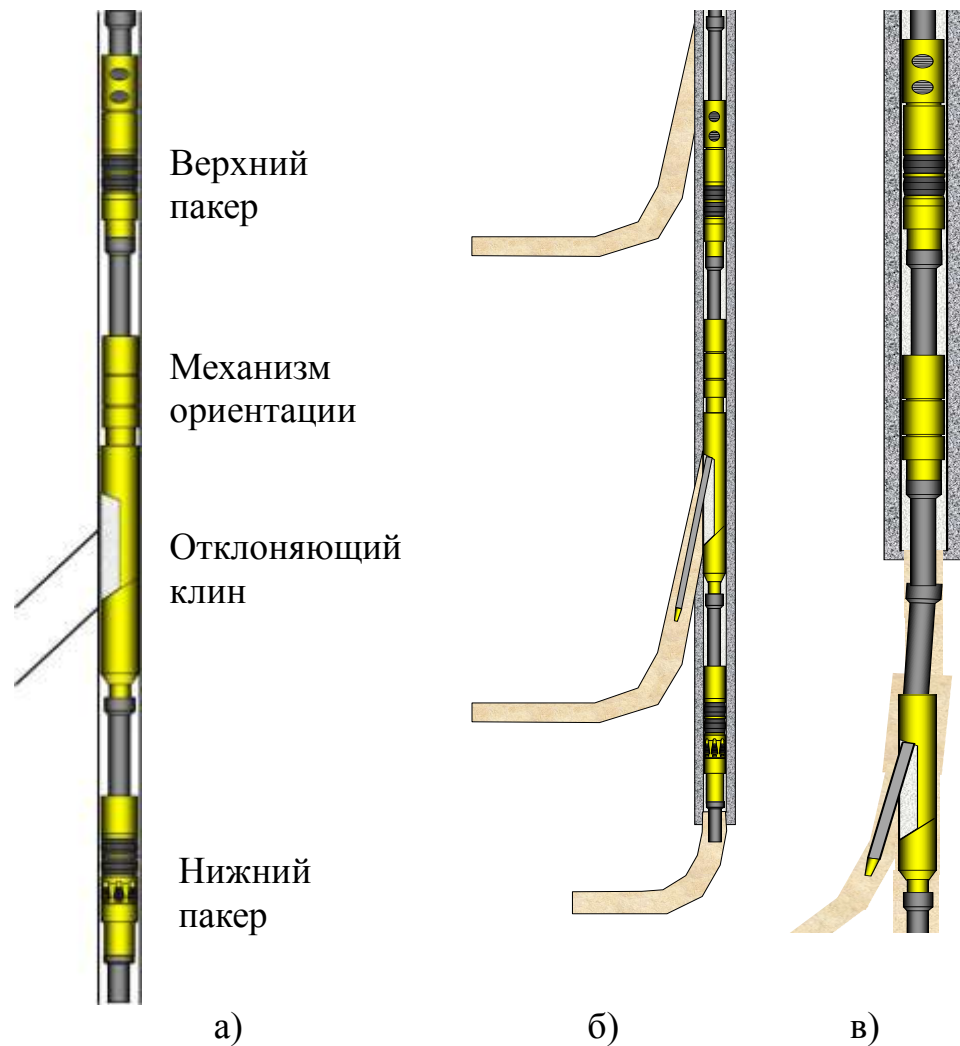
трубе. Фактические затраты на строительство и освоение трехзабойной скважины № 52 Северо-Домановичского месторождения в 1,7 раза превысили затраты на строительство и освоение одноствольной скважины.

Также в 2010 г. работы по описанной технологии были проведены на скважине № 289 Речицкого месторождения. Скважина двухзабойная, 1 уровня сложности по классификации TAML - разветвление стволов выполнено в необсаженном участка скважины (Рисунок 1.24). Эксплуатационная колонна диаметром 168 мм спущена на глубину 2280 м. Из-под башмака эксплуатационной колонны пробурен открытый ствол 289г до глубины 2244 м. В интервале 2302–2304 м выполнено расширение ствола скважины, из которого пробурен открытый ствол 289г2 до глубины 2402 м.

На скважине производились работы по интенсификации притока. С помощью механизма ориентации было осуществлено направление гибкой трубы в боковой ствол скважины, что позволило произвести промывку, установку солянокислотной ванны и направленную солянокислотную обработку бокового ствола. По результатам работ на скважине № 289 Речицкого месторождения было получено увеличение дебита нефти в 1,9 раза.

По состоянию на начало 2015 г. работы по описанной технологии были проведены еще на трех двухзабойных скважинах, 1 уровня по классификации TAML (разветвление стволов из необсаженного участка скважины). С помощью механизма ориентации было осуществлено направление колтюбинговой трубы в боковой ствол скважины, что позволило произвести промывку и солянокислотную обработку бокового ствола. Проведенные работы показали, что освоение каждого из пробуренных стволов многоствольной скважины в отдельности позволяет существенно повысить дебит скважины. По результатам работ было получено увеличение дебита нефти от 1,5 до 5,6 раз.

Подобные работы по интенсификации притока в РГС, пробуренных в карбонатных коллекторах, путем кислотных обработок боковых стволов также выполняются в ПАО «АНК «Башнефть», ПАО «Татнефть», ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» [36 и др.].



а) общий вид компоновки; б) конструкция скважины № 52 Северо-Домановичского месторождения со спущенной компоновкой для освоения ствола 52r3; в) конструкция скважины № 289 Речицкого месторождения со спущенной компоновкой для освоения ствола 289r.

Рисунок 1.24 – Схема компоновки подземного оборудования с механизмом ориентации гибкой трубы [60]

Таким образом, при строительстве РГС на территории деятельности РУП ПО «Белоруснефть» используются:

1. Технологии, традиционно используемые при зарезке боковых стволов, а именно, вырезание окна в полого-направленном стволе с установленного в «материнской» колонне отклоняющего клина, бурение бокового ствола без последующего обсаживания. Данный способ заканчивания РГС использовался на скважине № 52 и может применяться при массивных залежах с устойчивыми (карбонатными) породами, без водонасыщенных пропластков (пластов) в

интервалах бурения ответвлений. В условиях многопластовых залежей Западной Сибири и переслаивающимися водо- и нефтенасыщенными пластами данный метод не применим, либо возможен при вырезании окна непосредственно в продуктивном интервале. К сожалению, вырезание окна в ГУ достаточно сложный технологический процесс, как в связи со сложностью установки клина-отклонителя, так и необходимостью доведения требуемой нагрузки на фрез и долото. Кроме того, при подъеме бурильного инструмента высока вероятность прихвата и срезания компоновки в интервале окна.

2. Технология «зарезки» ответвления из необсаженного предварительно расширяемого интервала. Описание технологии непосредственно самого процесса зарезки ответвления в работе отсутствует. Вероятно, расширение ствола отдельным рейсом необходимо для формирования в стволе уступа, с которого должна облегчаться зарезка нового ствола (ответвления).

1.8. Опыт ПАО «ЛУКОЙЛ»

Одним из первых в компании проектов по строительству МЗС стало бурение на Кравцовском нефтяном месторождении (шельф Балтийского моря, Калининградская область) скважины 3 уровня сложности по классификации TAML, горизонтальные стволы которой проведены преимущественно в прикровельной части пласта, в том числе и с целью оперативной доразведки залежи и ее оконтуривания [61]. При строительстве скважин применялись специальные стыковочные устройства, обеспечивающие избирательный доступ в ответвления посредством использования сложных технических узлов. В дальнейшем подобный опыт рассматривался или реализовывался на проектах компании в районе Большехетской впадины на Ямале и Каспийских проектах компании [62, 63], в том числе на скважинах, относимых к категории скважин с большим смещением от вертикали и предусматривающих особый порядок их проектирования [64, 65]. Однако, в виду достаточно большой доли непроизводительных работ при использовании оборудования для формирования многоствольных стыков уровней сложности TAML 3–6 [66, 67] и экономической

не целесообразности, в дальнейшем такие скважины применялись только на отдельных проектах. Одновременно с этим также имеется опыт строительства РГС уровня сложности TAML 1–2.

В рамках проекта Карачаганак (Казахстан) введены в эксплуатацию 7 МЗС. Бурение РГС с основным субгоризонтальным стволом и одним-двумя горизонтальными ответвлениями позволило приобщить к разработке участки с повышенными ФЕС и получить по скважинам средний дебит свыше 1000 т/сут. [68, 69].

Накопленный к 2008 г. опыт бурения ГС на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ- Западная Сибирь» свидетельствовал, что существует техническая возможность срезов в необсаженных ГУ типовым бурильным инструментом без применения специальных технических средств.

На месторождениях ПАО «ЛУКОЙЛ» в Западной Сибири при непосредственном участии автора в 2009 г. были пробурены и введены в эксплуатацию первые двухзбойные скважины, трехзбойные – в 2012 г., четырех- и пятизбойные (с отсечением ответвлений по затрубному пространству хвостовика набухающими пакерами) – в 2013 и 2014 гг. соответственно. Так, в конце 2008 г. было принято решение о реализации технологии строительства РГС с использованием зарезки боковых ответвлений в открытом стволе. В апреле 2009 г. на объекте разработки БС11/2 Дружного месторождения была введена в эксплуатацию первая РГС № 8141Г (Рисунок 1.25) [70].

По итогам мониторинга работы данной РГС было принято решение о бурении подобных скважин на другие объекты – к середине 2010 г. введены в эксплуатацию скважины № 7322Г Кечимовского месторождения на пласт АВ1 и № 7183Г Повховского месторождения на пласт ЮВ1. Ответвления в указанных РГС обсаживались после завершения их бурения с целью исключения попадания в них хвостовика основного горизонтального ствола.

В связи с началом в 2010 г. масштабной программы опытно-промышленных работ по заканчиванию ГС с многостадийным ГРП (МГРП), реализация технологии строительства РГС временно была приостановлена. В этот период

проводились работы по заканчиванию ГС в основном с 4–5 интервалами гидроразрыва в ГУ, к 2016–2017 годам в дальнейшем количество операций МГРП и протяженность ГУ постепенно увеличивались, соответственно, до 10–15 стадий и до 1200–1500 м (Рисунок 1.26). К настоящему времени имеется опыт проведения РИР по отсечению обводненного интервала гидроразрыва [71].

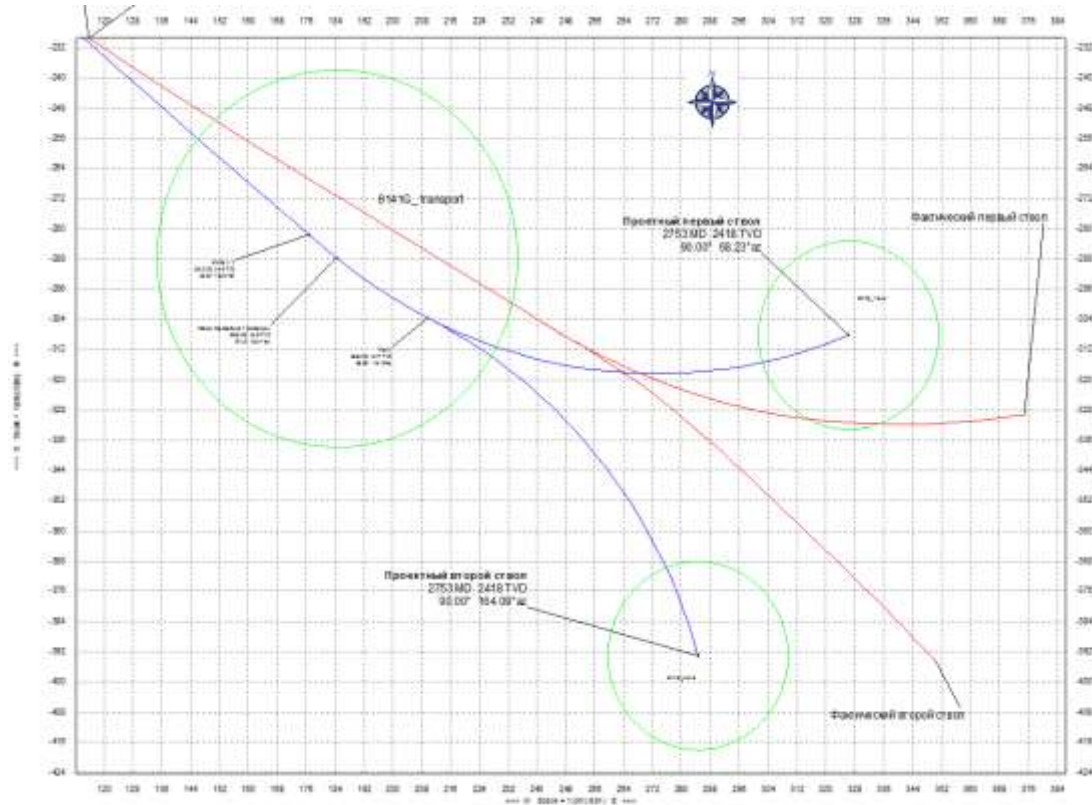


Рисунок 1.25 – Проектный и фактический профиль ствола РГС № 8141Г

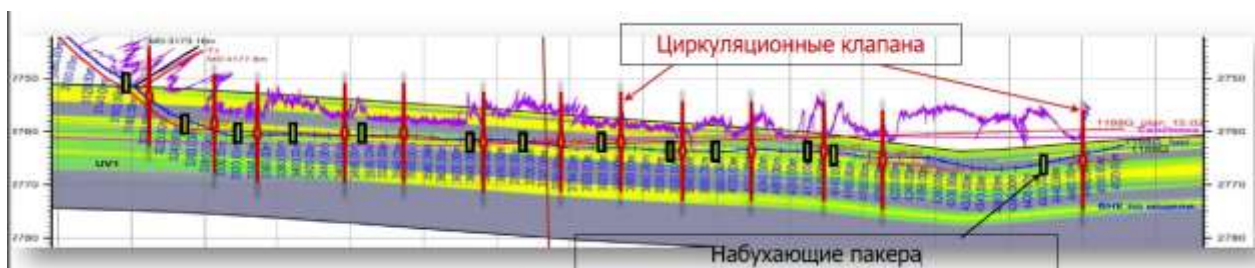


Рисунок 1.26 – Схема заканчивания в интервале продуктивного пласта скважины № 1188Г на пласт ЮВ1/1 Северо-Покачевского меторождения с 13 стадийным МГРП при протяженности ГУ 1312 м

Работы по строительству РГС вновь возобновились в 2012 г. на участках, где не был получен ожидаемый эффект от реализации технологии МГРП в ГС

[72]. К концу 2012 г. на Кечимовском месторождении были пробурены две РГС без обсаживания хвостовиком боковых ответвлений: № 1016Г (три забоя) и № 1007Г (два забоя), с учетом мониторинга эксплуатации без обсаженных ответвлений в 2013 г. уже введены в эксплуатацию 17 РГС, в том числе первая в ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» четырехзабойная скважина. Технология реализована при тесном взаимодействии специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», ООО «Буровая компания «Евразия» и сервисных компаний по наклонно-направленному бурению.

Основная доля пробуренных РГС имели обсаженный хвостовиком основной ГУ и не обсаженные ответвления. При этом, предварительно возможность оставления не обсаживаемых ответвлений была оценена как промысловыми [73], так и стендовыми испытаниями, а также ретроспективным анализом производственного опыта [74, 75].

Основной проблемой при реализации многозабойного бурения являлась длительность операций, характерных именно для бурения РГС, таких как зарезка в необсаженном стволе нового ствола (ответвления). Продолжительность одной такой операции достигала 2-3 суток, что предопределило необходимость разработки методических и технологических решений, направленных на совершенствование технологии бурения РГС.

Также имеется опыт строительства РГС и в других отечественных компаниях, не представленный в данном обзоре в связи с отсутствием официальных публикаций по рассматриваемой тематике.

Таким образом, опыт строительства многозабойных скважин в Западной Сибири и Урало-Поволжье свидетельствует, что большая часть РГС пробурена с одним ответвлением от основного горизонтального ствола. РГС с двумя-тремя и более ответвлениями бурятся в небольших объемах, при этом опыт бурения таких скважин не всегда оценивается как положительный из-за непроизводительных работ.

1.9. Ранжирование профилей РГС по сложности их реализации

Выполненный на основании собранного материала анализ используемых на практике профилей РГС различной конфигурации и технологий из строительства [80] показывает, что рассмотренные профили можно сгруппировать (Таблица 1.4) по степени сложности реализации (в порядке возрастания сложности):

- наклонные и пологие типы профилей РГС являются достаточно технологичными, т.к. зарезка ответвлений в наклонно-направленных участках проходит значительно легче, чем в ГУ. Это обусловлено лучшим дохождением нагрузки на долото, исключением подвисания и срыва компоновки при наработке желоба и зарезке ответвления;

- ярусные и ярусно-разветвленные типы профилей РГС также достаточно технологичны, т.к. каждый ствол бурится на отдельный объект (пласт, пропласток) и зарезка стволов выполняется в субгоризонтальных участках. Основным условием при планировании таких профилей является учет рисков пересечения стволов и, как следствие, «разнесение» стволов на достаточном удалении друг от друга;

- наиболее сложными как с точки зрения планирования профилей, так и дальнейшей их реализации являются разветвленные и горизонтально-восходящие типы профилей РГС. Это обусловлено необходимостью разведения стволов для минимизации их взаимной интерференции, так и необходимостью выполнения зарезок ответвлений в ГУ.

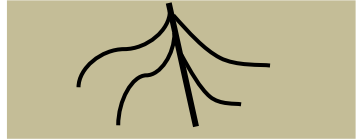
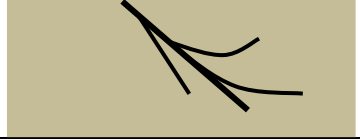
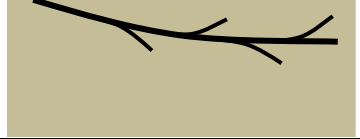

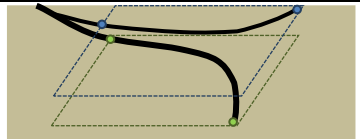
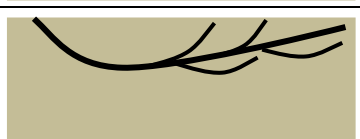
Горизонтально-восходящий тип профиля является частным случаем разветвленной РГС, в связи с этим дальнейшие исследования выполнялись для профилей, разветвленных РГС. Разветвленные РГС наиболее технологичны с точки зрения их применения в условиях пластов с небольшой нефтенасыщенной мощностью, в то время как наклонные и пологие РГС могут применяться преимущественно в массивных залежах.

Наклонно-направленные, пологие и субгоризонтальные типы профилей РГС могут быть реализованы без использования специальных технических средств.

Бурение разветвленных РГС требует совершенствования технико-технологических решений по зарезке ответвлений, т.к. высока доля неуспешных работ по наработке желоба в открытом участке ствола и дальнейшей зарезке. Данное обстоятельство обусловлено как «жесткостью» используемых КНБК для бурения ГУ (с модулями для каротажа в процессе проводки ствола в пределах пласта), так и сложностью доведения стабильной нагрузки на долото – при сложном профиле в процессе зарезки ответвления происходит «зависание» бурильной компоновки и ее последующий срыв с наработанного «уступа» при увеличении нагрузки. Данная проблема объясняется сочетанием таких факторов, как: повышенное трение при сложном профиле, недостаточная устойчивость бурильной колонны, «жесткость» КНБК, обеспечивающая меньшую, чем требуется, интенсивность набора кривизны в интервале зарезки ответвлений, сложность профиля РГС из-за недостаточного смещения от устья точки вскрытия целевого пласта, нахождения окончательных забоев в «непредпочтительной» области бурения (с высоким риском получения осложнений).

Также проблемы с наработкой желоба традиционными методами «сверху-вниз», «снизу-вверх», «по времени» обусловлены тем, что наработка желоба происходит на длину, не превышающую длину ведущей трубы. При этом «жесткий» низ КНБК имеет сопоставимую или большую длину, как следствие большой жесткости КНБК, нагрузка на боковое вооружение долота ограничено и наработка желоба выполняется в неоптимальном режиме. Следует отметить, что «энергоэффективный» профиль РГС необходим не только для обеспечения успешности процесса бурения, но и с точки зрения проведения качественных промыслово-геофизических исследований (ПГИ) в процессе их эксплуатации (исключения недохода геофизических приборов на койлтюбинге).

Таблица 1.4 – Классификация РГС по изменению величины зенитного угла и расположению забоя основного ствола [76]

Тип РГС	Зенитный угол <u>основного ствола</u> в интервале пласта, град.	Угол разведения ответвлений относительно основного ствола по азимуту, град.	Графическое изображение
Наклонная РГС (с наклонно-направленными окончаниями)	до 45	не регламентируется	
Пологая РГС (с полого-направленными окончаниями)	от 45 до 75	не регламентируется	
Разветвленная РГС (с разветвленно-горизонтальными окончаниями)	от 75 до 95	от 30	
Ярусная РГС (ответвление условно параллельно основному стволу и располагается в пределах другого пропластка)	от 75 до 95	до 30	
Ярусно-разветвленная РГС (ответвление располагается в пределах другого пропластка с разведением стволов по разным азимутам)	от 75° до 95	от 30	
Горизонтально-восходящая РГС	максимальный зенитный угол – свыше 95	не регламентируется	

Примечание – в наклонных и пологих РГС отдельные ответвления могут иметь зенитный угол больше табличных значений, но при этом основной ствол имеет зенитный угол в соответствии с табличными данными.

1.10. Результаты анализа технико-технологических решений, применяемых при строительстве РГС

Из апробированных и опубликованных в литературных источниках технико-технологических решений по строительству РГС следует выделить следующие технологические схемы:

1. Формирование РГС путем бурения боковых необсаживаемых стволов из материнской колонны путем фрезерования окна – данный метод применим в наклонно-направленных РГС, в основном в массивных рифовых залежах. В случае вырезаний окна в ГУ, риски «зацепления» инструментом за «окно»кратно возрастают ввиду прилегания инструмента к нижней части материнской колонны. В таком случае ориентирование окна вверх ($GTF = 0^\circ$) и использование отклоняющей компоновки, предотвращающей сближение бурильной КНБК с материнской колонной, может незначительно снизить риски обрыва инструмента, но данный вид работ даже при этом остается достаточно рискованным и не технологичным. В связи с этим, рассматриваемая технология может преимущественно применять в наклонно-направленных РГС, не имеющих при бурении боковых ответвлений водонасыщенных пропластков.

2. Бурение основного ствола долотом большего диаметра, чем в боковых ответвлениях – обусловлено необходимостью спуска хвостовика в основной горизонтальный ствол РГС. Задача несомненно актуальна, но требует многократных СПО и смены долота (КНБК) для бурения каждого интервала (не менее двух СПО на одно ответвление).

3. Строительство РГС с расширением в основном (необсаженном) стволе определенного интервала для последующей зарезки в нем ответвления. Данное решение позволяет наработать уступ в месте окончания расширенного интервала, что с технологической точки зрения облегчает процесс срезки, однако также требует выполнения не менее двух СПО на каждое ответвление (расширение, срезка с последующим бурением).

4. Использование ярусно-разветвленного типа профиля, с расположением ответвления на верхней части пласта (верхнем пропластке), а основного горизонтального ствола – в нижней части пласта (нижнем пропластке). Данное решение достаточно технологично, так как зарезка основного ствола из ответвления производится в субгоризонтальном участке. Способ может быть применен в массивных залежах, либо при отсутствии водонасыщенных интервалов между верхним и нижним пропластками. Также следует отметить, что большинство месторождений монопластовые, зачастую с подошвенной водой по большинству пластов. К тому же нефтенасыщенные интервалы (пласты) имеют ограниченную мощность, ввиду того данный способ имеет ограниченный характер применения.

5. Строительство РГС с использованием специализированного оборудования для формирования многоствольных стыков по 3–6 уровням классификации TAML. Данное оборудование и технологии их реализации являются высокотехнологичными и подразумевают кратное увеличение стоимости скважин в условиях месторождений Западной Сибири. В связи с этим данные технологии применимы на морских и шельфовых проектах, где затраты на них будут составлять незначительную долю от общих затрат на строительство скважины.

6. В целом известные технологии подразумевают либо существенное увеличение стоимости, либо выполнение множества СПО для минимизации рисков при строительстве РГС.

7. Также существуют иные решения, не отраженные в данной работе по причине отсутствия по ним открытых источников.

Таким образом, задача совершенствования технологии бурения РГС с тремя и более забоями является достаточно актуальной и востребованной нефтегазовой отраслью.

Выводы по главе 1

1. С точки зрения успешности реализации одним из технологически сложных процессов при строительстве РГС является зарезка ответвлений в ГУ по причине необходимости доведения требуемой нагрузки в условиях возрастания фактора трения и отсутствия технологической опоры для зарезки (клина-отклонителя, опорного цементного моста и т.д.), также актуальна проблема гарантированного попадания в требуемый ствол скважины при СПО в процессе бурения и крепления ствола. В условиях месторождений Западной Сибири (с нефтенасыщенными толщинами от 2-3 м) наиболее востребовано применение РГС, для которых характерны выше представленные проблемы. Поэтому вопрос оптимизации профилей РГС принят для дальнейшей проработки, как в части методики проектирования, так и технологии зарезки и бурения ответвлений.

2. Вместе с тем, опыт бурения РГС с тремя и более забоями ограничен, в том числе из-за технологической сложности проведения многочисленных зарезок ответвлений в горизонтальных участках в условиях пластов с незначительными нефтенасыщенными толщинами.

3. Установлена актуальность и необходимость совершенствования в части разработки методических основ обоснования количества ответвлений, расстояний между точками их зарезки, расположения забоев исходя из существующего уровня бурового оборудования и геологических условий залегания целевого пласта.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН

2.1. Постановка задачи

Для достижения поставленной цели, увеличения извлечения пластовых углеводородных флюидов повышением эффективности строительства разветвленных РГС с тремя и более забоями совершенствованием технологии их бурения, в работе применялась комплексная методика исследований расчетно-теоретического характера, включающая расчеты: интервалов стабилизации, набора и падения интенсивности кривизны профилей, в том числе локальных подъемов и падений; напряженного состояния бурильного инструмента; замеры фактических профилей скважин.

В зависимости от радиуса кривизны профили могут иметь интервалы набора и падения ЗУ с малыми (менее 30 м), средними (до 190 м) и большими (более 190 м) радиусами кривизны. Большому радиусу кривизны соответствует интенсивность искривления 3 °/10 м. Большинство ННС (более 95%) бурится с большим радиусом кривизны с интенсивность искривления 1...3 °/10 м. В строительстве ГС интенсивность на участке донабора ЗУ перед вскрытием продуктивного пласта может достигать до 5 °/10 м, но на практике такие величины ЗУ встречаются преимущественно при зарезке боковых стволов с горизонтальными окончаниями, для бурения которых используются компоновки меньшего диаметра.

При планировании скважин со сложными профилями необходимо производить оценку технической возможности их реализации. Так, большинство профилей ННС могут быть пробурены с использованием стандартного бурильного инструмента, по причине того, что инструмент имеет достаточный для этих условий запас прочности. В то же время при бурении скважин, имеющих протяженные ГУ (1200–1300 м и более), зачастую требуется применение специальных технико-технологических решений для снижения трения бурильного

инструмента как об горную породу, так и в интервале ранее спущенных и зацементированных колонн. В связи с тем, что РГС относятся к категории скважин со сложным профилем, и в них особенно высоки риски, такие как недохождение нагрузки на долото, в том числе при зарезке горизонтального ствола в открытом участке из ранее пробуренного ответвления.

Кроме того, требуется оценка соответствия пробуренных стволов РГС запланированному профилю. При этом необходима достаточно высокая точность инклинометрических измерений, что обуславливается достаточно близким залеганием основного ствола и ответвлений.

Ниже приведено краткое описание использованных в диссертационной работе методик экспериментальных исследований. Представленные далее методы исследований общеизвестны, не смотря на это, целесообразно их отражение в диссертационной работе.

2.2. Методы расчета профилей РГС

Алгоритм расчета и проектирование профилей ННС впервые были представлены в работах основоположников технологии направленного бурения: А.С. Бронзова, Ю.С. Васильева, А.М. Григоряна, М.П. Гулизаде (Азернефтемаш), А.Г. Калинина (ВНИИБТ). В дальнейшем методики проектирования профилей ННС и ГС плоскостного типа совершенствовались в работах специалистов отраслевых НИИ и ВУЗов (Т.О. Акбулатов, И.Л. Барский, В.Ю. Близнюков, А.З. Левицкий, А.Г. Калинин, Л.М. Левинсон, Г.С. Оганов, К.Н. Харламов, Г.Н. Шешукова и др.).

В зарубежной литературе для обозначения типов профилей применяются термины «тангенсальный», «S-образный» «J-образный» типы профилей (Рисунок 2.1), среди отечественных исследователей данные типы принято рассматривать обычно как трех- и четырехинтервальные наклонно-направленные, и пятиинтервальные с горизонтальным окончанием (Рисунок 2.2).

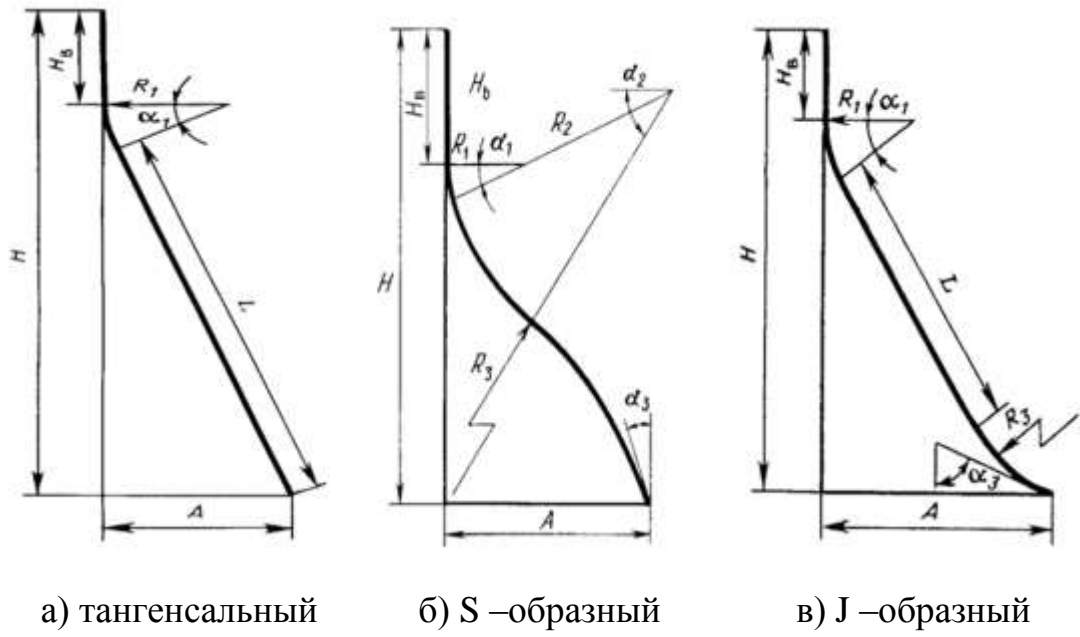


Рисунок 2.1 – Классификация скважин по типам профилей

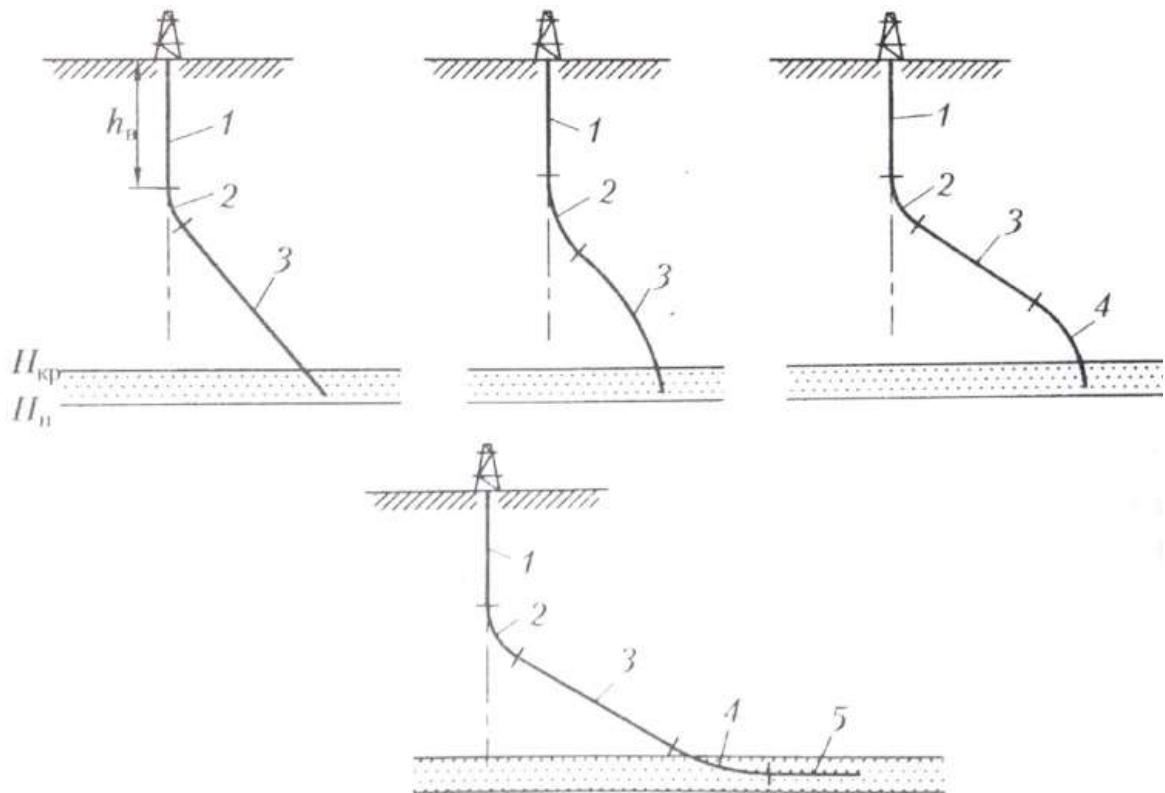


Рисунок 2.2 – Наиболее часто используемые типы профилей скважин

В диссертационной работе при выполнении расчетов профилей приняты формулы расчета участков стабилизации, набора, падения параметров кривизны, используемые при расчете профилей ГС, в частности, используемые в публикациях и образовательных программах кафедр «Бурение нефтяных и газовых скважин». Так, формулы расчета траектории разветвленных РГС (Таблица 2.1) приняты из традиционной методики расчета 3–, 4– интервального профиля ННС [77, 78] с тем отличием, что в ННС эти формулы используются для расчетов в вертикальной плоскости (Рисунок 2.3), а в РГС – в горизонтальной (Рисунок 2.4) [79].

Таблица 2.1 – Формулы для расчета профиля разветвленно-горизонтальных стволов с участком стабилизации [79]

Наименование интервала профиля РГС	Длина стволов РГС L_i , м	Проекция стволов РГС (относительно плоскости симметрии), м	
		«перпендикулярная плоскость» - величина разведения стволов, S_i , м	«параллельная» - проектное смещение вдоль азимута входа в пласт, A_i , м
1) прямолинейный направляющий интервал	$L_1 = A_1$	$S_1 = 0$	$A_1 = A_1$
2) интервал набора кривизны	$L_2 = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \gamma_2$	$S_2 = R_2 \cdot (1 - \cos \gamma_2)$	$A_2 = R_2 \cdot \sin \gamma_2$
3) интервал стабилизации	$L_3 = L - L_1 - L_2$	$S_3 = L_3 \cdot \sin \gamma_2$	$A_3 = L_3 \cdot \cos \gamma_2$
Итого	$L = L_1 + L_2 + L_3$	$S = 2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3)$	$A = A_1 + A_2 + A_3$
Примечания			
1. $R_2 = 57.3/i_2$ – радиус искривления в интервале набора кривизны, м.			
2. i_2 – интенсивность искривления в интервале набора кривизны, м.			
3. γ_2 – угол разведения стволов относительно плоскости симметрии, град.			

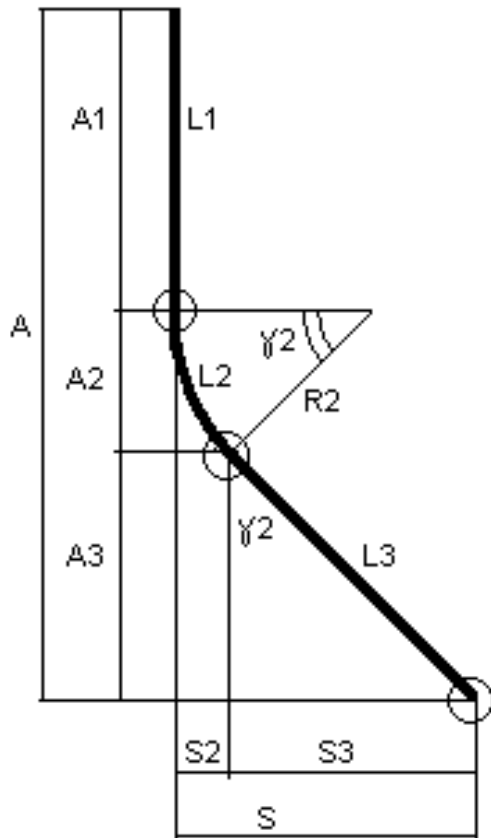


Рисунок 2.3 – Схема к расчету трехинтервального профиля с участком стабилизации (вертикальная плоскость) [79]

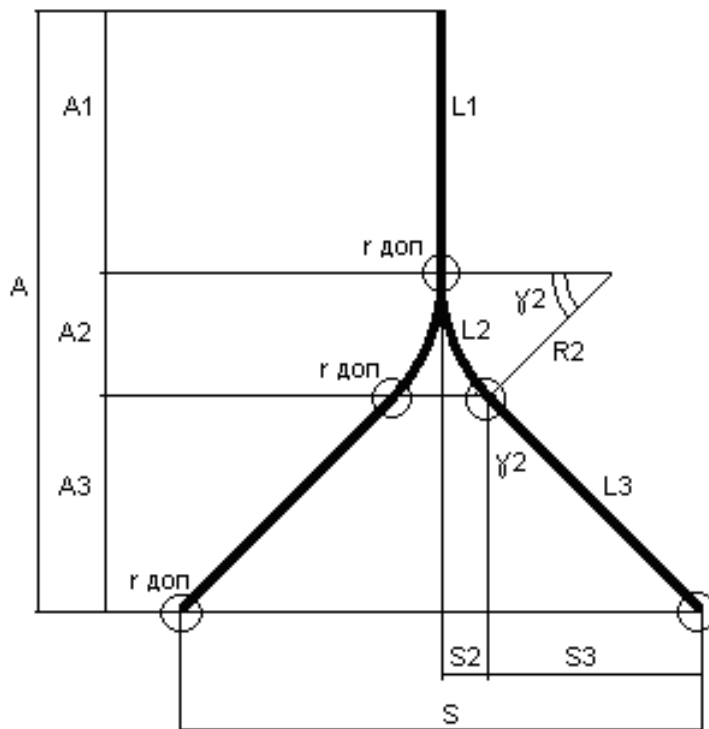


Рисунок 2.4 – Схема к расчету профиля разветвленно-горизонтальных стволов с участком стабилизации (горизонтальная плоскость) [79]

2.3. Методы оценки напряженного состояния бурильного инструмента

Существующие компьютерные программы для проектирования, моделирования отдельных процессов в строительстве скважин и выполнения инженерных расчетов зарубежных компаний (Halliburton «Landmark», Schlumberger «Drilling Office», ООО «Бурсофтпроект» и др.).

Поэтому для оценки устойчивости КНБК и расчетов напряжений, возникающих в бурильном инструменте, при выполнении различных технологических операций в интервале ГУ (СПО, бурение с забойными двигателями и роторным способом) применялось программное обеспечение фирмы Landmark, широко используемое при моделировании буровых процессов сервисными компаниями, проектными институтами и в учебном процессе ВУЗами.

2.4. Методы контроля траекторий РГС

В связи с применением в Западной Сибири кустового способа бурения наиболее широкое применение нашли отклоняющие компоновки. Известны три метода ориентирования отклоняющих КНБК: по магнитным меткам на трубах (прямые замеры), сбрасываемыми гироскопическими приборами (косвенный) и с применением забойных телеметрических систем (ЗТС) с гидравлическим или другим каналом связи. Из данных методов наиболее технологичным является использование ЗТС, по причине того, что в двух других методах необходимо вносить корректировку на величину угла закручивания бурильной колонны (под действием реактивного момента), процесс замера является более длительным, что увеличивает риск прихвата бурильного инструмента.

ЗТС обычно регистрируют следующие параметры:

- зенитный угол ствола скважины (наклон корпуса телесистемы);
- азимут ствола скважины (азимут корпуса телесистемы);
- азимут направления отклонения;
- угол установки двигателя-отклонителя.

Кроме того, в состав ЗТС могут быть включены специальные датчики, измеряющие осевую нагрузку и момент на долоте, частоту вращения долота (вала забойного двигателя), температуру на забое, забойное давление внутри и снаружи бурильной колонны.

Телесистема включает следующие узлы:

- забойный модуль с датчиком измерения параметров;
- источники питания;
- наземную аппаратуру;
- канал связи забойного модуля с забойной аппаратурой;
- технологическую оснастку.

Применяемые телесистемы подразделяются и отличаются друг от друга типом используемого канала связи забойного модуля с наземной аппаратурой: кабельный (ККС), гидравлический (ГКС) и электромагнитный каналы связи (ЭКС). Каждый из них связи имеет преимущества и недостатки, сравнительная характеристика данных способов передачи данных замеров ЗТС приведена в Таблице 2.2.

Для реализации в процессе бурения предложенных в работе технико-технологических и методических решений использовались телеметрические системы с гидравлическим каналом связи производства различных компаний (Weatherford, Baker Hughes и др.), фиксирующие траекторию РГС и подтверждающие возможность реализации предложенных решений. Методы замеров ЗУ и азимута с данными ЗТС общеизвестные и автоматизированы. Примеры ориентирования с помощью ЗТС приведены в [78].

Кроме ЗТС, возможно применение расширенного комплекса каротажа в процессе бурения (КПБ), включающего, кроме геонавигационного оборудования, минимум гамму-вставку и резистивиметр, максимум – комплекс датчиков, передающих максимальный объем геолого-технологической информации в режиме реального времени (естественное гамма-излучение горных пород, кажущееся сопротивление (КС) горных пород, сопротивление поляризации (ПС), электромагнитный каротаж, акустический каротаж и др.).

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика основных способов передачи информации от ЗТС на поверхность

Канал связи	Преимущества	Недостатки
Проводной электрический	<p>Высокая скорость передачи большого количества массива информации.</p> <p>Универсальность. Малый коэффициент затухания при использовании непрерывного кабеля. Отсутствие сложного забойного оборудования.</p>	<p>Высокая стоимость, проблема надёжности соединений, износ кабеля. Увеличение затрат времени на СПО.</p>
Электромагнитный	<p>Простота преобразования измеряемой величины в электрический сигнал.</p> <p>Высокая помехоустойчивость, отсутствие требований к уровню пульсаций давления промывочной жидкости.</p>	<p>Значительное затухание сигнала с увеличением глубины, зависящее от свойств породы (по Западной Сибири – возможно применение при бурении скважин на группу пластов «А»).</p> <p>Необходимость в забойном генераторе большой мощности. Отсутствие возможности работы в море.</p>
Гидравлический	<p>Простая система излучения и приема. Возможность использования на любой буровой установке без вмешательства в процесс бурения. Большая дальность передачи. Глубина использования более 12 000 м.</p>	<p>Низкая помехоустойчивость. Жесткие требования к качеству бурового раствора.</p>

Применение КПБ в совокупности с круглосуточным геолого-геофизическим сопровождением бурения с оперативной актуализацией секторных геолого-гидродинамических моделей (ГГДМ) позволяет увеличить удельную протяженность вскрытых проницаемых нефтенасыщенных интервалов

фильтрации пластового флюида в горизонтальном стволе (эффективную длину) с 50–60% до 75–85%. Применение КПБ при реализации предложенных в диссертационной работе решений по строительству РГС обусловлено необходимостью сопоставления полученных результатов с ГС.

Для возможности использования КПБ производства различных компаний требуется применение РГС следующей конструкции: эксплуатационная колонна диаметром 178 мм, в интервале продуктивного пласта хвостовик 114 мм. Данная конструкция применяется на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» с 2011 г., с ежегодным объемом бурения около 130–150 ГС.

2.5. Оценка эффективности бурения всех стволов РГС с использованием компоновки с неизменной «жесткостью»

В связи с тем, что бурение РГС экономически оправданно только при минимизации затрат, первоочередно необходимо сокращение безметражных работ. Поэтому была рассмотрена схема бурения РГС, при которой все стволы бурятся одной компоновкой без выполнения СПО.

В ходе исследований, с целью снижения затрат, рассмотрена технология бурения и зарезки ответвлений РГС из необсаженного открытого ствола с применением одной КНБК. Для этого выполнен анализ различных методов наработки желобов. В частности, в качестве базы рассмотрена предложенная М.Г. Григоряном технология наработки желоба с использованием компоновок, формирующих профиль нового ствола с интенсивностью большей, чем по ранее пробуренному стволу, за счет забуривания ответвления в направлении, противоположном наклону (кривизне) ранее пробуренного ствола. Данный метод подразумевает использование различных КНБК, соответственно, требует дополнительных СПО. Применительно к глубокозалегающим пластам месторождений Западной Сибири, исходя из экономической целесообразности, бурение всех стволов РГС необходимо осуществлять одной компоновкой без выполнения промежуточных СПО. Для этого случая было установлено изменение площади контакта вооружения долота с горной породой

наработанного уступа при зарезке нового ствола в противоположную сторону относительно направления кривизны предыдущего ствола, из условия бурения обоих стволов КНБК с неизменной «жесткостью» в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5.

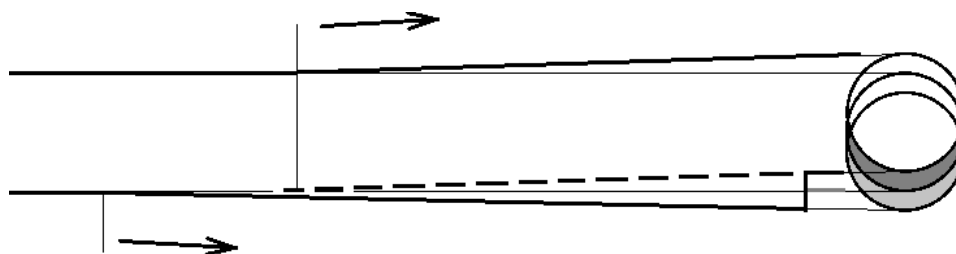


Рисунок 2.5 – Сравнение схем наработки «уступа» в прямолинейном ГУ и в ГУ с локальным поднятием профиля

При таком способе наработки желоба в открытом стволе, согласно расчетам, выполненным в соответствии с вариантами, представленными на рисунке 2.6, относительно варианта зарезки в прямолинейном ГУ площадь контакта долота с наработанным «уступом» по предложенной схеме увеличивается до двух раз. Это объясняется тем, что при локальном поднятии профиля и при наработке желоба используют одну и ту же КНБК (СПО не требуется) без изменения угла перекоса в забойном двигателе. При этом гравитационное положение отклонителя GTF (Gravity Tool Face) – угол между верхней точкой ствола и корпусом отклонителя КНБК – в двух рассматриваемых случаях отличается на 180° . В сравнении с наработкой желоба в прямолинейном ГУ, реализацию рассмотренного способа зарезки в РГС нового ствола можно выполнить при меньшей протяженности желоба, нарабатываемого в открытом стволе.

Рассчитаем изменение площади нарабатываемого уступа и сопоставим их для случаев, когда локальный подъем профиля отсутствует и присутствует (Рисунок 2.6).

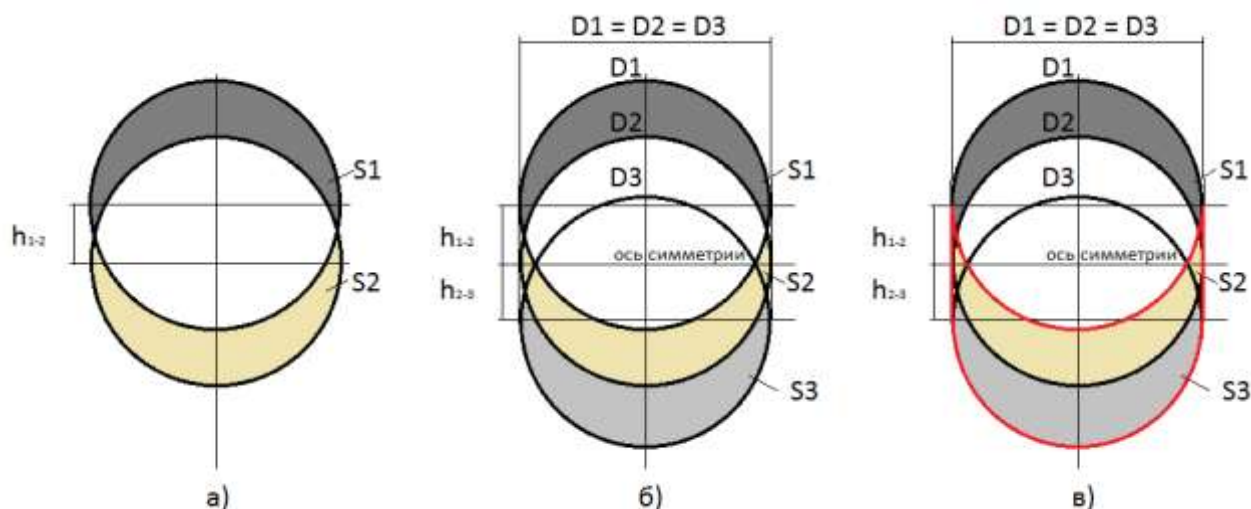


Рисунок 2.6 – Сопоставление площадей нарабатываемых уступов при различных способах резки: а, б – соответственно, с и без формирования локального подъёма профиля, в – площадь уступа, наработанного под вооружением долота (выделена красной линией)

При отсутствии локального подъема (Рисунок 2.6а) желоб нарабатывается в нижней стенке и при этом формируется уступ под вооружением долота площадью $S1$. В виду того, что диаметры изображенных на Рисунке 2.6а окружностей равны номинальному диаметру долота, площади $S1=S2$.

В случае формирования локального подъема профиля перед интервалом «резки» (Рисунок 2.6 б) пересекаться будут окружности с диаметрами $D1$ и $D3$. Введем между ними промежуточную окружность $D2$, имеющую равноудаленный центр от центров окружностей $D1$ и $D3$, как обозначено на Рисунке ($h_{1-2} = h_{2-3}$).

В случае резки на участке, близком к горизонтальному, как в случае резки без локального подъема (Рисунок 2.6а), так и с локальным подъемом (Рисунок 2.6б), «тяжелый» низ КНБК лежит на нижней стенке ствола скважины. При этом и при формировании локального подъема в профиле ответвления, и при срезке с него основного ствола, угол перекоса в гидравлическом забойном двигателе (ГЗД) остается одинаковым (СПО на смену угла перекоса не требуется), соответственно величины h_{1-2} и h_{2-3} равны.

Отметим, что относительно обозначенной на Рисунке 2.6б оси симметрии при равенстве величин h_{1-2} и h_{2-3} , а также диаметров изображенных окружностей имеем соответственно равные площади $S_1=S_3$. Учитывая, что $S_1=S_2$ (Рисунок 2.6а) получаем равенство $S_1=S_2=S_3$. На Рисунке 2.6в красным шрифтом выделена площадь сформированного уступа, близкая к сумме площадей S_3 и S_2 . Следовательно, эта площадь уступа (S_2+S_3 на Рисунке 2.6в) ориентировочно в два раза больше площади уступа, когда локальный подъем профиля перед интервалом зарезки отсутствует (эта площадь близка к площади S_2 , изображенной на Рисунке 2.6а).

При этом следует отметить, что в расчетах приняты номинальные диаметры скважин без учета фактической кавернозности, анизотропии и переслаивания пород разной устойчивости, а также в связи с возможным отклонением до 20 % фактической интенсивности набора кривизны от расчетной, определенной геометрическим путем и без учета гравитационной составляющей (провисания компоновки при формировании локального подъема профиля), расположения КНБК на нижней стенке «открытого» ствола, а также других факторов [78]. С учетом данных факторов более корректным будет утверждение: при донаторе ЗУ на $2-5^\circ$, с формированием в интервале зарезки локального подъема профиля ответвления протяженностью от 10–20 м, до двух раз увеличивается площадь контакта вооружения долота с горной породой в наработанном уступе.

С учетом того, что при использовании традиционных для бурения ГС КНБК для формирования локального подъема и наработки желоба с уступом обычно достаточно 10-20 м проходки, было установлено [91], что для реализации предложенного способа в интервалах зарезки ответвлений (на 20 м выше и на 20 м ниже по стволу) требуется вертикальный коридор не менее $\pm 1,5$ м (для остальных участков горизонтального ствола $\pm 0,7$ м). Следовательно, рассматриваемый метод зарезки ствола в РГС может использоваться при нефтенасыщенных толщинах от 3 м и более, характерных для большинства месторождений Западной Сибири.

Выводы по главе 2

1. Таким образом, применительно к месторождениям Западной Сибири бурение всех стволов РГС необходимо осуществлять одной компоновкой без выполнения промежуточных СПО.

2. Установлено, что в процессе бурения и зарезки стволов РГС с использованием одной КНБК постоянной «жесткости» площадь контакта вооружения долота с горной породой в нарабатываемом уступе увеличивается до двух раз, в случае применения специального профиля с локальным подъемом траектории открытого ствола и зарезки в нем ответвления с ЗУ.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИ РЕАЛИЗУЕМОЙ КОНФИГУРАЦИИ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МНОГОЗАБОЙНОЙ СКВАЖИНЫ

3.1. Постановка задачи

Реализация поставленной в работе цели требует обоснования:

- критериев оперативной оценки технологичности профилей РГС;
- методики определения технически допустимой конфигурации, разветвленной РГС (максимального технически возможного количества забоев, минимально технически допустимых расстояний между точками зарезки ответвлений, допустимой области заложения забоев разветвленно-горизонтальных ответвлений), определяемой из существующих геолого-технических ограничений.

Кроме технико-технологических решений для повышения эффективности строительства РГС должны выполняться методические решения, такие как:

- поэтапное совершенствование профилей из условия обеспечения их технологичности с точки зрения бурения. Основой данного подхода являются критерии оперативной оценки технологичности («сложности») профилей РГС и метод оперативной оценки их основных параметров;
- обоснование минимально требуемой длины ответвления из условия ее заложения в области пласта, с минимальной интерференцией с основным горизонтальным стволом РГС и соседними ответвлениями;
- оптимальное расположение забоев ответвлений РГС относительно соседних скважин, исходя из условия равномерного дренирования пласта и минимального воздействия скважин друг на друга.

3.2. Совершенствование профилей РГС на различных фазах проектирования развития активов (месторождений)

Как уже отмечалась в главе 1, основная проблема связана с продолжительностью наработки желоба в открытом (не обсаженном) участке

ствола и дальнейшей зарезкой нового ГУ, что связано со сложностью доведения стабильной нагрузки на долото – при сложном профиле в процессе зарезки ответвления происходит «зависание» бурильной компоновки и ее последующий срыв с наработанного «уступа» при увеличении нагрузки. Данная проблема обусловлена сочетанием таких факторов как повышенное трение при сложном профиле, недостаточная устойчивость бурильной колонны и необходимость набора кривизны в интервале зарезки ответвлений, сложность профиля РГС из-за недостаточного смещения от устья до точки вскрытия целевого пласта, нахождения окончательных забоев в «непредпочтительной» (с технологической точки зрения) «области» бурения из-за высоких рисков получения осложнений [80].

Для повышения эффективности проводки РГС предложен и реализован алгоритм, предусматривающий поэтапную оптимизацию профилей скважин и, исходя из этого, обоснованное применение эффективных и экономически оправданных технико-технологических решений (Таблица 3.1).

При реализации данного алгоритма применяются следующие подходы:

- с теоретической точки зрения профиля скважин разделены на два условных категории: тип 1 («нормальный» профиль) – успешно реализуемый с использованием типового для бурения ГС бурильного инструмента, тип 2 («сложный» профиль) – технически не реализуемый, либо реализуемый со значительным непроизводительным временем при использовании типового для бурения ГС бурильного инструмента.

- в рамках этапа 1, как один из методов оперативной оценки «сложности» профилей РГС, применяется перечень критериев (граничных условий) (Таблица 3.2). Если профиль РГС не соответствует критериям «оптимальности», то по такому профилю, вероятнее всего, можно пробурить только используя нестандартные и дорогостоящие бурильный инструмент, и технологические решения [80]. С учетом этих критериев возможна более точная оценка инвестиций на реализацию проекта по разбурированию куста (залежи) с применением РГС;

Таблица 3.1 – Этапы оптимизации профилей и технологии строительства РГС [80]

Этап	Цель этапа	Содержание работ
1. Разработка проектно-технологического документа на разработку (ПТД) месторождения и проекта его обустройства.	Оптимизация количества и мест заложения кустовых оснований и проектных целей в сетке разбуривания, оптимальных с точки зрения реализации технологии строительства РГС.	Оптимизация заложения РГС (исходя из технических возможностей бурового оборудования) и кустования (определение координат заложения кустовых оснований, с которых возможно бурение РГС с профилями 1-го типа).
2. Оптимизация очередности бурения и профилей скважин по кусту - из отсыпанных кустовых оснований перед монтажом буровой установки (БУ).	Оптимизация профилей РГС, исходя из фактической отсыпки кустового основания и оснащённости буровой подрядчика, при необходимости смещение координат забоев скважин.	Первоочередно закладываются профили более сложных скважин, далее - "подстраиваются" профили менее сложных (в порядке убывания сложности - многоствольные, многозабойные, с большой протяжённостью ГУ, типовые ГС, ННС).
3. Оптимизация технологии строительства конкретной скважины (перед началом ее бурения).	Выбор технико-технологических решений для безаварийного строительства РГС на проектные цели.	В случае отсутствия возможности применения типового бурильного инструмента с "оптимизированным" профилем, для бурения РГС закладывают более сложные технологические решения.

Таблица 3.2 – Критерии для выбора РГС с профилем 1-го типа [80]

Критерий		Диапазон оптимальных значений	
		min	max
Критерии выбора скважины (проектных целей)			
Смещение на точку вскрытия пласта Т1, м	Глубина по вертикали 1800 м	600	1700
	Глубина по вертикали 2300 м	650	2300
	Глубина по вертикали 2800 м	700	2900
	Глубина по вертикали 3300 м	750	3500
Отклонение азимута ГУ в точке резки ответвления относительно азимута участка стабилизации в наклонно-направленном (не горизонтальном) участке ствола, град.		-(90...100)°	+(90...100)°
Примечание – При соответствии данным критериям профиль РГС принимается как технологичный с точки зрения процесса бурения (тип 1). При несоответствии параметров профиля РГС данным критериям профиль считается технологически «сложно» реализуемым (тип 2) и для его реализации требуются нестандартные технико-технологические решения..			

- этап 2 – наиболее часто встречается на практике, поскольку, исходя из накопленных знаний в процессе разбуривания куста, может изменяться и стратегия разбуривания залежи. В рамках данного этапа, в некоторых случаях, возможно изменение очередности бурения, назначения скважин, способа их заканчивания – как из условий облегчения строительства РГС, так и получения более точной геологической информации. На данном этапе существует возможность изменения устья (очередности на кусту) и участка залежи для бурения РГС из условия обеспечения «удобного» с технологической точки зрения профиля скважины;

- этап 3 выполняется перед началом бурения конкретной РГС. При этом учитывается весь комплекс исходных данных, в том числе оптимизированных на предыдущих этапах. В рамках данного этапа применяется методика подбора координат забоев, разветвленных РГС, представленная в разделе 3.8, с учетом которых выполняется индивидуальный подбор бурильного инструмента и других технико-технологических решений. Для оптимизации профилей РГС 2-го типа возможно, как смещение координат и изменение азимута ствола на забоях скважины и на точке входа в пласт, так и рассмотрение варианта бурения скважины из соседних кустовых площадок, либо переноса многозабойного бурения на последующие скважины.

Все этапы предусматривают тесное взаимодействие специалистов из смежных областей: геологов, разработчиков, добытчиков, буровиков, маркшейдеров и других. При этом для качественного планирования многозабойного бурения (особенно для скважин с тремя и более забоями) необходимы:

- методы определения основных параметров профиля РГС при выборе скважин-кандидатов под технологию специалистами-разработчиками – как при формировании системы разработки месторождения (на этапе 1), так и на оперативном уровне (на этапах 2 и 3);

- оценка влияния различных факторов, от которых зависит форма профилей РГС, что важно для специалистов-буровиков на стадии планирования буровых

работ, как с точки зрения проектирования профилей, так и выбора типа бурового инструмента (преимущественно на этапе 3).

3.3. Обоснование «критериев» (показателей) технологичности («сложности») профиля РГС

В Таблице 3.2 представлены граничные значения принятых «критериев» (показателей) технологичности при оперативной оценке профиля РГС для случая применения компоновки с винтовым забойным двигателем.

Критерий – смещение точки вскрытия продуктивного пласта. Анализ успешности выполнения срезок в РГС из ответвлений в «основной» горизонтальный ствол свидетельствует, что при достаточном смещении начала ГУ (точки T_1) от устья скважины в $\frac{3}{4}$ случаев они проходят без осложнений (Рисунок 3.1). Рекомендуется минимальное смещение точки T_1 определять исходя из принципа исключения «ухода профиля под себя» (с ЗУ $10-15^\circ$ на участке стабилизации наклонно-направленного участка профиля), обеспечивая при этом более равномерное доведение нагрузки на долото и улучшая процесс «срезки». При достаточном смещении начала ГУ продолжительность «срезок» может быть сокращена до двух раз (Рисунок 3.1), а доля успешных срезок увеличивается с 15% до 75% (Рисунок 3.2) [91].

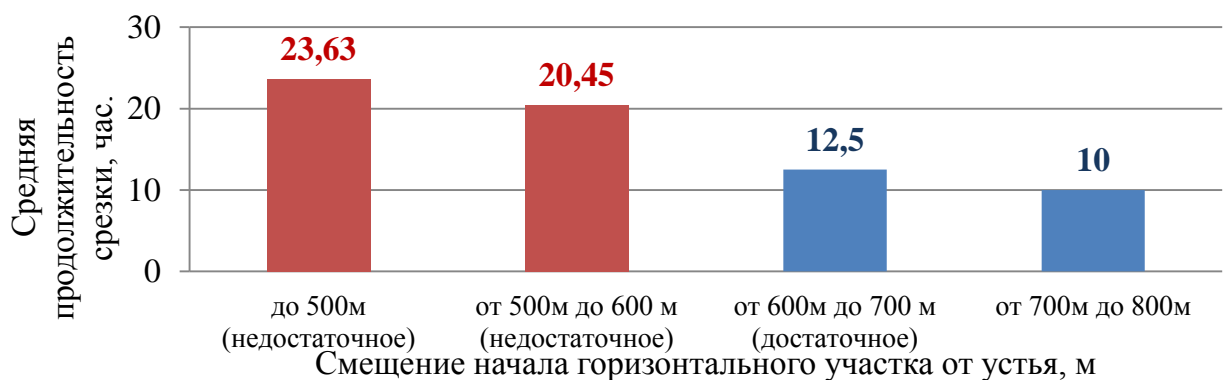


Рисунок 3.1 – Влияние удаленности точки T_1 от устья скважины на продолжительность срезок в РГС (на примере группы пластов АВ)

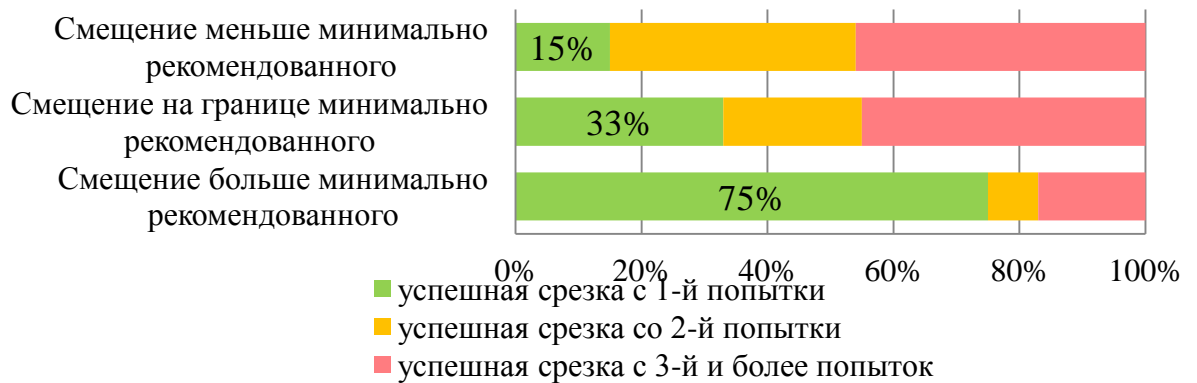


Рисунок 3.2 – Влияние удаленности точки T_1 от устья скважины на успешность срезок в РГС

Следующий **критерий - разворот горизонтального участка по азимуту** (ниже точки T_1) относительно первоначального азимута бурения транспортного участка ствола (до точки T_1). Схема для расчетов представлена на Рисунке 3.3, результаты расчетов – на Рисунке 3.4. Видно, что при отклонении ГУ от первоначального азимута до $90-100^\circ$ практически не изменяются напряжения в бурильном инструменте, возникающие в процессе проводки ствола, что обуславливается несущественным влиянием при таком профиле фактора трения и, как следствие, режим наработки желоба и зарезки нового ствола в ГУ является более технологичным, чем при большем азимуте разворота профиля.

Если после корректировки профиль РГС не соответствует предложенным критериям «оптимальности» (профиль 1-го типа), тогда необходимо рассматривать нестандартные технико-технологические решения, позволяющие обеспечить доведение и равномерную подачу требуемой нагрузки на долото в процессе зарезки ответвления. Следует подчеркнуть, что указанные критерии являются оценочными и должны в первую очередь применяться для ранжирования РГС по технологичности («сложности») реализации их профилей.

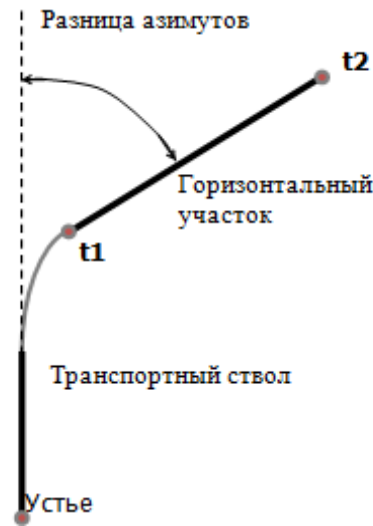


Рисунок 3.3 – Расчетная схема для оценки влияния разворота профиля основного ствола РГС на режим его бурения

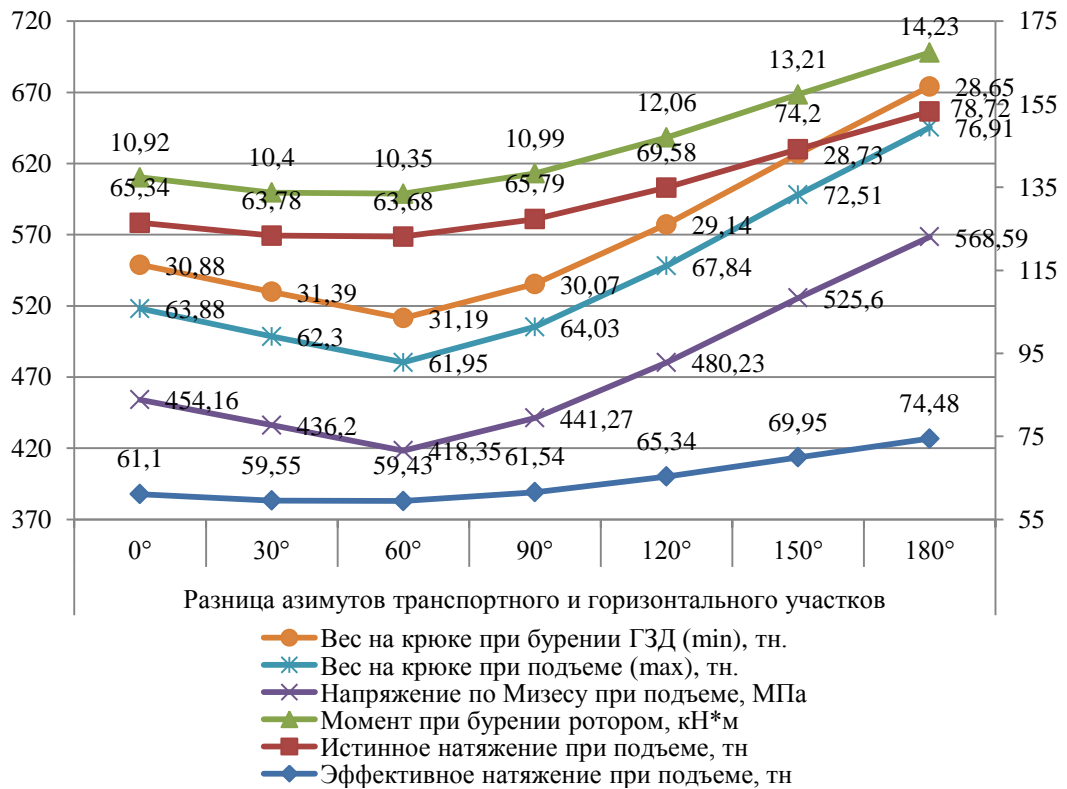


Рисунок 3.4 – Зависимость напряжений, возникающих в бурильном инструменте при бурении ГУ под хвостовик, от величины разницы азимутального направления бурения транспортного и ГУ профиля

3.4. Методы оперативной оценки основных параметров профиля разветвленной РГС

Перед началом проектирования РГС должны быть определены основные параметры профиля скважины: длина основного ГУ, количество забоев, расстояние между стволами. На основании этих данных определяются координаты значимых точек профиля РГС в интервале продуктивного пласта (начало и окончание основного ствола, боковых ответвлений) и с применением актуализированных ГГДМ оценивается дебит скважины.

Далее представлены основные подходы [80], которые были выработаны в рамках выполнения диссертационной работы и могут быть использованы при определении исходных данных для проектирования РГС.

В главе 1 РГС были сгруппированы по типам профилей: наклонные, пологие, горизонтально-восходящие, разветвленные, ярусные и ярусно-разветвленные. Наиболее сложными как с точки зрения планирования профилей, так и дальнейшей их реализации являются разветвленные и горизонтально-восходящие типы профилей РГС. В общем случае, профиль РГС с разветвленно-горизонтальными окончаниями (Рисунок 3.5), может иметь две схемы реализации: в первом случае – участки «стабилизации» основного ствола не совпадают с осью симметрии РГС, проходящей через линию t_1-t_2 (Рисунок 3.6а), во втором – совпадают (Рисунок 3.6б).

Как видно из рисунка 3.6, при одинаковых величинах длин участков стабилизации и интенсивностей на участках набора кривизны, по первой схеме длина элементарного (типового) звена РГС с одним ответвлением будет наименьшей. Это объясняется тем, что в первом варианте (Рисунок 3.6а) один из участков стабилизации располагается по азимуту бурения предыдущего интервала набора кривизны, а во втором варианте (Рисунок 3.6б) участки стабилизации располагаются в направлении к окончательному забою (цели t_2), вследствие чего перед каждым интервалом стабилизации необходима корректировка набратного азимута и возврат к азимуту на цель t_2 , вследствие чего протяженность участков набора кривизны увеличивается.

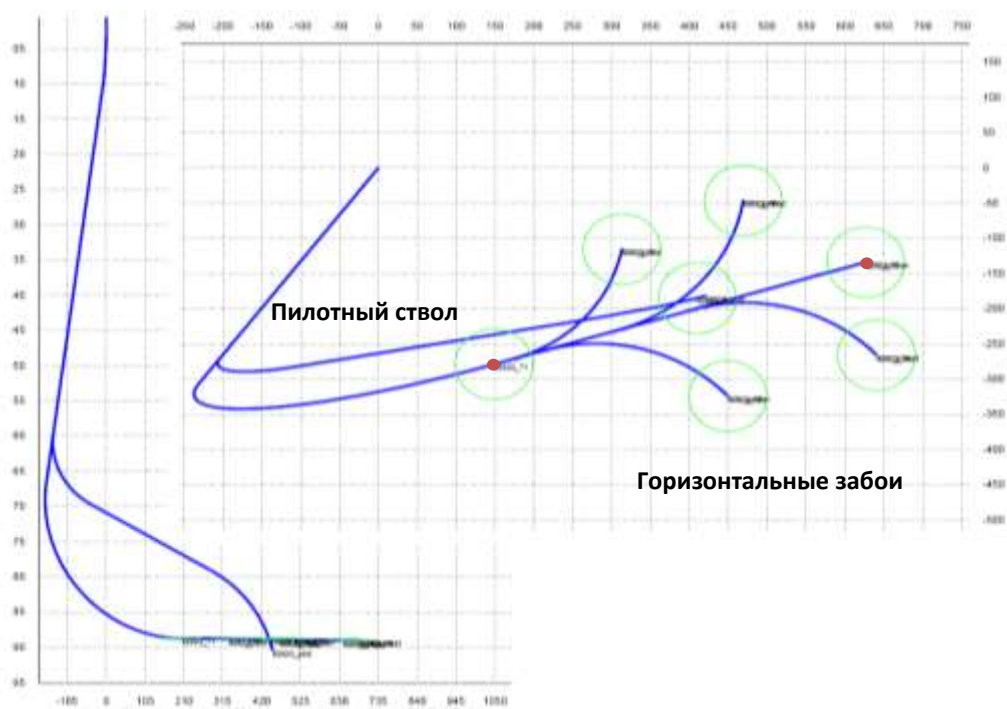
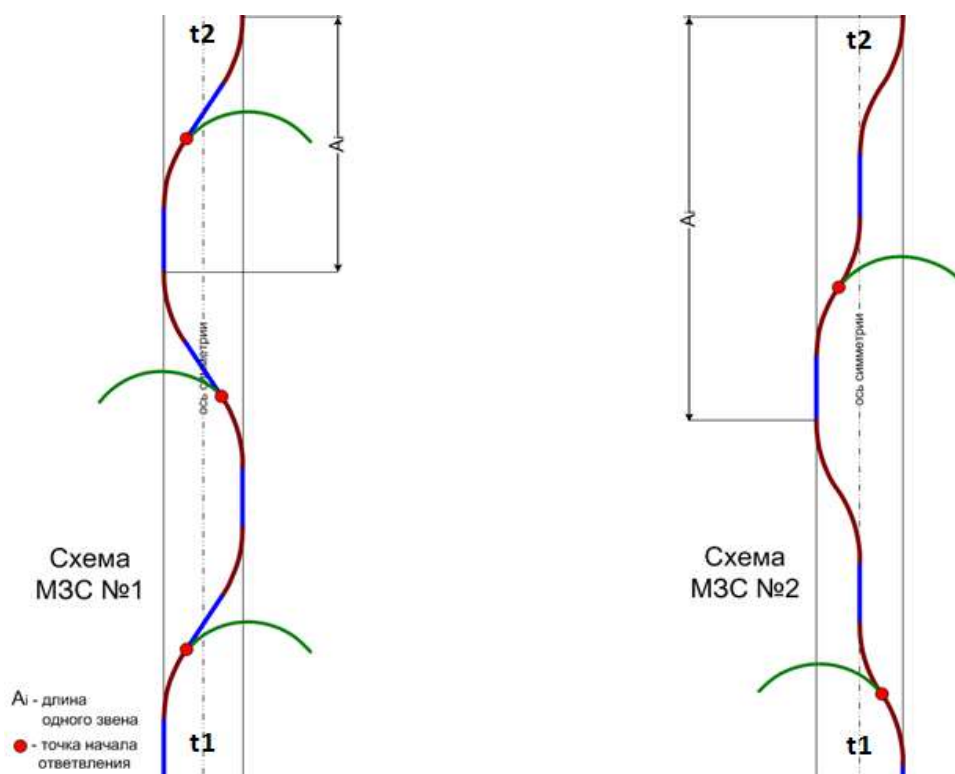


Рисунок 3.5 – Пример пятизабойной РГС со сложным профилем (вид сверху и проекция на вертикальную плоскость)



а) участок «стабилизации» основного ствола не совпадает с осью симметрии РГС

б) участок «стабилизации» основного ствола совпадает с осью симметрии РГС

Рисунок 3.6 – Схемы профиля РГС (горизонтальная плоскость)

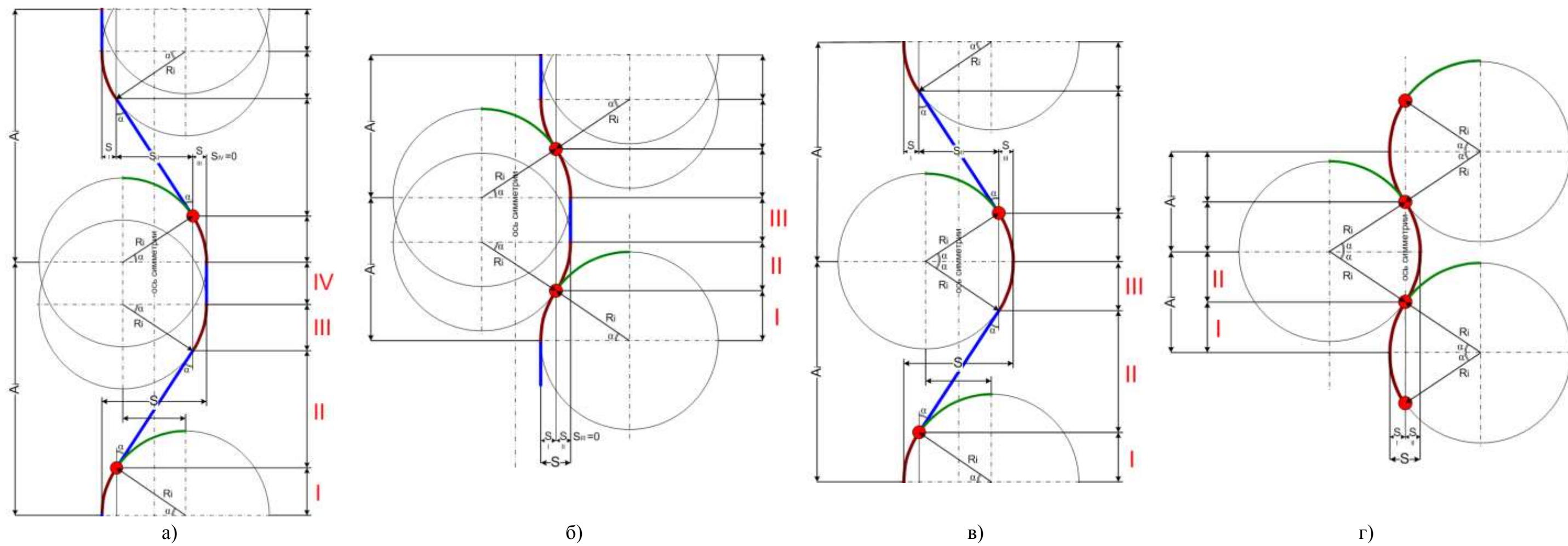
Следовательно, при ограниченной длине горизонтального участка строительство РГС с наибольшим количеством ответвлений, заменяющей одну ГС, предпочтительно по первой схеме (Рисунок 3.6а). При этом типовое звено РГС может быть 2–, 3– и 4–интервальным (Рисунок 3.7) [80].

Для мониторинга успешности зарезок ответвлений в профиле РГС необходимо наличие участков стабилизации, минимальная длина которых должна быть 15–35 м (больше зоны «непромера» ЗГС, составляющей 5–25 м). Этим условиям соответствует первый вариант типового звена РГС, в котором чередуются участки набора кривизны и стабилизации (Рисунок 3.7а) – он был принят в качестве основы в последующих расчетах.

Кроме этого, к профилям боковых ответвлений РГС должны предъявляться следующие требования:

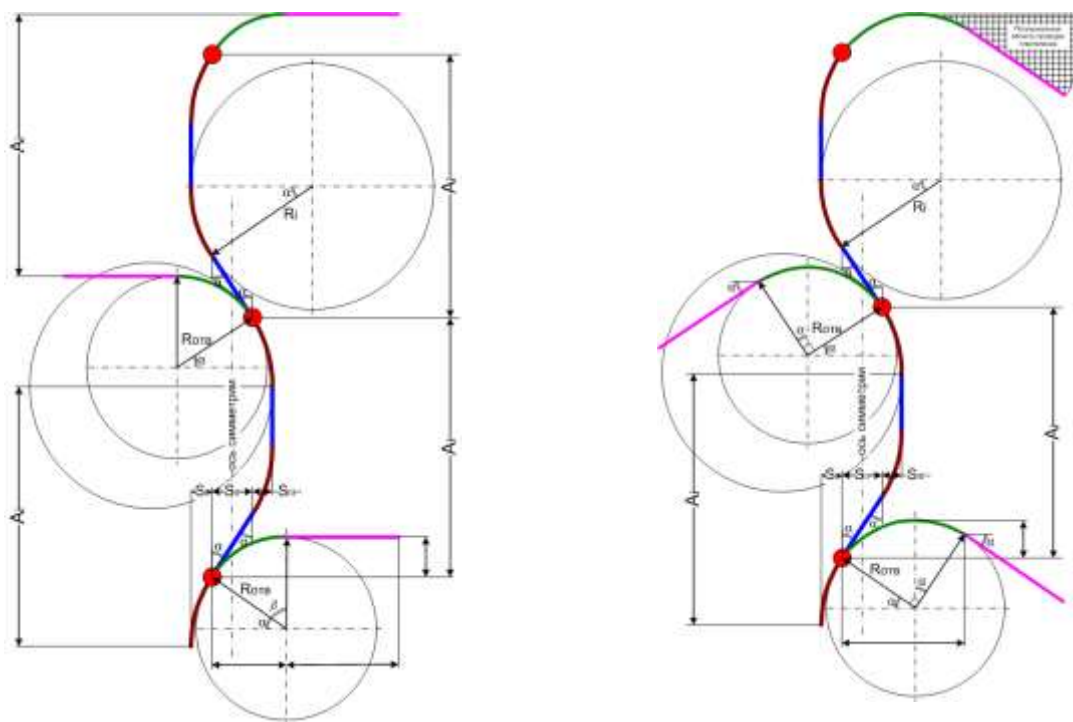
- минимизация интерференции между основным стволом, соседними ответвлениями, а также соседними скважинами;
- вскрытие бурением участков с лучшими фильтрационно-емкостными свойствами;
- техническая возможность их проводки.

Существуют две схемы, позволяющие обеспечить максимальное удаление бокового ствола РГС от основного – это проводка ответвления перпендикулярно участку стабилизации [31, 79, 80], пробуренному параллельно оси симметрии (Рисунок 3.8а), либо пересекающего ее (Рисунок 3.8б). Так как разница между азимутальными направлениями участков стабилизации незначительна (при величине $\alpha = 3...10^\circ$), то профили боковых стволов по этим двум вариантам будут практически совпадать. При проводке ответвления предпочтительно его нахождение в «коридоре бурения» этих двух вариантов, с целью максимального удаления от основного ствола.



- а) четырехинтервальный профиль типового звена РГС (вариант 1)
 б) трехинтервальный профиль типового звена РГС (вариант 2)
 в) трехинтервальный профиль типового звена РГС (вариант 3)
 г) двухинтервальный профиль типового звена РГС (вариант 4)

Рисунок 3.7 – Горизонтальные проекции возможных вариантов профиля типового звена в основном стволе РГС



а) вариант 1

б) вариант 2

Рисунок 3.8– Расчетные схемы профиля ответвления РГС

Согласно приведенной на Рисунке 3.9 схемы, основной ствол разветвленной РГС условно может быть условно разделен на характерные «звенья» [29, 80]:

- начальное звено основного ствола РГС (от точки t_1 профиля до первого типового звена РГС);
- типовое звено РГС с ответвлением (начинается с интервала набора кривизны и завершается участком стабилизации, параллельным оси симметрии);
- конечное звено основного ствола РГС (от последнего типового звена РГС до точки t_2 профиля).

С целью определения методов оперативной оценки основных параметров профиля РГС был выполнен комплекс расчетов для ее типовых звеньев, сводные результаты по которым представлены в Таблице 3.3.

В качестве исходных расчетных данных были приняты следующие показатели и диапазоны их значений:

- длина участков стабилизации $l_{стаб} = 15 \dots 100$ м;

- разница между азимутальными направлениями участков стабилизации, расположенных перед участком срезки и после него, $\alpha = (1,5 \dots 10)^\circ$;

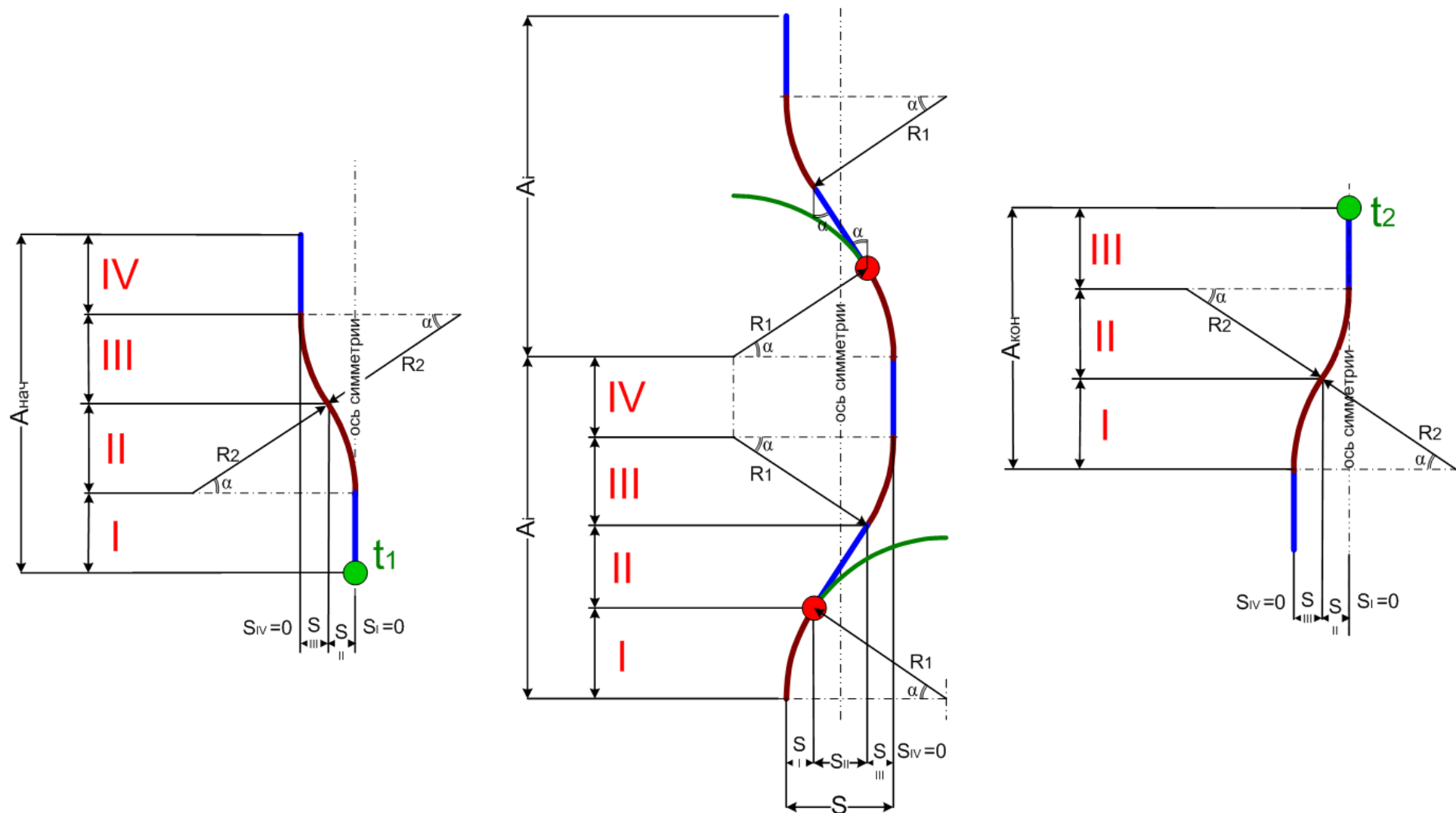
- интенсивность набора кривизны в азимутальной (горизонтальной) плоскости $i = (1 \dots 3)^\circ/10 \text{ м}$.

Таблица 3.3 – Результаты расчета профиля основного ствола РГС с четырехинтервальным типовым звеном [29, 80]

$l_{\text{стаб}}$, м	α , град	i_{min} , град	Параметры 4-интервального (начального и типового) звена РГС, м			Параметры 3-интервального (конечного) звена РГС, м		
			L	S	A	L	S	A
15	10	6,67	60	5,2	59,6–60,0	45	2,6	44,8–45,0
	8	5,33		4,2			2,1	
	5	3,33		2,6			1,3	
	3	2,00		1,6			0,8	
	1,5	1,00		0,8			0,4	
25	10	4,00	100	8,7	99,3–100,0	75	4,3	74,7–75,0
	8	3,20		7,0			3,5	
	5	2,00		4,4			2,2	
	3	1,20		2,6			1,3	
	1,5	0,60		1,3			0,7	
35	10	2,87	140	12,1	138,9–139,8	105	6,1	104,3–104,8
	8	2,29		9,7			4,9	
	5	1,43		6,1			3,0	
	3	0,86		3,7			1,	
	1,5	0,43		1,8			0,9	
50	10	2,00	200	17,4	198,7–200,0	150	8,7	149,5–150,0
	8	1,60		13,9			7,0	
	5	1,00		8,7			4,4	
	3	0,60		5,2			2,6	
	1,5	0,30		2,6			1,3	
100	10	1,00	400	34,8	397,5–400,0	300	17,4	299,0–300,0
	8	0,80		27,8			13,9	
	5	0,50		17,4			8,7	
	3	0,30		10,5			5,2	
	1,5	0,15		5,2			2,6	

Примечания

1. L - длина по стволу, S - смещение относительно основного ствола, A - проекция бокового ответвления на основной ствол (Рисунок 4.5).
2. полужирным курсивом выделены варианты, соответствующие или близкие к исходным данным.
3. i_{min} - интенсивность искривления в начальном и конечном звеньях основного ствола РГС.



а) начальное звено основного ствола

б) типовое звено основного ствола

в) конечное звено основного ствола

Рисунок 3.9 – Горизонтальная проекция профиля РГС с четырехинтервальным типовым звеном [29, 80]

Для расчета профилей звеньев основного ствола РГС (Рисунок 3.9) получены формулы (таблицы 3.4–3.6) [29] исходя из условия, что РГС имеет «плоский» профиль. Данное допущение не вносит значимую погрешность ввиду незначительного изменения положения ствола и ответвлений РГС по вертикали (колебание 0,7...1,5 м) относительно простирания ответвлений по простиранию пласта (сотни метров). В качестве основы для расчетов профилей типовых «звеньев» РГС использована методика расчета плоского профиля, имеющего участки стабилизации и набора кривизны (Таблица 2.1).

Таблица 3.4 – Формулы расчета начального звена основного ствола РГС

Наименование интервала профиля РГС	Длина интервалов РГС L_i , м	Проекция основного ствола РГС (относительно плоскости симметрии), м	
		«перпендикулярная плоскость» - величина отклонения ствола от оси симметрии, S_i , м	«параллельная» - проектное смещение вдоль оси симметрии РГС, A_i , м
1) прямолинейный направляющий интервал	$L_{нач1} = l_{стаб}$	$S_{нач1} = 0$	$A_{нач1} = l_{стаб}$
2) первый интервал набора кривизны	$L_{нач2} = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \alpha$	$S_{нач2} = R_2 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_{нач2} = R_2 \cdot \sin \alpha$
3) второй интервал набора кривизны	$L_{нач3} = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \alpha$	$S_{нач3} = R_2 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_{нач3} = R_2 \cdot \sin \alpha$
4) интервал стабилизации	$L_{нач4} = l_{стаб}$	$S_{нач4} = 0$	$A_{нач4} = l_{стаб}$
Итого по начальному звену основного ствола РГС	$L_{нач} = L_{нач1} + L_{нач2} + L_{нач3} + L_{нач4}$	$S_{нач} = S_{нач1} + S_{нач2} + S_{нач3} + S_{нач4}$	$A_{нач} = A_{нач1} + A_{нач2} + A_{нач3} + A_{нач4}$
Примечания			
1. $R_2 = 57.3/i_2$ – радиус искривления в интервале набора кривизны начального и конечного звеньев основного ствола РГС, м.			
2. i_2 – интенсивность искривления в интервале набора кривизны начального и конечного звеньев основного ствола РГС, м.			

Таблица 3.5 – Формулы расчета типового звена основного ствола РГС

Наименование интервала профиля РГС	Длина интервалов РГС L_i , м	Проекция основного ствола РГС (относительно плоскости симметрии), м	
		«перпендикулярная плоскость» - величина отклонения ствола от оси симметрии, S_i , м	«параллельная» - проектное смещение вдоль оси симметрии РГС, A_i , м
1) первый интервал набора кривизны (до точки срезки)	$L_1 = 0.01745 \cdot R_1 \cdot \alpha$	$S_1 = R_1 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_1 = R_1 \cdot \sin \alpha$
2) интервал стабилизации	$L_2 = l_{стаб(\alpha)}$	$S_2 = l_{стаб(\alpha)} \cdot \sin \alpha$	$A_2 = l_{стаб(\alpha)} \cdot \cos \alpha$
3) второй интервал набора кривизны	$L_3 = 0.01745 \cdot R_1 \cdot \alpha$	$S_3 = R_1 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_3 = R_1 \cdot \sin \alpha$
4) прямолинейный направляющий интервал	$L_4 = A_4 = l_{стаб}$	$S_4 = 0$	$A_4 = l_{стаб}$
Итого по типовому звену основного ствола РГС	$L_{звена} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$	$S_{звена} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$	$A_{звена} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$
<p>Примечания</p> <ol style="list-style-type: none"> $R_1 = 57.3/i_1$ – радиус искривления в интервале набора кривизны типового звена основного ствола РГС, м. i_1 – интенсивность искривления в интервале набора кривизны типового звена основного ствола РГС, м. α – разница между азимутальными направлениями участков стабилизации, расположенных перед участком срезки и после него, град. $l_{стаб}$, $l_{стаб(\alpha)}$ - длины участков стабилизации профиля, соответственно, параллельных оси симметрии профиля и пересекающих ее, м. 			

Таблица 3.6 – Формулы расчета конечного звена основного ствола РГС

Наименование интервала профиля РГС	Длина интервалов РГС L_i , м	Проекция основного ствола РГС (относительно плоскости симметрии), м	
		«перпендикулярная плоскость» - величина отклонения ствола от оси симметрии, S_i , м	«параллельная» - проектное смещение вдоль оси симметрии РГС, A_i , м
1) первый интервал набора кривизны	$L_{кон1} = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \alpha$	$S_{кон1} = R_2 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_{кон1} = R_2 \cdot \sin \alpha$
2) второй интервал набора кривизны	$L_{кон2} = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \alpha$	$S_{кон2} = R_2 \cdot (1 - \cos \alpha)$	$A_{кон2} = R_2 \cdot \sin \alpha$
3) прямолинейный направляющий интервал	$L_{кон3} \geq l_{стаб}$	$S_{кон3} = 0$	$A_{кон3} \geq l_{стаб}$
Итого по конечному звену основного ствола РГС	$L_{кон} = L_{кон1} + L_{кон2} + L_{кон3}$	$S_{кон} = S_{кон1} + S_{кон2} + S_{кон3}$	$A_{кон} = A_{кон1} + A_{кон2} + A_{кон3}$

В Таблице 3.3 также указана интенсивность искривления в начальном и конечном звеньях основного ствола РГС i_{\min} . Как видно, она не полностью соответствует диапазону принятой интенсивности набора кривизны i

Целесообразность определения i_{\min} заключается в следующем. Для бурения РГС одной компоновкой предпочтительно, чтобы интенсивность искривления на всех участках профиля (Рисунок 3.7) была реализуема без изменения угла перекоса в ГЗД (без подъема КНБК на роторную площадку), то есть должно быть реализуемые как начальное, типовое и конечное звенья основного ствола РГС (Рисунок 3.9) и выполняться условие:

$$i_{\min} = i \quad (3.1)$$

где i_{\min} - интенсивность искривления в начальном и конечном звеньях основного ствола РГС;

i - интенсивность в типовом звене РГС.

Физический смысл i_{\min} заключается в определении возможности бурения РГС со значительным отклонением основного ствола от прямолинейной траектории (в зависимости от величины α) с характеристик используемой КНБК ($l_{\text{стаб}(\alpha)}$). Определим эту зависимость.

Для того, чтобы обеспечить азимутальную интенсивность искривления в начальном и конечном звеньях, меньшую чем в типовом звене РГС, должно выполняться условие (Рисунок 3.9):

$$\begin{cases} S_{\text{нач1}} \leq S_2/2 \\ S_{\text{кон2}} \leq S_2/2 \end{cases} \quad (3.2)$$

Подставив из таблиц 3.7–3.9 соответствующие выражения и преобразовав выражения (3.3) и (3.4), получим выражение (3.5):

$$R_2 \cdot (1 - \cos \alpha) \leq \frac{l_{\text{стаб}(\alpha)} \cdot \sin \alpha}{2} \quad (3.3)$$

$$\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \leq \frac{l_{\text{стаб}(\alpha)}}{2R_2} \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \leq \frac{l_{\text{стаб}}(\alpha)}{2R_2} \quad (3.5)$$

где α - разница между азимутальными направлениями участков стабилизации, расположенных перед участком срезки и после него (Рисунок 3.9);

$l_{\text{стаб}}(\alpha)$ - длина участка стабилизации профиля, пересекающих ось симметрии профиля, м.

С учетом, что $R_2 = 57.3/i_2$, из выражения (3.5) получены формулы (3.6) и (3.7):

$$l_{\text{стаб}}(\alpha) \geq 2R_2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.6)$$

или

$$i_{\min} \geq 57.3 \cdot \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{l_{\text{стаб}}(\alpha)} \quad (3.7)$$

В соответствии с выражением (3.7) в Таблице 3.3. были выделены те значения i_{\min} , которые соответствовали принятому диапазону варьирования интенсивности в типовом звене i . Как видно, из 20 расчетных вариантов условию (3.1) отвечают только 11, т.е. в 45% случаев выставленный угол перекоса в ГЗД не полностью соответствует ожидаемому профилю (интенсивностям в начальном/последнем и типовом звеньях), что подразумевает меньшую долю бурения в режиме слайда в начальном и конечном звеньях профиля основного ствола РГС. При больших углах перекоса в ГЗД условие (3.1) является предпочтительным, при незначительных – необязательным, ввиду возможности коррекции профиля сочетанием при бурении режимов «ротор-слайд».

Расчеты вариантов профилей РГС (Таблица 3.3) показывают, что варьирование входных показателей существенно влияет на «габариты» профиля РГС. Например, при длине зоны «непромера» забойной телеметрической системой ЗТС (расстояние между ЗТС и долотом), равной 15 и 25 м, минимальное расстояние между двумя соседними точками срезов в боковые ответвления составит 60 м и 100 м соответственно [29, 80].

При этом амплитуда $s_{\text{звена}}/2$ (колебания от оси симметрии) основного ствола МСЗ в горизонтальной плоскости (относительно линии t1–t2) является незначительной (Рисунок 3.10), из чего следует:

- основной ствол при планировании РГС (например, при расчете в геолого-гидродинамических моделях, оценке интерференции стволов и прочих) можно принять условно «прямолинейным»;

- благодаря условной «прямолинейности» основного ствола РГС формула (3.8), представленная далее по тексту, и ее производные (Таблица 3.7) могут использоваться для оперативных расчетов на стадии планирования РГС;

- вследствие малой извилистости основного ствола, риск «недопуска» хвостовика в основной ствол РГС будет минимален, даже при большой интенсивности набора кривизны.

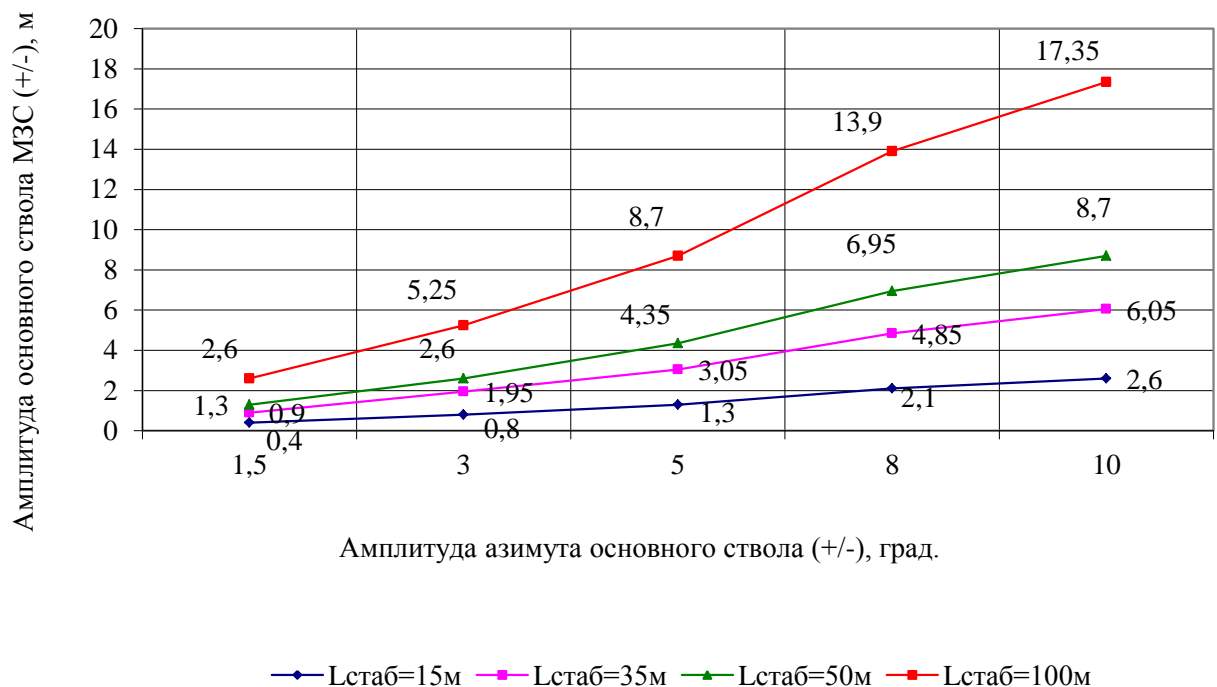


Рисунок 3.10 – Амплитуда основного ствола РГС

Поскольку принятая в расчетах (Таблица 3.3) разница между азимутальными направлениями участков стабилизации незначительна (при величине $\alpha = 1,5...10^\circ$), то для оперативного определения максимально

возможного количества ответвлений при планировании РГС на стадии заложения скважин предлагается использовать следующие выражения:

$$N = \frac{A_{з.у.} - A_{нач} - A_{кон}}{A_{звена}} \quad (3.8)$$

$$A_{звена} \approx n \cdot l_{стаб} \quad (3.9)$$

где N - количество ответвлений (типовых звеньев) в РГС;

$A_{з.у.}$, $A_{нач}$, $A_{кон}$ - длина проекции на ось симметрии (прямой, соединяющей точки t1 и t2) соответственно основного ствола, начального и конечного звеньев РГС, м;

n - количество интервалов в звене РГС;

$l_{стаб}$ - длина участка стабилизации в профиле РГС, м.

На основании этих зависимостей возможно оперативно определять максимально возможное количество ответвлений РГС при заданной длине участка стабилизации в профиле. К примеру, для четырехинтервального типового звена, ранее рекомендованного нами для применения как наиболее универсального, формула имеет вид:

$$N \approx \frac{A_{з.у.} - 7 \cdot l_{стаб}}{4 \cdot l_{стаб}} \quad (3.10)$$

Из данного выражения можно найти длину основного ствола при известных величинах количества боковых ответвлений и длины участка стабилизации (участка «непромера»):

$$4 \cdot N \approx \frac{A_{з.у.}}{l_{стаб}} - 7 \quad (3.11)$$

$$L_{з.у.} \approx A_{з.у.} \approx (4 \cdot N + 7) \cdot l_{стаб} \quad (3.12)$$

По аналогии были получены формулы (3.13) - (3.20) оперативного определения основных параметров профиля РГС и по другим вариантам профилей типовых звеньев (Таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Формулы для методики оперативного определения основных параметров разветвленной РГС [29]

Типовое звено РГС (между двумя ближайшими точками срезов)	Количество ответвлений (типовых звеньев) в РГС	Длина основного горизонтального участка РГС
четырёх-интервальное (вариант 1)	$N \approx \frac{A_{z.y.} - 7 \cdot l_{стаб}}{4 \cdot l_{стаб}} \quad (3.13)^*$	$L_{z.y.} \approx A_{z.y.} \approx (4 \cdot N + 7) \cdot l_{стаб} \quad (3.17)^{**}$
трехинтервальное (вариант 2***)	$N \approx \frac{A_{z.y.} - 7 \cdot l_{стаб}}{3 \cdot l_{стаб}} \quad (3.14)$	$L_{z.y.} \approx A_{z.y.} \approx (3 \cdot N + 7) \cdot l_{стаб} \quad (3.18)^{**}$
трехинтервальное (вариант 3***)	$N \approx \frac{A_{z.y.} - 6 \cdot l_{стаб}}{3 \cdot l_{стаб}} \quad (3.15)$	$L_{z.y.} \approx A_{z.y.} \approx (3 \cdot N + 6) \cdot l_{стаб} \quad (3.19)^{**}$
двухинтервальное (вариант 4)	$N \approx \frac{A_{z.y.} - 5 \cdot l_{стаб}}{2 \cdot l_{стаб}} \quad (3.16)$	$L_{z.y.} \approx A_{z.y.} \approx (2 \cdot N + 5) \cdot l_{стаб} \quad (3.20)^{**}$

*N - количество ответвлений в РГС, - длина зоны «непромера» ЗТС, - длины соответственно основного ГУ и ее проекции на аспидальную плоскость.
 **Формулы (3.17)-(3.20) являются производными соответственно от формул (3.13)–(3.16).
 *** ниже точки зарезки по варианту 2 располагается участок набора кривизны, по варианту 3 – участок стабилизации профиля

Оценим [29, 80], насколько полезна методика оперативного определения основных параметров разветвленной РГС: к примеру, необходимо пробурить восьмизабойную скважину с 7 боковыми ответвлениями (Рисунок 3.11). Экспертно специалистом в области разработки, занимающимся планированием данной скважин, длина основного ствола была определена в 1400 м.

В настоящее время, при бурении горизонтальных участков и в процессе срезов в РГС применяются компоновки длиной от 25 до 45 м (с расширенным комплексом LWD), с зоной «непромера» от 5 до 25 м (расстояние от долота до инклинометра). Тогда, для рассматриваемой РГС с семью ответвлениями и четырехинтервальным типовым звеном минимальная длина горизонтального участка составит (при величине «непромера» в КНБК $l_{стаб} = 25$ м):

$$L_{z.y.} \approx A_{z.y.} \approx (4 \cdot 7 + 7) \cdot 25 = 875 \text{ м}.$$

Это свидетельствует о том, что при длине основного ствола 875 м, РГС может быть пробурена с использованием традиционных ГЗД, базового

бурильного инструмента (89 мм, группа прочности G) и РВО, тогда как при экспертной оценке (длина основного ствола РГС 1400 м) потребовалось бы использование дорогостоящих роторно-управляемых систем, растворов на углеводородной основе и других дорогостоящих материалов и высокотехнологичного оборудования, вследствие чего решение о бурении подобной РГС могло быть отменено из-за значительных затрат на бурение.

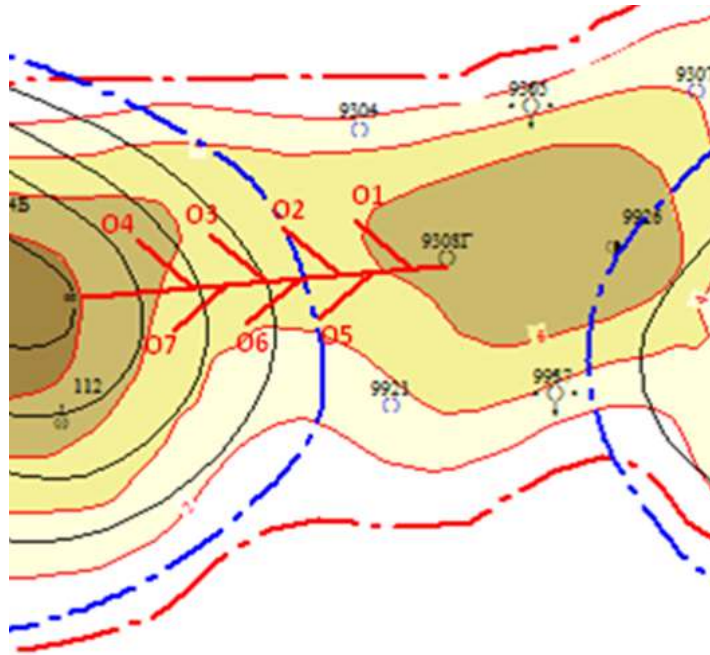


Рисунок 3.11 – Схема МЗС с восемью забоями, заложенной в купольной части залежи с целью охвата участка между рядами нагнетательных скважин [29]

3.5. Определение основных технологических факторов, существенно влияющих на конфигурацию профиля РГС

Планирование профилей РГС должно осуществляться таким образом, чтобы положение основного ствола и боковых ответвлений обеспечивало:

- минимизацию интерференции между основным стволом и ответвлением, между ответвлениями одной РГС;
- минимизацию интерференции между наиболее удаленными забоями ответвлений РГС и соседними скважинами;
- реализуемость профиля с учетом технических возможностей используемых КНБК.

В расчетах (Таблица 3.3) нами рассматривалось варьирование следующих основных геометрических параметров, которые могут потенциально повлиять на конфигурацию профиля РГС: длина участков стабилизации $l_{стаб}$, разница между азимутами основного горизонтального ствола α , интенсивность набора кривизны i .

Как следует из расчетов и методики оперативного определения основных параметров разветвленной РГС (таблицы 3.3, 3.7), основным фактор, существенно влияющий на конфигурацию РГС это длина зоны «непромера» забойной ЗТС – расстояние от долота до датчиков инклинометрии. Для определения минимального расстояния между точками зарезки соседних ответвлений рекомендовано использовать диаграмму, учитывающую величину «зоны непромера» ЗТС (Рисунок 3.12). Данная **номограмма должна учитываться при подборе КНБК** исходя из исходных параметров профиля РГС. Установлено (Рисунок 3.12). Установлено, что для обеспечения контролируемости процесса проводки стволов в интервале продуктивного пласта максимально допустимая «зона непромера» КНБК должна не превышать 0,25–0,5 ($1/2$ – $1/4$) от величины расстояния между точками зарезки ближайших ответвлений;

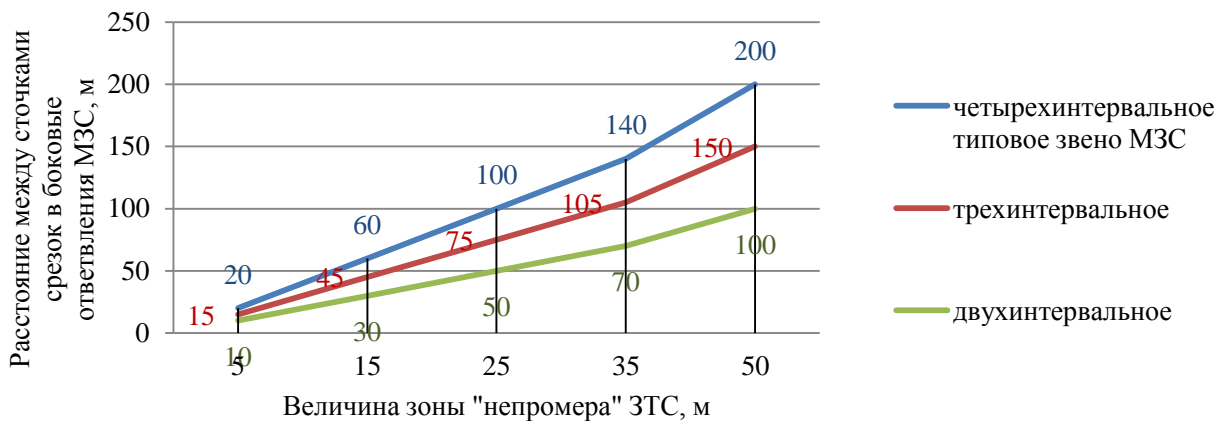


Рисунок 3.12 – Зависимость расстояния между соседними точками срезов, в зависимости от зоны «непромера» ЗТС

Таким образом, если длина зоны «непромера» в КНБК влияет на минимальное расстояние между точками зарезки ответвлений из основного горизонтального ствола РГС, то на форму профилей непосредственно самих

ответвлений влияет состав КНБК, в частности задаваемая ею интенсивность набора кривизны в ответвлении. Данный показатель необходимо рассматривать в совокупности с таким явлением, как интерференция между ответвлениями и основным стволом.

Оценка интерференции стволов является достаточно трудоемким процессом и безусловно должно базироваться на фактической информации. В случае отсутствия такой информации в первом «приближении» можно оценить геометрическими показателями профиля РГС.

Для определения минимально необходимой длины ответвления и его минимального необходимого удаления от основного ствола РГС с целью минимизации интерференции с ним (схема приведена на Рисунке 3.13) введены следующие допущения:

1. Введено понятие – зона «активной» интерференции. Данная зона представляет область вдоль основного ствола РГС, при превышении радиуса которой минимизируется интерференция между основным стволом РГС и отходящим ответвлением. При этом приняты следующие допущения:

- в зоне «активной» интерференции бокового ответвления и основного ствола один из стволов «не работает» (притока нет);
- при проводке ответвления за пределами зоны «активной» интерференции ответвление «работает», и приток будет преимущественно на участке ответвления, находящемся за пределами зоны «активной» интерференции;
- коллектор идеальный, изотропный;

2. Профиль ответвления принят плоским (без «уступа»).

В предлагаемой методике использованы два подхода: при условии, что радиус зоны «активной» интерференции известен, применяется первый подход (раздел 3.6), при его отсутствии – расчет выполняется из условия разведения бокового ответвления на 90° по отношению к основному стволу (раздел 3.7), как вариант обеспечивающий наибольшее удаление (на Рисунке 3.13 точки обозначены соответственно $L_{\text{отв.мин.}}$ и $L_{\text{отв.(90^\circ)}}$).

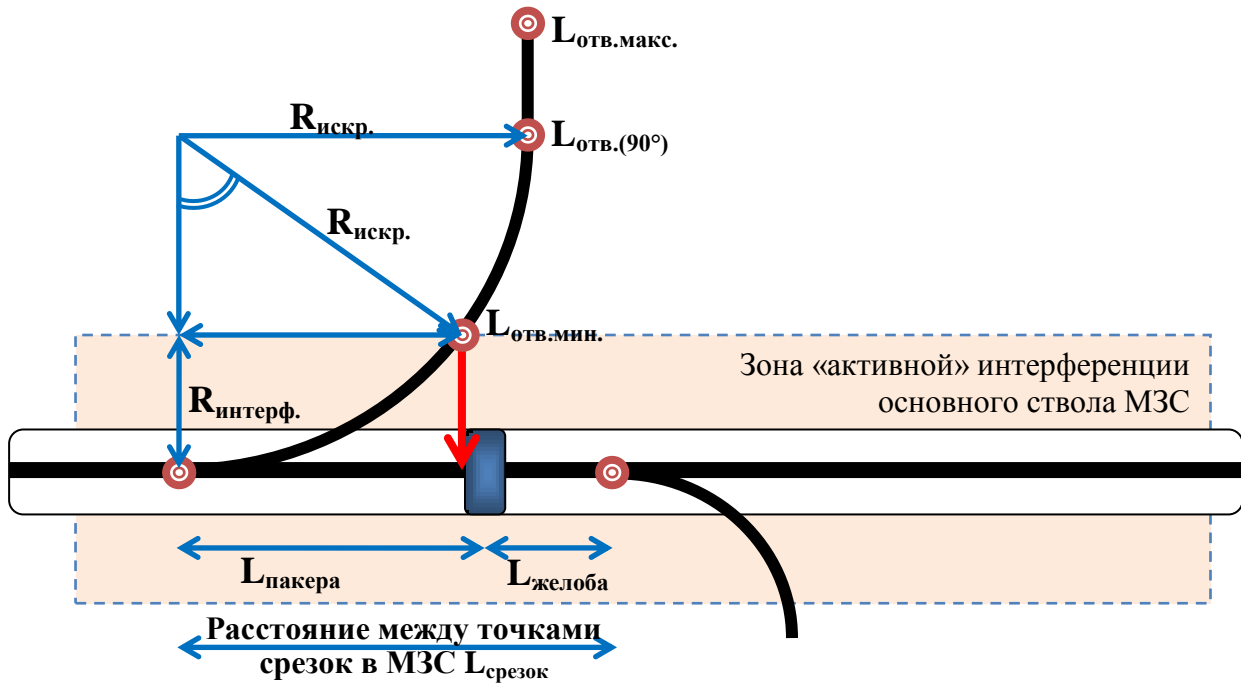


Рисунок 3.13 – Схема для выполнения расчетов (вид сверху)

Предварительно необходимо вывести ряд зависимостей, которые будут использованы при создании методики. Для этого выполнены следующие работы.

На основании представленной расчетной схемы (Рисунок 3.13) и известных формул расчета плоских профилей (представлены в Таблицах 3.4–3.6), получены расчетные значения (Таблица 3.8).

Для исключения выполнения трудоемких расчетов по заполнению таблицы 3.8, выведены формул оперативной оценки (3.21) и (3.22), расчеты по которым также представлены в Таблице:

$$L_{\text{отв.интерф.}} = 240,21 \cdot i^{-0,48} \quad (3.21)$$

$$L_{\text{пакер}} = 237,02 \cdot i^{-0,562} \quad (3.22)$$

Для получения формул выполнено следующее.

1. По данным таблицы 3.8 построены зависимости длины ответвления в зоне интерференции (Рисунок 3.14) и расстояния от точки срезки до места установки пакера в основном ГУ, в зависимости от изменения интенсивности набора кривизны в боковом ответвлении РГС;

2. По каждой зависимости определено, что зависимость описывается степенным законом с достоверностью аппроксимации 0,999–1,000. Соответственно:

- по рисунку 3.14а: $y = 240,21x^{-0,48}$ (среднеквадратичное отклонение от линии тренда $R^2 = 0,9999$). Из данной зависимости в дальнейшем получена формула (3.21);

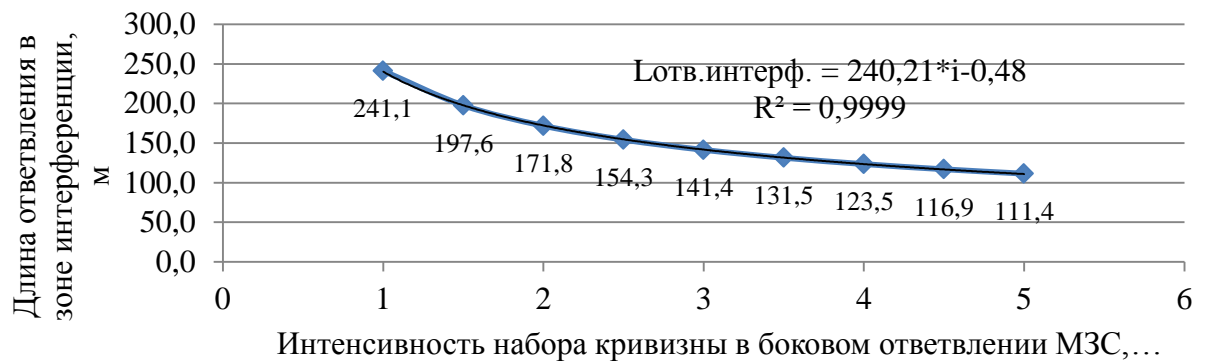
- по рисунку 3.14б: $y = 237,02x^{-0,562}$ (среднеквадратичное отклонение от линии тренда $R^2 = 0,9992$). Из данной зависимости в дальнейшем получена формула (3.22).

Таблица 3.8 – Исходные и расчетные данные (величина радиуса «активной» интерференции основного ствола РГС принята в 50 м)

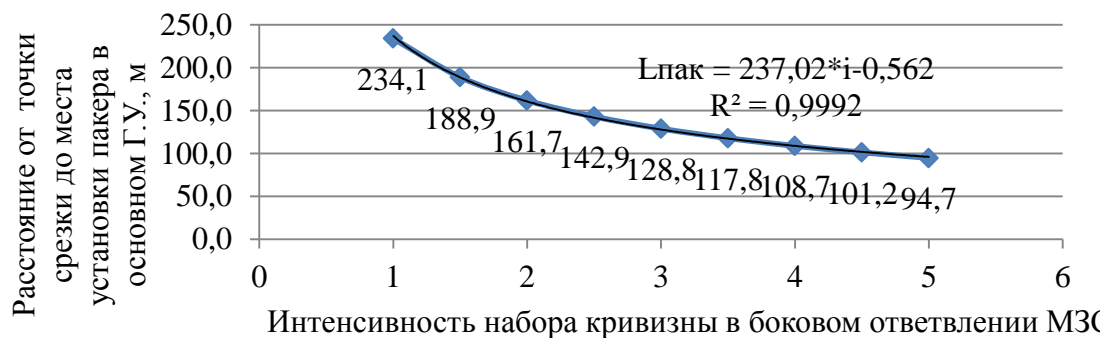
Показатели	Расчетные формулы	Варианты								
<i>Исходные данные</i>										
Интенсивность набора кривизны в боковом ответвлении РГС, град./10м	i	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Радиус интерференции (относительного основного ствола РГС), м	$R_{\text{интерф.}}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Длина интервала наработки желоба (для срезки в ответвление), м	$L_{\text{желоба}}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<i>Расчетные значения (по схеме на Рисунке 3.13)</i>										
Радиус искривления, м	$R_{\text{искр.}} = 573/i$	573	382	286,5	229,2	191	163,7	143,3	127,3	114,6
Длина ответвления для разведения его под углом 90° к основному ГУ	$L_{\text{отв.оптим.}}$	573	382	286,5	229,2	191	163,7	143,3	127,3	114,6
Радиус искривления за вычетом зоны интерференции, м	$R_{\text{искр.}} - R_{\text{интерф.}}$	523	332	236,5	179,2	141	113,7	93,25	77,33	64,6
Угол сектора интерференции, град.	γ	24,1	29,6	34,4	38,6	42,4	46,0	49,4	52,6	55,7
Длина ответвления в зоне интерференции	$L_{\text{отв.интерф.}}$	241,1	197,6	171,8	154,3	141,4	131,5	123,5	116,9	111,4
Длина ответвления вне зоны интерференции, м	$L_{\text{отв.оптим.}} - L_{\text{отв.интерф.}}$	331,9	184,4	114,7	74,9	49,6	32,3	19,8	10,4	3,2
Смещение относительно точки срезки (вдоль основного ГУ), при котором ответвление находится вне зоны интерференции (расстояние от точки срезки до места установки пакера в основном ГУ)	$L_{\text{пакер}}$	234,1	188,9	161,7	142,9	128,8	117,8	108,7	101,2	94,7
Расстояние между точками срезов в РГС	$L_{\text{пакер}} + L_{\text{желоба}}$	254,1	208,9	181,7	162,9	148,8	137,8	128,7	121,2	114,7

Продолжение таблицы 3.8

Показатели	Расчетные формулы	Варианты										
<i>Расчетные значения - по формулам (3.21) и (3.22)</i>												
Длина ответвления в зоне интерференции	Формула (3.21)	240,3	197,7	172,1	154,6	141,6	131,5	123,3	116,5	110,7		
Погрешность (%) расчетов по формуле (3.21)		-0,35	0,03	0,18	0,20	0,14	0,02	-0,14	-0,35	-0,58		
Смещение относительно точки срезки (вдоль основного ГУ), при котором ответвление находится вне зоны интерференции (расстояние от точки срезки до места установки пакера в основном ГУ)	Формула (3.22)	237,0	188,4	160,0	141,0	127,1	116,5	108,0	101,0	95,2		
Погрешность (%) расчетов по формуле (3.22)		1,26	-0,31	-1,05	-1,33	-1,31	-1,08	-0,67	-0,12	0,55		



а) Зависимость по формуле (3.21)



б) Зависимость по формуле (3.22)

Рисунок 3.14 – Определение длины ответвления в пределах зоны «активной» интерференции в зависимости от интенсивности набора его кривизны (при радиусе «активной» интерференции основного ствола РГС 50 м).

3. В общем виде зависимости на Рисунке 3.14 можно описать зависимостями типа:

- формулу (3.21) в виде: $y = A \cdot x^B$;

- формулу (3.22) в виде: $y = C \cdot x^D$.

4. Данные расчеты были выполнены для величины радиуса «активной» интерференции основного ствола РГС, принятой в 50 м. Путем повторных расчетов, варьируя величины радиуса «активной» интерференции от 5 до 100 м получаем значения коэффициентов А, В, С, D (Таблица 3.9), в зависимости от принятой величины радиуса интерференции (z).

Таблица 3.9 – Значения коэффициентов А, В, С, D

Радиус интерференции (относительно основного ствола РГС), м	Коэффициенты			
	А	В	С	D
5	75,727	-0,498	75,608	-0,505
10	107,13	-0,496	106,8	-0,511
15	131,26	-0,494	130,66	-0,517
20	151,62	-0,492	150,72	-0,523
25	169,58	-0,491	168,33	-0,529
30	185,83	-0,488	184,22	-0,535
35	200,79	-0,486	198,79	-0,542
40	214,72	-0,484	212,33	-0,548
45	227,82	-0,482	225,03	-0,555
50	240,21	-0,48	237,02	-0,562
55	252,01	-0,478	248,42	-0,57
60	263,28	-0,475	259,31	-0,577
65	274,1	-0,473	269,75	-0,585
70	284,52	-0,471	279,8	-0,593
75	294,57	-0,468	289,51	-0,601
80	304,29	-0,466	298,92	-0,61
85	313,71	-0,463	308,07	-0,618
90	322,85	-0,461	316,98	-0,628
95	331,74	-0,458	325,68	-0,637
100	340,4	-0,455	334,2	-0,647

5. На основании данных таблицы 3.9 строятся зависимости по данным коэффициентам (Рисунок 3.15). В соответствии с формулами, определенными на диаграммах с использованием MS Excel, определяются формулы для расчетов

коэффициентов А, В, С, D - формулы (3.24) -(3.25), (3.28–3.29), а формулы (3.21) и (3.22) можно записать в более общем виде (3.23), (3.26), (3.27):

$$L_{\text{отв.мин.}} \geq L_{\text{отв.интерф.}} = A \cdot i^B, \quad (3.23)$$

где $L_{\text{отв.интерф.}}$ – «неработающая» длина ответвления в зоне «активной» интерференции;

i - интенсивность набора кривизны в боковом ответвлении;

А, В – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$A = 33,721 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,502} \quad (3.24)$$

$$B = 0,0004 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,5014, \quad (3.25)$$

где $R_{\text{интерф.}}$ – принятая величина радиуса зоны «активной» интерференции вдоль основного ствола РГС, определяемая специалистами в области разработки индивидуально для каждого случая, исходя из проницаемости, анизотропии ФЕС и других факторов.

$$L_{\text{пакер}} = C \cdot i^D \quad (3.26)$$

$$L_{\text{срезок}} = L_{\text{пакер}} + L_{\text{желоба}}, \quad (3.27)$$

где $L_{\text{пакер}}$ – минимальное расстояние от точки срезки до места установки пакера в основном ГУ;

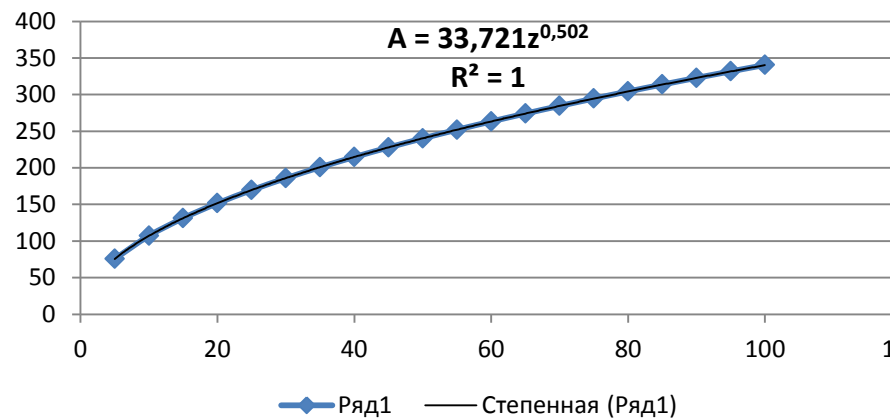
$L_{\text{срезок}}$ - минимальное расстояние между соседними точками срезов в ответвления;

С, D – коэффициенты, определяемые по формулам:

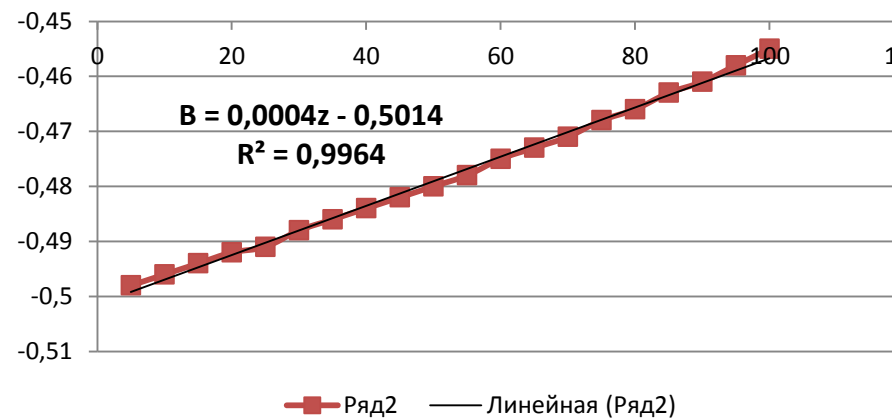
$$C = 34,146 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,4953} \quad (3.28)$$

$$D = -0,0015 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,492 \quad (3.29)$$

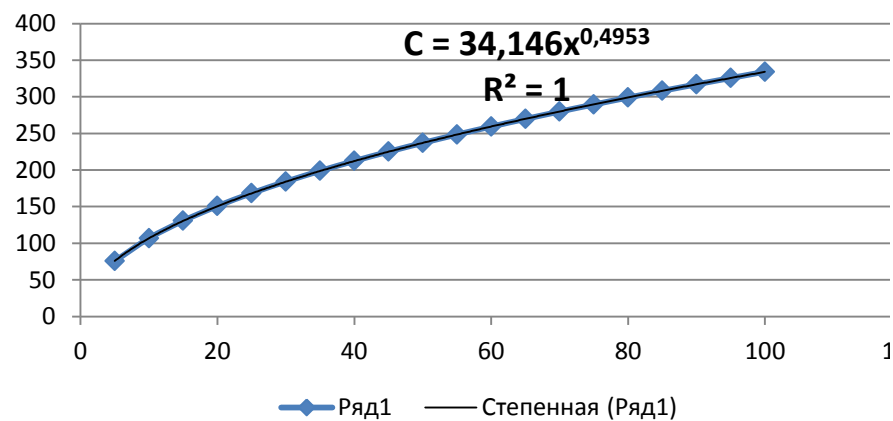
6. Проверочные расчет по формулам (3.21) и (3.22) показывают (Таблица 3.8), что, при принятой величине радиуса «активной» интерференции основного ствола РГС в 50 м, отклонение от ранее выполненных расчетных значений по схеме (Рисунок 3.13) не превышает 0,6% для формулы (3.21) и не более 1,26% для формулы (3.22), что позволяет использовать выявленные зависимости при планировании разветвленных РГС, в частности для определения минимальных длин боковых ответвлений.



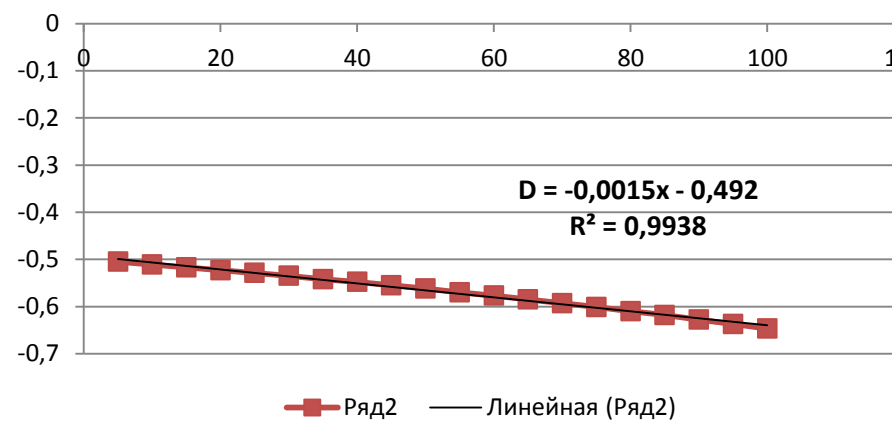
а) Зависимость по коэффициенту А



б) Зависимость по коэффициенту В



в) Зависимость по коэффициенту С



д) Зависимость по коэффициенту D

Рисунок 3.15 - Зависимости по коэффициентам, определенные с использованием MS Excel

Таким образом, установлены зависимости параметров конфигурации РГС от длины зоны «непромера» КНБК и интенсивности искривления, задаваемой этой компоновкой. Определим, какая взаимосвязь между двумя этими характеристиками КНБК, для обеспечения эффективного подбора бурильной компоновки. Для этой задачи разработана методика определения интенсивности искривления в начальном и конечном звеньях основного ствола РГС в зависимости от принятой величины зоны «непромера» КНБК.

3.6. Обоснование величины минимального смещения забоя бокового ответвления и минимально необходимой длины ответвления из условия минимизации интерференции с основным стволом РГС

Для определения зависимости длины ответвления в зоне «активной» интерференции от величины набора кривизны можно применять степенную зависимость по формулам (3.23) - (3.25):

$$L_{\text{отв.мин.}} \geq L_{\text{отв.интерф.}} = A \cdot i^B$$

$$A = 33,721 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,502}$$

$$B = 0,0004 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,5014$$

Физический смысл определения $L_{\text{отв.интерф.}}$ заключается в планировании длины ответвлений РГС больше данной величины, за счет чего возможно заложение забоев ответвлений РГС за пределами зоны «активной» интерференции. В случае, когда длина ответвления $L_{\text{отв.мин.}}$ закладывается большей протяженности, чем $L_{\text{отв.интерф.}}$ (Рисунок 3.13), снижается степень взаимовлияния ответвления и основного ствола, тем самым повышается эффективность проектирования профиля РГС.

В связи с тем, что ответвления бурятся поэтапно, то часть «основного» ствола первоначально бурится на близком расстоянии от ответвления. К примеру, при интенсивности разворота ответвления по простиранию пласта 2,5 %/10 м, в соответствии с формулами (3.23) -(3.25), на протяжении бурения первых 150 м ответвление будет располагаться на удалении от основного ствола не более чем

50м. Поэтому имеются предпосылки тому, что, с учетом результатов каротажа при бурения предыдущего ответвления новый ствол будет проведен с большей долей вскрытого коллектора относительно предыдущего ствола (ответвления/ответвлений). Данная рабочая гипотеза в дальнейшем подтвердилась при промысловых испытания (раздел 5).

Также, в соответствии с рассматриваемой схемой, можно определить расстояние установки заколонного пакера (относительно точки зарезки предыдущего ответвления), исходя из принципа минимизации взаимного воздействия ранее пробуренного ответвления с основным стволом в интервале ниже пакера (Рисунок 3.16).

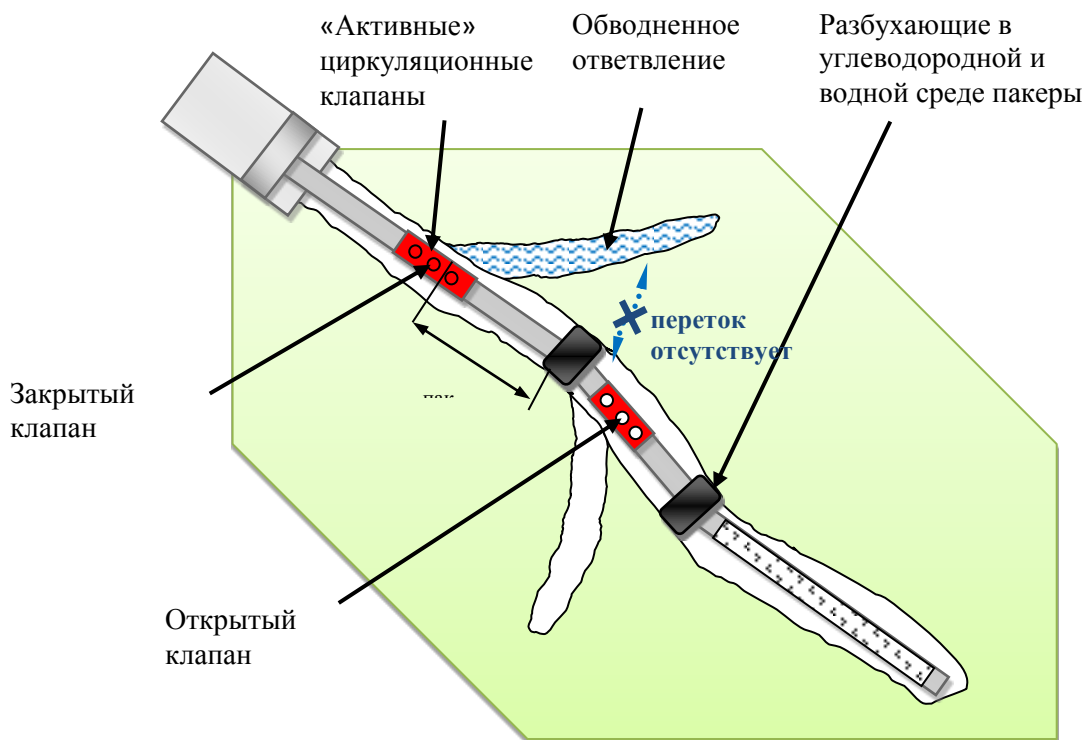


Рисунок 3.16 – Вариант заканчивания РГС с «активными» портами и заколонными пакерами

При установке заколонного пакера на расстоянии большем, чем $L_{\text{пакер}}$ по формуле (3.26), кроме задач исключения в дальнейшем заколонной циркуляции флюида и более корректной оценки дебитов каждого ответвления, а также качественного проведения РИР с изолированием/отключением обводненного интервала/ответвления, также минимизируется интерференция с боковым

ответвлением. Величину $L_{\text{пакер}}$ необходимо определять для того, чтобы в случае обводнения вышележащего бокового ответвления, за счет депрессии в интервал ниже заколонного пакера не подтягивалась по породе вода из отключенного ответвления.

При этом возникают вопросы, связанные с определением расстояния от точки зарезки предыдущего ответвления до интервала размещения заколонного пакера и каким должно быть расстояние между точками срезов в ответвления из условия минимизации интерференции?

По нашему мнению:

- пакеры должны размещаться на таком расстоянии, чтобы ответвление было на удалении от основного горизонтального ствола, превышающем зону «активной» интерференции, то есть при соблюдении условия $>L_{\text{пакер}}$;

- исходя из промысловой практики точка следующей срезки должна находиться на 20–30 м ниже установки пакера ($L_{\text{пакер}} + L_{\text{желоба}}$), так как этот промежуток необходим для наработки желоба перед срезкой. В дальнейшем с обеих сторон от пакера должны размещаться по одной-две «глухие» (неперфорированные) трубы в составе хвостовика, для установления в данном интервале изолирующих пробок (взрыв-пакер, мостовая пробка, клапан-отсекатель) в случае необходимости изолирования нижележащего обводненного интервала.

Для оперативности расчета указанных величин можно воспользоваться формулами (3.26) -(3.29):

$$L_{\text{пакер}} = C \cdot i^D$$

$$L_{\text{срезок}} = L_{\text{пакер}} + L_{\text{желоба}},$$

$$C = 34,146 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,4953}$$

$$D = -0,0015 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,492$$

При рассмотрении данной методики требуется рассмотрение вопроса о величине радиуса зоны «активной» интерференции.

Некоторыми специалистами предлагаются методики для определения продуктивности ГС и МЗС [11-13, 83], суть которых сводится к тому, что ГУ разбивается на множество узлов (участков небольшой протяженности), достаточно близко расположенных друг к другу, суммированием расчетных дебитов по которым определяется дебит скважины. При таком численном моделировании, например, специалистами «ТатНИПИнефть» [11-13, 51], был сделан вывод о том, что приток на окончаниях ГУ скважины больше притока на центральных узлах (Рисунок 3.17), при этом профиль притока практически совпадает с кривой по уравнению Батлера-Цупруновича (отклонение менее 1%). Объяснение данной тенденции заключается в том, что центральные интервалы испытывают наибольшую взаимную интерференцию. Поэтому, если рассматривать приток в горизонтальной плоскости, то для центральных узлов он будет плоским, а ближе к концам ГУ плоскорадиальным и радиальным.

Если провести аналогию с данным примером, то ответвления РГС также должны находиться на определенном удалении от основного ствола. Для результатов моделирования рассматриваемого случая (Рисунок 3.17) данная величина должна быть не менее 30–50 м. При удалении меньшем, чем указанная величина, ответвления не будут эффективно «работать» вследствие активной интерференции между стволами РГС. Указанная величина может значительно изменяться для конкретной залежи и требует уточнения индивидуально для каждого случая.

Исходя из опыта перебурирования части ГУ в ГС по технологическим причинам - перебуриваемый ГУ не ликвидировался и находился практически параллельно основному стволу на удалении не более 30–50 м. Ввиду того, что удельная продуктивность данных скважин не отличается от продуктивности других ГС, пробуренных и эксплуатируемых в сопоставимых условиях, можно утверждать, что ключевую роль в данном случае сыграл процесс интерференции. При этом в РГС, в которых ответвления целенаправленно пробурены со значительным смещением от основного ствола, дебиты выше в 1,2–2,5 раза в сравнении с ГС, заложенными в сопоставимых горно-геологических условиях. Следовательно, в этих РГС явление интерференции между стволами существенно меньше.

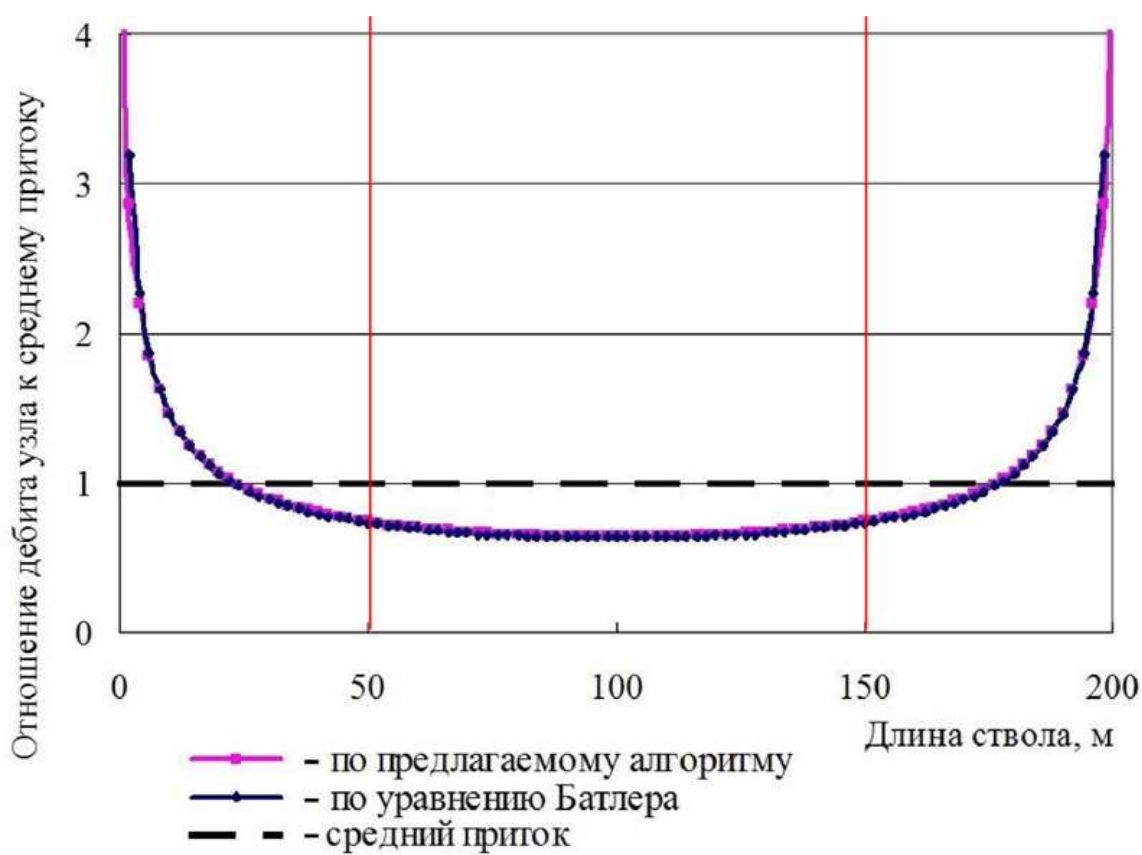


Рисунок 3.17 – Отношение дебита узла к среднему притоку вдоль длины горизонтального ствола по алгоритму «ТатНИПИнефть» и уравнению Батлера-Цупруновича [51]

В случае отсутствия данных о величине радиуса зоны «активной» интерференции минимальное смещение забоя бокового ответвления от основного ствола в предложенной методике определяется из условия разведения стволов под прямым углом, так как в соответствии с предложенной концепцией реализации многозабойного бурения в условиях анизотропных терригенных коллекторов Западной Сибири [79], бурение боковых ответвлений РГС также необходимо осуществлять предпочтительно под прямым углом по отношению к основному (центральному обсаживаемому хвостовиком) стволу.

3.7. Обоснование величины минимального смещения забоя бокового ответвления от основного ствола из условия разведения стволов под прямым углом (по отношению друг к другу)

Технология проводки РГС предусматривает следующую последовательность работ: ГУ бурится с ЗУ в соответствии с углом залегания продуктивного интервала (проектным коридором бурения основного ствола), набором ЗУ формируется «уступ» в профиле ствола, далее ствол разворачивается по азимуту и бурится до проектного забоя ответвления. Осуществляются подъем бурильного инструмента и срезка с «уступа» (с забуриванием нового ствола) с падением ЗУ (перед «уступом»), с учетом риска выхода из коридора бурения. По такой схеме производится зарезка и проводка всех боковых ответвлений с последующим обсаживанием основного ГУ хвостовиком.

Для реализации такой технологии строительства РГС боковое ответвление должно иметь два основных участка (Рисунок 3.18):

I участок пространственного искривления - для формирования «уступа» в профиле и его пространственного разворота. Участок завершается стабилизацией ЗУ в соответствии с углом залегания продуктивного интервала (ввиду отсутствия значительных изменений абсолютных отметок кровли пласта для большинства разбуриваемых месторождений Западной Сибири величину ЗУ можно принять равной 90°) и проектным коридором бурения ответвления;

II участок разворота по азимуту – для разведения бокового ответвления под прямым углом к основному стволу согласно выработанных нами требований [79], при этом изменения ЗУ не требуется.

На практике, для уменьшения протяженности ствола и набора меньшей интенсивности на втором участке, эти два участка могут совмещаться («уступ» завершается с небольшим разворотом по азимуту). При этом интенсивность набора кривизны в интервале основного ствола обычно составляет не более $1,0^\circ/10$ м (в интервалах срезок до $1,5-2,5^\circ/10$ м), в боковых ответвлениях достигает $2,5-3,5^\circ/10$ м.

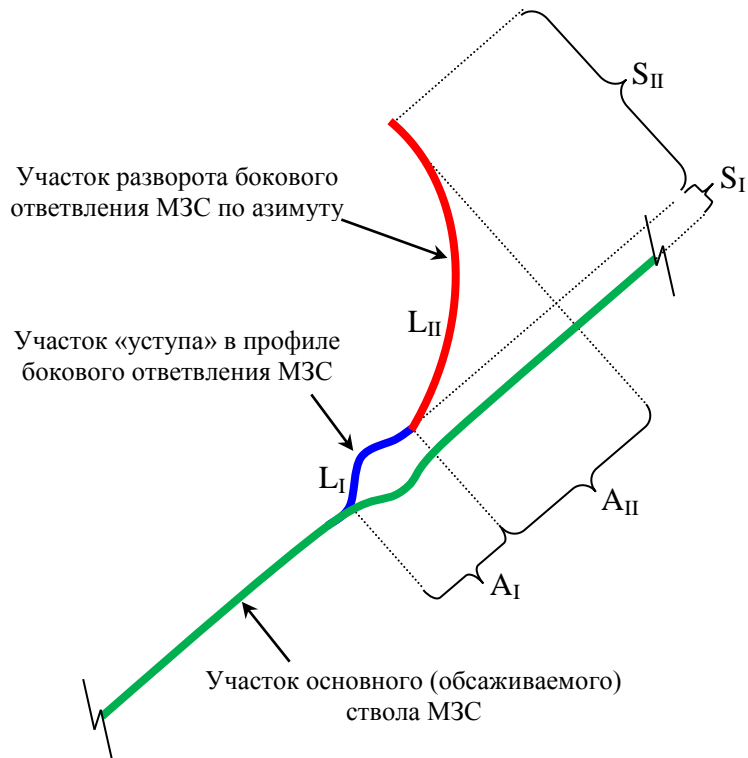


Рисунок 3.18 – Схема пространственного положения ответвления РГС

На основании выполненных расчетов [29] профиля бокового ответвления РГС (Таблица 3.10) было установлено, что при пространственной интенсивности искривлений профиля бокового ответвления $2,5^\circ/10\text{ м}$ - $3,5^\circ/10\text{ м}$ смещение забоя ответвления относительно основного ствола (S) должно быть 165–230 м, при этом общая длина ответвления составит 260–360 м по стволу.

В графическом виде результаты расчетов приведены на Рисунке 3.19, из которого следует, что характер изменения геометрических параметров бокового ответвления РГС с высокой схожимостью коррелируется со степенной зависимостью:

$$L = 909,98 \cdot i^{-1} \quad (3.30)$$

$$A = 582,94 \cdot i^{-1} \quad (3.31)$$

$$S = 573,3 \cdot i^{-1} \quad (3.32)$$

Данные уравнения можно использовать для оперативного расчета параметров ответвления и определения координат забоя ответвления на стадии оперативного планирования РГС, в т.ч. при определении минимального смещения забоя бокового ответвления от основного ствола.

Исходя из величин L , S , A можно в первом приближении подобрать пространственную интенсивность для бурения ответвлений в разветвленных РГС.

Таблица 3.10 – Результаты расчета профиля бокового ответвления РГС из условия разворота ответвлений на 90° по отношению к основному стволу [29]

Пространственная интенсивность набора кривизны, $i, \frac{\text{град}}{10\text{м}}$	Участки профиля бокового ответвления РГС, м					
	I участок («уступ»)			II участок (разворот по азимуту)		
	L_I	S_I	A_I	L_{II}	S_{II}	A_{II}
1,0	50,00	1,74	49,95	860,00	571,57	532,99
1,5	33,34	1,16	33,30	573,30	381,04	355,32
2,0	25,00	0,87	24,97	430,00	285,78	266,50
2,5	20,00	0,70	19,98	344,00	228,62	213,19
3,0	16,66	0,58	16,65	286,67	190,52	177,66
3,5	14,28	0,50	14,27	245,71	163,30	152,28
4,0	12,50	0,44	12,48	215,00	142,89	133,25
4,5	11,12	0,39	11,10	191,11	127,01	118,44
5,0	10,00	0,35	9,99	172,00	114,31	106,59

Примечание – L - длина по стволу, S - удаление от основного ствола (по перпендикуляру), A - проекция бокового ответвления на основной ствол

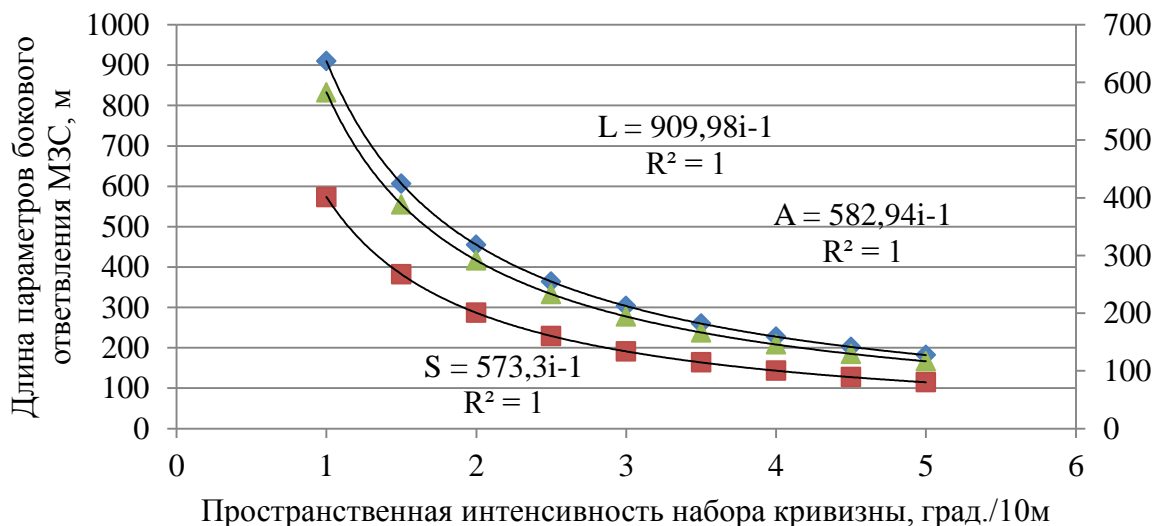


Рисунок 3.19 – Зависимость параметров бокового ответвления РГС (длины по стволу, смещения относительно основного ствола, проекции бокового ответвления на основной ствол) от величины пространственной интенсивности набора кривизны в ответвлении

Следует отметить, разворот ответвления по азимуту на 90° по отношению к основному горизонтальному стволу отдаляет его забой на 165–230 м (при $2,5^\circ/10$ м - $3,5^\circ/10$ м). Это достаточно большая величина, если учитывать размерность (шаг) сетки разбуривания 400 м, 500 м и т.п. Поэтому при проектировании РГС также должен учитываться и этот показатель, а также фактор интерференции стволом РГС с соседними скважинами и между собой. По нашему мнению, в первом приближении можно рассмотреть случай полностью изотропного (однородного) пласта, с учетом того, что неоднородность свойств пласта может быть учтена в дальнейшем на стадии геолого-гидродинамическом моделировании процесса разработки участка залежи (в секторной модели) и последующей корректировке (итерациях) первоначально принятых проектных решений по профилю РГС в интервале продуктивного пласта. В соответствии с этим подходом, при заложении РГС в окружении добывающих ННС, ГС и РГС в первом приближении можно ориентироваться на следующее (Таблица 3.11):

- для минимизации взаимодействия ответвлений РГС с окружающими скважинами и не нарушения сетки разработки объекта, максимальное смещение забоев ответвлений от оси симметрии РГС (проектной линии t_1-t_2) рекомендуется принимать как $1/3$ от величины сетки разбуривания (Рисунок 3.20, вариант I). С таким подходом, при шаге сетки разработки 500–700 м удаление (перпендикуляр) забоя ответвления от основного ствола РГС составит 167–233 м;

- в случае же использования РГС как системы разработки всей залежи/объекта, максимальное смещение забоев ответвлений от основного ствола РГС рекомендуется принимать как $1/4$ от величины сетки разбуривания (Рисунок 3.20, вариант II). Тогда удаление забоя ответвления от основного ствола РГС составит 125–175 м;

- в случае окружения РГС добывающими ННС смещение забоев ответвлений от основного ствола РГС можно принять до $1/2$ от величины сетки разбуривания (Рисунок 3.20, вариант III). В случае расположения по соседству

нагнетательных скважин смещение забоев может быть уменьшено с учетом результатов моделирования процесса разработки залежи.

Для каждого из описанных вариантов размещения РГС (среди ННС, ГС и РГС) определяется интенсивность набора кривизны из условия разворота ответвления на 90° относительно основного ГУ (Таблица 3.11). В случае если расчетная интенсивность больше технически реализуемой, ответвление может быть пробурено с меньшим разворотом по азимуту, чем требуемые 90° . К примеру, для бурения ответвления РГС с разворотом бокового ответвления по азимуту на 90° с пространственной интенсивностью искривления $2,5^\circ/10$ м, в варианте «расположение одной РГС среди ГС» требуется размерность сетки разработки 700×700 м и более. В случае меньшей размерности сетки разбуривания, ответвления РГС разводятся с максимальным удалением от основного ствола РГС.

Таблица 3.11 – Смещение забоев боковых ответвлений РГС относительно основного ствола (линии t_1-t_2) для случая изотропного пласта [29]

Соседние скважины, окружающие планируемую к бурению РГС	Удаленность забоя ответвления от основного ствола РГС (S) в метрах, при размерности сетки разбуривания:				
	400 м	500 м	600 м	700 м	800 м
ННС (доб.)	до 200	до 250	до 300	до 350	до 400
ГС (доб., нагн.)	133,3	166,7	200,0	233,3	266,7
ННС (нагн.)					
РГС (доб., нагн.)	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0
Минимальная пространственная интенсивность искривления ответвления, необходимая для ее разворота относительно основного ствола РГС на 90°, град/10м					
в варианте «расположение одной РГС среди ННС»	до 2,9	до 2,3	до 1,9	до 1,6	до 1,4
в варианте «расположение одной РГС среди ГС» (наиболее частый случай)	4,3	3,4	2,9	2,5	2,1
в варианте «расположение одной РГС среди РГС»	5,7	4,6	3,8	3,3	2,9
Примечание – интенсивность искривления для первого столбца определена исходя из формулы (3.32).					

На современном этапе развития техники и технологии оптимальная интенсивность набора пространственной кривизны составляет $2,5-3,0^\circ/10$ м, что позволяет разводить ответвления под прямым углом к основному стволу РГС при

размерности сетки разбуривания 600 м и более (Таблица 3.11). При одноинтервальном профиле ответвления РГС (меньшей сетке разработки) можно считать, что фактический профиль соответствует проектному, если ответвление проложено с минимальным отклонением от проектного и попадает в круг допуска забоя радиусом 30 м.

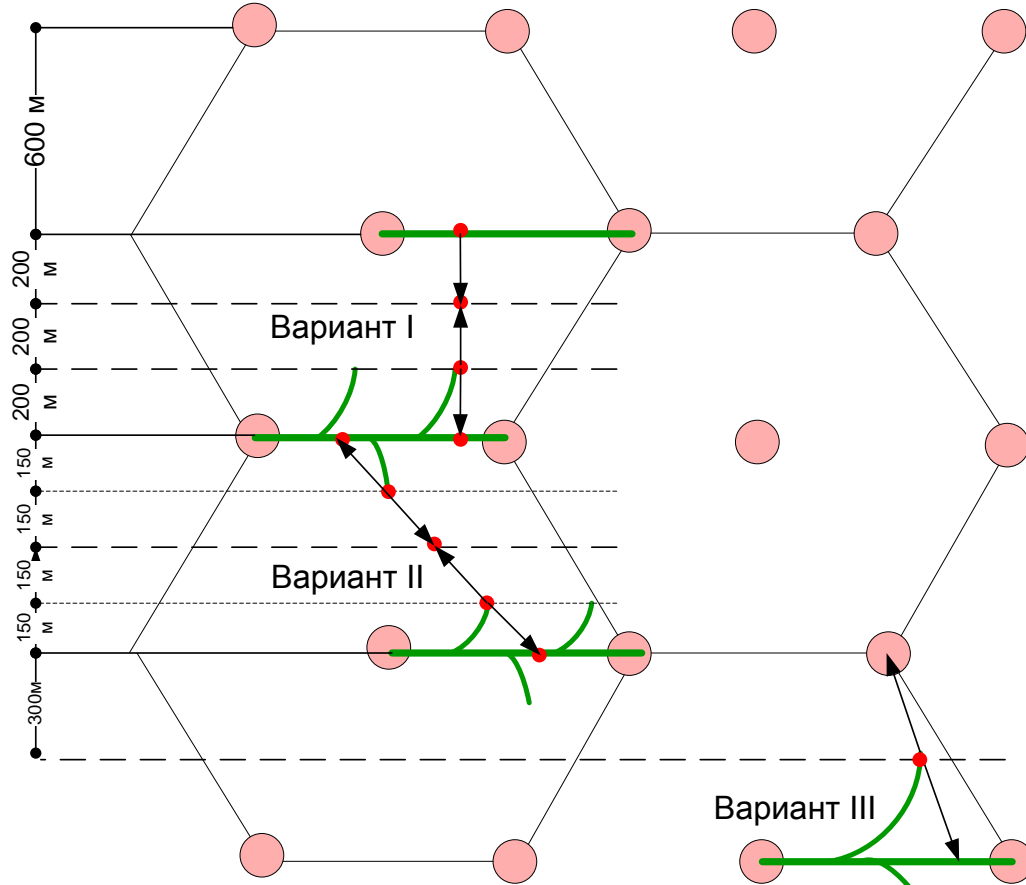


Рисунок 3.20 – Схема определения максимального смещения забоев РГС от оси симметрии

В целях минимизации интерференция между стволами одной РГС ответвления должны быть максимально удалены не только от основного (обсаживаемого) ствола РГС и соседних скважин, но и обеспечивать минимальную интерференцию между собой.

Расстояние между ответвлениями, расположенными по одну сторону от основного ствола, при условии проводки стволов с одинаковыми параметрами профиля, должно равняться удвоенному расстоянию между двумя точками срезов в боковые ответвления (Рисунок 3.21). К примеру, при расстоянии между точками

срезок 100 м, что позволяет бурить РГС с зоной «непромера» ЗТС в 25 м, расстояние между двумя параллельными ответвлениями составит 200 м. Следовательно, в условиях идеализированного изотропного пласта интерференция между забоями ответвлений будет сопоставимой с их интерференцией с основным стволом (Таблица 3.11). При большей длине ответвлений их взаимная интерференция только усилится, что может привести к снижению удельной эффективности боковых ответвлений. Для РГС, бурящихся в низкопроницаемых коллекторах, расстояние между ответвлениями может быть меньшим, чем в высоко и среднепроницаемых коллекторах - для более полной выработки запасов, при этом это расстояние для каждого объекта разработки должно определяться по результатам промысловых испытаний.

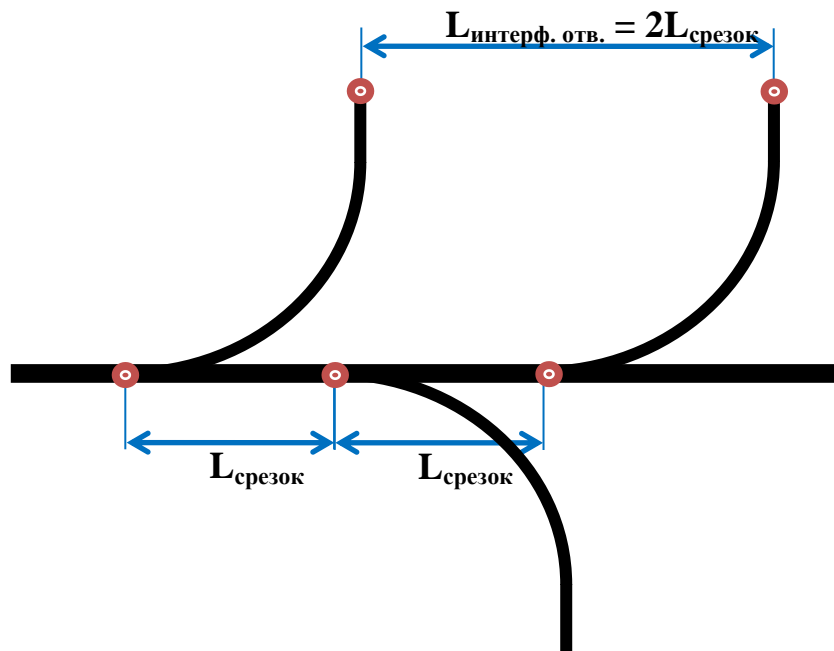


Рисунок 3.21 – Схема для определения интерференции между соседними ответвлениями РГС

Предложенные выше рекомендации приняты для идеализированного изотропного пласта. На практике использование такого подхода является только первым приближением, а окончательный выбор координат забоев должен осуществляться в геолого-гидродинамической модели уже с учетом всего объема

геолого-геофизической информации и обеспечением оптимальных показателей разработки целевого пласта (объекта).

На основании изложенных теоретических и математических расчетов была разработана методика подбора координат забоев, разветвленных РГС, представленная далее.

3.8. Методика выбора координат забоев разветвленных многозабойных скважин на стадии их планирования

3.8.1 Общие положения

Предлагаемый алгоритм подбора координат забоев, разветвленных РГС учитывает возможности бурового оборудования, накопленный опыт буровых работ и реализуется в следующей последовательности:

1. Определяется оптимальное количество боковых ответвлений в РГС;
2. Выявляются потенциальные точки зарезки боковых ответвлений;
3. Обосновываются координаты проектных забоев боковых ответвлений из условия минимизации интерференции между стволами РГС и с соседними скважинами;
4. Проводятся инженерные расчеты по оценке рисков бурения РГС типовым бурильным инструментом с последующей выдачей проекта на строительство скважины.

3.8.2. Определение количества боковых ответвлений в РГС

3.8.2.1. Для каждой скважины-кандидата под многозабойное бурение определяется диапазон возможного (максимального и минимального) количества боковых ответвлений.

Минимальное количество боковых ответвлений определяется исходя из текущих геологических условий. В геологически-сложных условиях в целях повышения дебитов скважин и большего охвата залежи дренированием рекомендуется закладывать РГС с двумя и более боковыми ответвлениями, в остальных случаях минимальное количество ответвлений должно быть не менее одного.

3.8.2.2. Определяется максимальное количество ответвлений РГС, исходя из величины зоны «непромера» между долотом и навигационным оборудованием в КНБК (результат округляется в меньшую сторону до целого значения):

$$N_{\max(1)} \approx \frac{L_{(t1-t3)}^{-7} \cdot L_{\text{непромера}}}{4 \cdot L_{\text{непромера}}} \quad (3.33)$$

где $N_{\max(1)}$ - максимально возможное количество ответвлений в РГС, определяемое из возможностей используемого навигационного оборудования;

$L_{(t1-t3)}$ - длина основного ствола РГС, соединяющего точки Т1 и Т3 профиля (например, равная размерности сетки разработки залежи), м;

$L_{\text{непромера}}$ - заданная величина зоны «непромера» между долотом и навигационным оборудованием в КНБК.

3.8.2.3. Определяется максимальное количество ответвлений, исходя из условия минимизации интерференции между стволами РГС и соседними скважинами (результат округляется в меньшую сторону до целого значения):

$$N_{\max(2)} \approx \frac{L_{(t1-t3)}}{L_{\text{срезок}}} - 1 = 2 \cdot \left(\frac{L_{(t1-t3)}}{S_{\text{ответвления}}} - 1 \right) \quad (3.34)$$

где $N_{\max(2)}$ - максимально возможное количество ответвлений в РГС, определяемое из условия минимизации интерференции между РГС и соседними скважинами;

$L_{\text{срезок}}$ - расстояние между точками зарезки соседних боковых ответвлений в РГС, м;

$S_{\text{ответвления}}$ - удаленность забоя ответвления от основного ствола РГС (определяется по Таблице 3.11 исходя из размерности сетки разбуривания залежи и типа скважин, окружающих скважину-кандидата);

2 - параметр, учитывающий, что между двумя ответвлениями закладываемыми с одной стороны РГС зарезается еще одно ответвление, в противоположную сторону от основного ствола;

1 - параметр, учитывающий, что в непосредственной близости от забоя основного ствола РГС (точки t_2) боковое ответвление не зарезается.

3.8.2.4. В случае необходимости использования заколонных пакеров в оснастке хвостовика для обсаживания основного ствола РГС, максимальное количество ответвлений определяется:

$$N_{\max(3)} \approx \frac{L(t_1-t_3)}{L_{\text{срезок(пакер)}}} - 1 \quad (3.35)$$

где $N_{\max(3)}$ - максимально возможное количество ответвлений в РГС, определяемое из условия минимизации риска перетока из обводненного ответвления в нижележащий интервал без обводнения, изолированный набухающим пакером (Рисунок 3.22);

1 – параметр, учитывающий, что в непосредственной близости от забоя основного ствола РГС боковое ответвление не резается;

$L_{\text{срезок(пакер)}}$ – минимально допустимое расстояние между точками резки соседних боковых ответвлений в РГС, определяемое для разветвленных РГС по формуле:

$$L_{\text{срезок(пакер)}} = C \cdot i^D + L_{\text{желоба}} \quad (3.36)$$

$L_{\text{желоба}}$ – длина интервала наработки желоба в интервале резки ответвления (принимается равным 25 м исходя из практического опыта бурения РГС);

i – пространственная интенсивность набора кривизны в ответвлении, °/10 м;

C, D – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$C = 34,146 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,4953} \quad (3.37)$$

$$D = -0,0015 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,492 \quad (3.38)$$

где $R_{\text{интерф.}}$ – величина радиуса зоны воздействия (интерференции) основного ствола РГС, определенная для рассматриваемого объекта.

3.8.2.5. В случае бурения ярусных РГС (ответвления закладываются на разные пропластки) с субгоризонтальным основным стволом, минимально расстояние между срезками составляет $L_{\text{срезок}} = 20 \dots 50$ м (в зависимости от величины зоны «непромера» в КНБК). Для таких типов РГС максимальное количество ответвлений при моделировании в ГГДМ может быть увеличено до величины, определяемой по формуле (3.35).

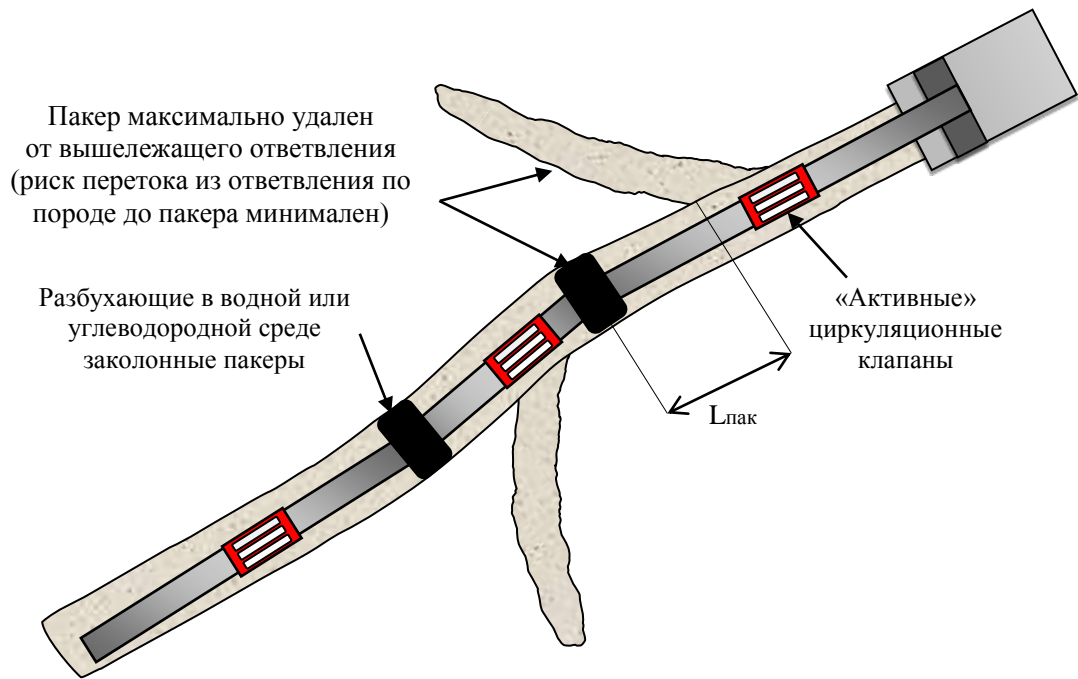


Рисунок 3.22 – Схема заканчивания РГС

3.8.2.6. Из полученного диапазона $\{N_{\max(1)}; N_{\max(2)}; N_{\max(3)}\}$ выбирается меньшее значение, которое и принимается за максимальное возможное количество ответвлений РГС. $N_{\max(3)}$ учитывается только в случае необходимости установки набухающих пакеров в компоновке хвостовика.

3.8.2.7. Для установленного максимально и минимально возможного количества боковых ответвлений по результатам расчетов в ГГДМ определяют оптимальное количество забоев (боковых ответвлений).

Данные проектные цели (координаты забоев) РГС согласовываются недропользователем и учитываются при формировании технического задания на разработку проекта по бурению РГС.

3.8.3. Определение точек зарезок ответвлений из основного ствола РГС

3.8.3.1. Точка зарезки первого ответвления рекомендуется располагать:

- на удалении от башмака эксплуатационной колонны, превышающем длину КНБК, в целях исключения подклинивания инструмента в интервале разбуриваемой оснастки обсадной колонны;

- в интервале стабилизации ГУ (после завершения донабора зенитного угла (ЗУ) в профиле ГУ сразу после вскрытия кровли пласта);

- если в целях повышения прогнозируемости геологических условий проводки планируется заложение пилотного ствола на участке между башмаком эксплуатационной колонны и точкой зарезки первого ответвления, то расстояние до точки первой зарезки должно превышать рекомендованные выше значения из условия предупреждения пересечения пилотного и горизонтального стволов;

- на расстоянии, позволяющем попасть в центр проектной цели (круга допуска) с принятой для ответвления пространственной интенсивностью искривления.

3.8.3.2. Точка зарезки последующего ответвления должна располагаться от предыдущей на расстоянии с учетом что:

- максимальное расстояние между точками зарезки новых ответвлений зависит от количества планируемых к зарезке ответвлений, а также от решаемых геологических задач (точек размещения забоев);

- минимальное расстояние между точками зарезки новых ответвлений определяется исходя из необходимости выполнения инклинометрических замеров и рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{срезок}(min)} = L_{\text{непромера}} + 35 \text{ м} \quad (3.39)$$

где $L_{\text{непромера}}$ – величина зоны непромера используемой КНБК, м;

35 – величина, включающая интервал замера инклинометром, подтверждающего факт зарезки нового ствола (принимается равным 10 м), и интервал необходимый для наработки желоба перед началом зарезки нового ответвления (принимается равным 25 м) – определена по результатам проведения экспертного анализа.

В случае необходимости установки заколонных пакеров в хвостовик основного ствола РГС, минимальное расстояние между точками зарезок соседних ответвлений должна определяться с учетом формулы (3.36), положения водонефтяного контакта на участке и допустимого отклонения от проектной траектории.

3.8.4. Определение координат проектных забоев ответвлений РГС

3.8.4.1. После выбора точек резки ответвлений РГС определяется величина пространственной интенсивности набора их кривизны:

- согласно техническим возможностям и оптимальным областям работы используемого бурильного инструмента и оборудования;
- из условия минимизации рисков пересечения стволов РГС (с учетом конусов «неопределенности» при замерах профиля в процессе бурения);
- с целью минимизации интерференции с основным стволом и обеспечения разворота ответвления в азимутальной плоскости по отношению к основному стволу РГС с углом, максимально близким к 90° . Разворот ответвления относительно основного ГУ при максимально возможной интенсивности искривления позволяет отвести забой ответвления при его минимальной протяженности и снизить стоимость его строительства.

3.8.4.2. Далее определяется удаленность забоя ответвления от основного ствола РГС исходя из следующих принципов:

- удаленность забоя ответвления от основного ствола РГС ($S_{отв.1}$), при которой одновременно минимизируется интерференция с соседними скважинами и между забоями РГС, определяется по формуле:

$$S_{отв.1} = S_{ответвления} \quad (3.40)$$

где $S_{ответвления}$ – величина, определяемая по Таблице 3.11;

- удаленность забоя, необходимая для разведения ответвления на 90° относительно основного ствола, по формуле:

$$S_{отв.2} = 573,3 \cdot i^{-1} \quad (3.41)$$

- удаленность забоя, необходимая для минимизации интерференции ответвления с основным стволом должна быть больше величины $R_{интерф.}$, либо (при отсутствии данной величины) принимается как 80% от S_{max} :

$$S_{отв.3} = \begin{cases} R_{интерф.} \text{ или} \\ 0,80 \cdot S_{max} \end{cases} \quad (3.42)$$

где $R_{\text{интерф.}}$ – величина радиуса зоны воздействия (интерференции) основного ствола РГС, определенная для рассматриваемого объекта;

$$S_{\text{max}} = \max \left\{ S_{\text{отв.1}}, S_{\text{отв.2}} \right\} \quad (3.43)$$

3.8.4.3. На основании полученного диапазона $\{S_{\text{отв.1}}; S_{\text{отв.2}}; S_{\text{отв.3}}\}$, по результатам моделирования в ГГДМ, определяется оптимальное смещение забоя ответвления $S_{\text{оптим.}}$ (от основного ствола РГС).

3.8.4.4. По выбранному оптимальному смещению ответвления $S_{\text{оптим.}}$ определяются области возможного заложения забоя ответвлений. Для этого определяется минимальное необходимое смещение забоя ответвления:

$$A_{\text{заб.}(min)} = \sqrt{\left(\frac{573.3}{i}\right)^2 - \left(\frac{573.3}{i} - S_{\text{оптим.}}\right)^2} \quad (3.44)$$

3.8.4.5. В соответствии с расчетными значениями, полученными в ГГДМ, забой ответвления закладывается в оптимальной области, изображенной на схеме (Рисунок 3.23). При этом координаты забоя ответвления должны соответствовать условиям:

$$\begin{cases} S_{\text{заб.}} = S_{\text{оптим.}} \\ A_{\text{заб.}} \geq A_{\text{заб.}(min)} \end{cases} \quad (3.45)$$

Границы оптимальной области определяются возможной интенсивностью набора кривизны в ответвлении, то есть вне границ данной области проводка стволов невозможна по имеющимся техническим ограничениям используемого бурового оборудования. Окончательное количество ответвлений, расположение точек их зарезки и забоев определяется согласно геолого-гидродинамической модели по участку бурения, а предложенные методы оперативной оценки являются вспомогательным инструментом при планировании конфигурации РГС (в том числе на этапе формирования проектного документа на разработку залежи системой, предусматривающей использование РГС как один из ее элементов).

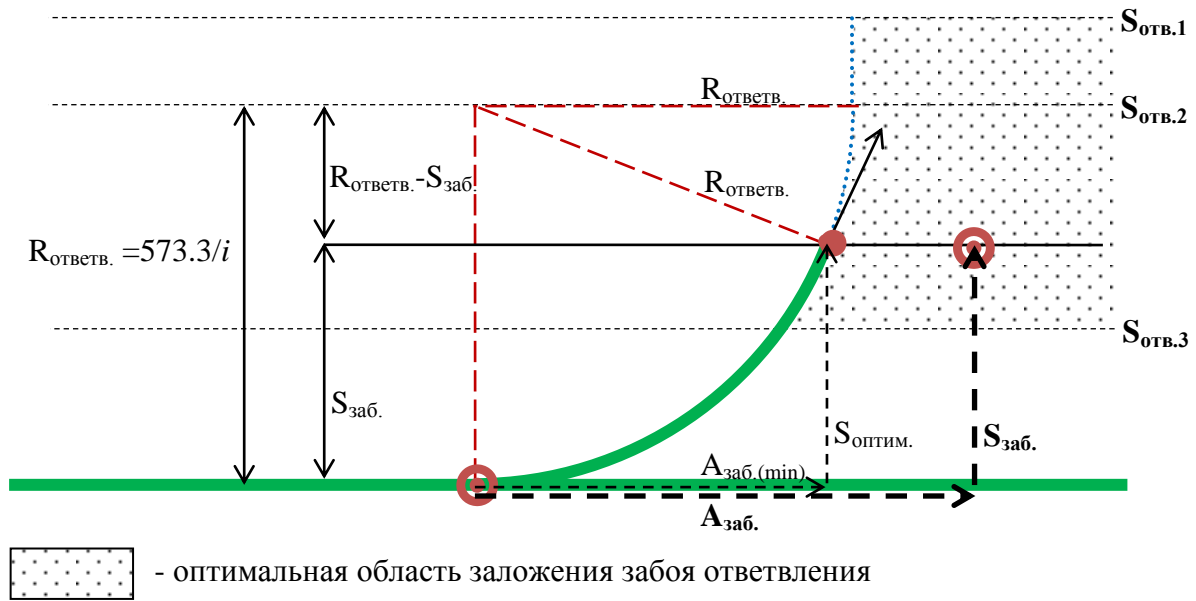


Рисунок 3.23 – Схема определения координат забоя бокового ответвления (относительно точки его зарезки)

3.8.4.6. В соответствии с представленным выше алгоритмом осуществляется подбор координат забоев для всех ответвлений РГС.

Примечания

1. в случае, если параметры кривизны и длина всех ответвлений принимаются равными, тогда для всех ответвлений РГС параметры $S_{заб.}$ и $A_{заб.}$ принимаются одинаковыми.
2. при необходимости оперативной оценки можно определить ориентировочные длину ответвлений разветвленных РГС $L_{отв.}$ и угла разворота ответвления по отношению к основному стволу РГС (в азимутальной плоскости) $\Delta AЗ$, при принятых величинах $S_{заб.}$ и $A_{заб.}$, по формулам (данные величины являются справочными и уточняются при разработке проекта на бурение РГС):

$$\Delta AЗ \approx \arctg \left(\frac{\frac{573.3}{i} - A_{заб.}}{\frac{573.3}{i} - S_{заб.}} \right), \text{ град} \quad (3.46)$$

$$L_{отв.} \approx \frac{\Delta AЗ}{360^\circ} \cdot \frac{573.3}{i} \cdot 2\pi \quad (3.47)$$

3.8.4.7. На основании полученных координат забоев выполняются инженерные расчеты по оценке рисков бурения РГС с выбором бурильного инструмента и последующей выдачей проекта на строительство скважины.

Выводы по главе 3.

Обоснованы основные параметры профиля РГС: длина основного ГУ, количество забоев, расстояние между стволами - определяются исходя из решаемых геологических задач.

Расчетами подтверждено, что при планировании разветвленной РГС, например, в геолого-гидродинамических моделях, горизонтальный участок его «основного» ствола можно считать условно «прямолинейным» ввиду незначительного отклонения основного ствола №4 от прямой, соединяющей точки Т1 и Т2.

Разработана методика для оперативной оценки максимального технически возможного количества ответвлений при ограниченной длине ГУ.

Определен основной фактор, существенно влияющий на конфигурацию РГС: длина зоны «непромера» забойной телеметрической системы (ЗТС) – расстояние от долота до датчиков инклинометрии. Для определения минимального расстояния между точками зарезки соседних ответвлений рекомендовано использовать диаграмму, учитывающую величину «зоны непромера» ЗТС, которая используется при подборе КНБК. Установлено, что для обеспечения контролируемости процесса проводки стволов в РГС максимально допустимая «зона непромера» КНБК должна не превышать 0,25–0,5 ($\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{4}$) от величины расстояния между точками зарезки ближайших ответвлений.

Сформулирован алгоритм определения области заложения ответвлений РГС, в которой любая точка будет технически реализуема и располагаться вне зоны интерференции с основным горизонтальным стволом РГС.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН С ТРЕМЯ И БОЛЕЕ ЗАБОЯМИ

4.1. Общие требования к профилям РГС

С учетом выполненных в главах 2 и 3 теоретических исследований была предложена технологическая схема для бурения РГС, применительно к условиям месторождений Западной Сибири.

РГС бурятся с целью повышения степени охвата пласта дренированием, обеспечивая более равномерное распределение депрессии в системе «скважина-пласт» в районе призабойной зоны стволов скважины, за счет разведения основного горизонтального ствола и ответвлений по простиранию пласта. При этом минимизируется и интерференция между стволами скважины.

В случае бурения одного основного горизонтального ствола и одного ответвления – оба ствола могут разнонаправленно разводиться по азимуту. Когда же количество ответвлений два и более – наиболее технологичным решением является бурение прямолинейного основного горизонтального ствола и поочередное разведение от него вправо и влево ответвлений. Данный подход, к сожалению, обеспечивает меньшее удаление ответвлений от основного горизонтального ствола ввиду поддержания профиля основного ствола в интервале пласта прямолинейным, но при этом распределение ответвлений по пласту и относительно основного ствола является более равномерным.

Таким образом, основным требованием к профилям РГС с тремя и более забоями является поддержание относительной прямолинейности основного ствола, а в ответвлениях - набор кривизны по простиранию пласта, с учетом технических возможностей используемого бурильного инструмента.

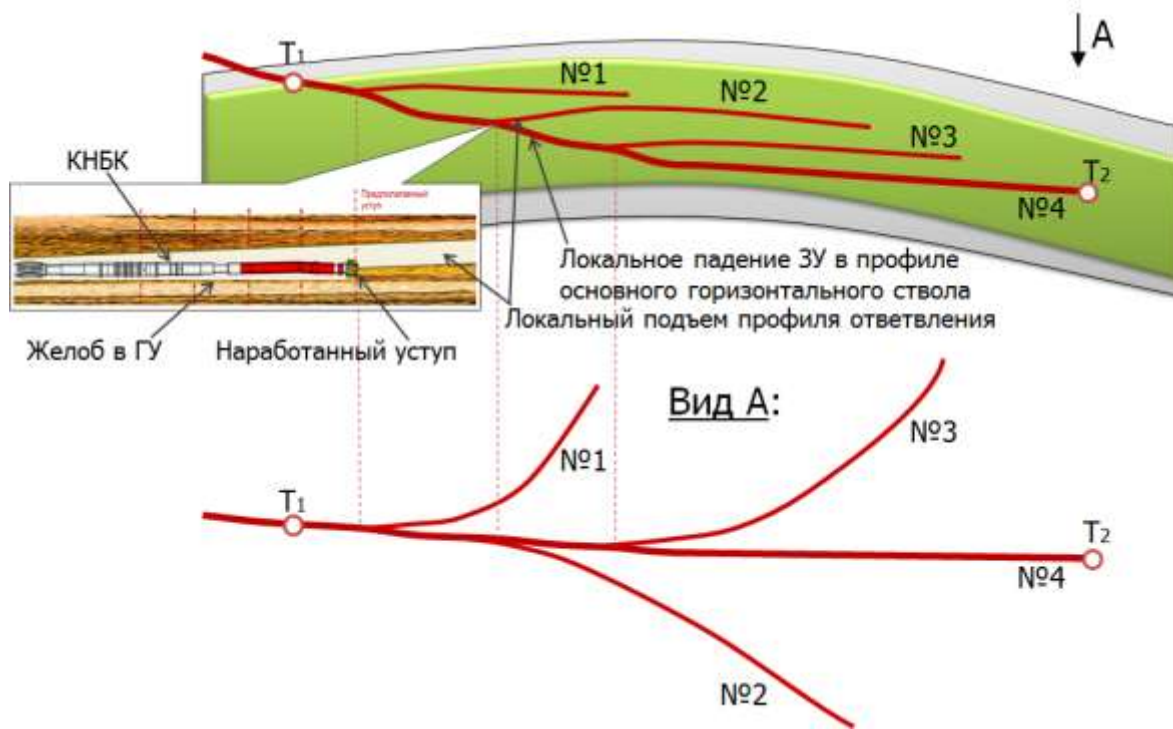
С технологической точки зрения процесс бурения РГС отличается от стандартных ГС тем, что требуются дополнительные затраты времени на зарезку ответвлений.

При этом технология зарезки должна быть максимально технологичной, обеспечивающей положение основного горизонтального ствола и ответвлений с минимально необходимой амплитудой по вертикали, в пределах нефтенасыщенной зоны пласта. Однако, как свидетельствует опыт выполнения таких работ, строительство РГС ограничено бурением одного основного горизонтального ствола и одного ответвления по двум пропласткам как по геологическим причинам, так и вследствие технологического несовершенства процесса срезки.

4.2. Теоретические предпосылки выбора схемы строительства многозабойных скважин с тремя и более забоями

Предшествующий исследованиям опыт строительства РГС по Когалымскому району в 2009–2013 гг. свидетельствует, что большая часть РГС бурится по 1–2 уровням сложности согласно классификации ТАМЛ. Технология проводки стволов следующая: основной ГУ ствола и отходящие от него боковые ответвления бурятся в пределах продуктивного пласта, преимущественно параллельно напластованию (большинство месторождений Западной Сибири имеют выдержанную структуру и незначительные нефтенасыщенные толщины от 1–3 м). При использовании ранее известных решений большинство РГС бурится со значительным превышением проектной продолжительности и имеется значительный резерв для повышения технико-экономических показателей (ТЭП) строительства РГС.

В связи с этим и учитывая результаты исследований, приведенных во второй и третьей главах работы, было предложено реализовать технологию строительства РГС посредством следующих решений (Рисунок 4.1) [29, 91].



Примечания

1. T1, T2 – соответственно начало и окончание основного горизонтального участка ствола.
2. №№ 1, 2, 3 и 4 – указывается очередность бурения (№ 4 – основной горизонтальный участок ствола, №№ 1–3 – боковые ответвления).

Рисунок 4.1 – Очередность бурения и технология зарезки стволов РГС

1. Ответвления забуриваются в порядке их очередности «сверху вниз» - в процессе бурения ГУ основного ствола от его начала к его окончанию (от точки T1 к точке T2): после начала бурения ГУ и обеспечения нахождения в интервале открытого ствола ЗТС, производится забуривание первого ответвления (№1 на Рисунке 4.1) с разворотом его профиля по азимуту и добуриванием на проектный забой ответвления, далее выполняется подъем компоновки в точку забуривания ответвления №1, зарезка и дальнейшее бурение основного ГУ в азимуте к точке T2; после подтверждения замерами инклинометрии плановой траектории осуществляется повтор перечисленных операций - для бурения второго и последующих ответвлений (№№ 2 и 3 на Рисунке 4.1). Ствол №4 (на представленном примере) является завершающей частью ГУ основного ствола. Проводка ответвлений в процессе бурения основного ствола выполняется таким образом, чтобы интервал выше точки зарезки имел азимут в направлении к точке T2, что позволяет обеспечить практически прямолинейность основного

горизонтального ствола и попадание в проектный круг допуска окончательного забоя (№ 4 на Рисунке 4.1), неосложненный спуск в него хвостовика, тогда как забои ответвлений могут располагаться на существенном удалении от основного горизонтального ствола.

2. Бурение основного ГУ из пробуренных ответвлений осуществляется по технологии зарезки нового ствола, со следующими особенностями:

- в планируемом интервале зарезки выполняется интенсивный ($2,0-3,0^\circ/10\text{м}$ и более) набор зенитного угла (на $2-5^\circ$ на 10-20 м проходки) с последующим разведением ответвления по азимуту от пробуренной части ГУ и бурение до проектной цели;

- осуществляется подъём бурильного инструмента в планируемый интервал зарезки, далее выполняется наработка желоба при поддержании нагрузки на долото 0,5-2,0 т. с формированием «уступа» под вооружением долота для выполнения последующей зарезки нового ствола (Рисунок 4.1). За счет локального «подъёма» профиля ответвления в планируемом интервале зарезки процесс формирования «уступа» в желобе облегчается, так как увеличивается контакт вооружения долота с горной породой в наработанном уступе.

3. Для гарантированного спуска хвостовика в основной горизонтальный ствол РГС, каждую зарезку ствола из ранее пробуренного ответвления в основной ГУ необходимо выполнять со снижением ЗУ на $2-5^\circ$ с последующим возвратом к значениям азимута и ЗУ бурения основного ГУ, предшествующим интервалу зарезки.

4. Поскольку ответвления забуриваются с локальным подъёмом профиля и набором ЗУ, а этим интервалам предшествуют интервалы зарезок с локальным падением ЗУ, в процесс спуска под действием гравитационной силы обеспечивается попадание хвостовика в основной горизонтальный ствол РГС. Дополнительно риски недоспуска хвостовика в основной ГУ могут быть оценены при подготовке ствола (шаблонировании), а подтверждением прохождения хвостовика в основной ГУ является мера бурильного инструмента, поскольку он обычно имеет глубину по стволу, отличающуюся от глубины ответвлений.

При этом, независимо от способа формирования уступа в профиле (наработки желоба): нагрузка на долото должна быть меньшей, чем в процессе бурения, и долото должно приближаться к точке предполагаемого уступа с низкой скоростью во избежание срыва инструмента с уступа; буровой раствор должен обладать улучшенными смазывающими свойствами и минимально требуемой плотностью, для минимизации трения бурильного инструмента и исключения дифференциального прихвата. При бурении РГС растворами на водной основе (РВО) содержание смазывающей добавки составляет до 3–4%, в случае применения растворов на углеводородной основе (РУО) они должны иметь низкую эквивалентную плотность при циркуляции; зарезку предпочтительно осуществлять в мягких породах, менее устойчивых к воздействию периферийного вооружения долота. Интервалы залегания таких пород определяются по данным каротажа в процессе бурения, либо по косвенным признакам (механическая скорость бурения, пористость, шламограмма и другие). Также для улучшения зарезки возможны: применение долот с короткой и более агрессивной калибрующей частью, КНБК меньшей «жесткости», либо КНБК с включением гибкого элемента в интервале верхнего плеча, установка максимального угла перекоса в ГЗД, при котором возможно вращение КНБК ротором.

4.3. Требования к профилям разветвленных РГС

Требования к профилям разветвленных РГС выработаны на примере рассмотрения двухзабойной скважины, для которой на основе традиционной методики [77] расчета трехинтервального профиля (Рисунок 2.3) получены формулы расчета (Таблица 2.1). Профиль разветвленной РГС также плоский и состоит из трех аналогичных участков, только расположены они не в вертикальной, а в горизонтальной плоскости (Рисунок 2.4).

При этом приняты следующие допущения [79]: во-первых, за точку отсчета (вместо устья) принят статичный башмак эксплуатационной колонны (начало ГУ); во-вторых, основной плоскостью проекции является плоскость симметрии, разветвленной РГС, являющаяся одновременно плоскостью вхождения

эксплуатационной колонны в пласт - разветвленно-горизонтальные стволы РГС лежат симметрично относительно апсидальной плоскости.

В зависимости от интенсивности искривления при ограниченной длине стволы РГС могут иметь двух- или трехинтервальный профиль. Параметры профиля РГС при различной величине радиуса его кривизны определяются величиной интенсивности и минимальной проходкой по пласту, при которой стволы можно развести на требуемые 90° (Таблица 4.1).

Исходными данными для расчета являются:

- формулы для расчета профиля РГС (Таблица 2.1);
- стволы «разводятся» на 90° (угол разведения стволов относительно плоскости симметрии $\gamma_2 = 45^\circ$);
- длина первого (прямолинейного «направляющего») интервала подбирается из условия расположения компоновки низа буровой колонны (КНБК) с телеметрической системой в открытом стволе и составляет $A_1 = 30$ м;
- длина каждого ствола (от башмака эксплуатационной колонны до забоя) $L = 100 \dots 200 = 150$ м;
- интенсивность набора угла $i_2 = 2 \dots 10^\circ / 10$ м.

Как видно из результатов расчета (Таблица 4.1), при интенсивности искривления менее $4^\circ / 10$ м возможно строительство только двухинтервального профиля РГС (длиной 150 м) и есть вероятность не «разведения» стволов под прямым углом, что снижает вероятность пересечения удаленных от основного ствола проницаемых участков.

Если же интенсивность искривления в интервале набора кривизны $4^\circ / 10$ м и более, возможно пробурить трехинтервальный РГС с «прямым углом» между забоями (участком стабилизации), при этом длина участка стабилизации составит $L_3 = 7,5 \dots 75$ м, расстояние между забоями стволов – $S = 149 \dots 182$ м, длина стволов – по 150 м. В данном случае, по азимутальному направлению участков стабилизации в пласте можно определить (контролировать) фактический угол разведения стволов РГС. На практике имеется опыт бурения профилей скважин диаметром 120,6–155,6 мм с интенсивностью набора пространственного угла

4°/10 м и более с применением как забойных двигателей типа ДРУ-95 [81], так и с использованием колтюбинга (ГНКТ), а также с интенсивностью до 5–6°/10 м за счет применения роторно-управляемых систем (РУС). Следовательно, бурение ответвлений РГС с участком стабилизации в интервале их окончательного забоя технически реализуемо. Либо возможно бурение ответвлений РГС большой протяженности при меньших интенсивностях набора кривизны.

Таблица 4.1 – Расчет профиля разветвленной двухзабойной скважины для разных значений интенсивности искривления [79]

Интервал профиля	Расчетная формула	Расчетные значения			
Исходные данные					
Угол разведения стволов относительно плоскости симметрии	γ_2 , град.	45	45	45	45
Длина первого интервала	A_1 , м	30	30	30	30
Длина каждого ствола	L , м	150	150	150	150
Интенсивность набора угла	i_2 , град/10м	4	6	8	10
Расчетные данные, м					
Прямолинейный направляющий интервал	$L_1 = A_1$	30,0	30,0	30,0	30,0
	$S_1 = 0$	0,0	0,0	0,0	0,0
	$A_1 = A_1$	30,0	30,0	30,0	30,0
Интервал набора кривизны	$R_2 = 57.3/i_2$	143,3	95,5	71,6	57,3
	$L_2 = 0.01745 \cdot R_2 \cdot \gamma_2$	112,5	75,0	56,2	45,0
	$S_2 = R_2 \cdot (1 - \cos \gamma_2)$	68,0	45,3	34,0	27,2
	$A_2 = R_2 \cdot \sin \gamma_2$	121,9	81,3	60,9	48,8
Интервал стабилизации	$L_3 = L - L_1 - L_2$	7,5	45,0	63,8	75,0
	$S_3 = L_3 \cdot \sin \gamma_2$	6,4	38,3	54,3	63,8
	$A_3 = L_3 \cdot \cos \gamma_2$	3,9	23,6	33,5	39,4
ИТОГО	$L = L_1 + L_2 + L_3$	150,0	150,0	150,0	150,0
	$S = 2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3)$	148,8	167,3	176,5	182,0
	$A = A_1 + A_2 + A_3$	155,8	134,9	124,4	118,2

В связи с тем, что в процессе эксплуатации залежи близко располагающиеся стволы РГС могут оказывать друг на друга взаимное влияние целесообразно также установить приемлемую величину круга допуска по основному горизонтальному стволу и боковым ответвлениям. Определим величину круга допуска $r_{доп}$ для «опорных» точек профиля – окончания каждого интервала L1, L2, L3 разветвленно-горизонтальных стволов РГС (Рисунок 2.4).

В эксплуатационном бурении величина радиуса круга допуска зависит от глубины скважины и шага сетки разбуривания (расстояния между двумя его точками). Согласно [82], она определяется как меньшее значение системы уравнений (4.1):

$$R_{доп} = \begin{cases} \text{глубина скважины} / 20 \\ \text{сетка разработки} / 5 \end{cases}, \text{ м} \quad (4.1)$$

Так как бурение ответвлений РГС в пределах пласта по сути является уплотняющим бурением, а длина разветвленных стволов небольшая, то и величина радиуса допуска должна быть соответствующей, кратно меньшей чем расстояния между забоями РГС – по аналогии с [82], ее величина для забоев РГС по расчетным данным (Таблица 4.1) предлагается определять по системе уравнений:

$$r_{доп} = \begin{cases} A / 20 \\ L_{скв} / 20 \\ S / 5 \end{cases} = \begin{cases} (118...156) / 20 \\ (2300...4300) / 20 \\ (149...182) / 5 \end{cases} = \begin{cases} 6...8 \\ 115...215 \\ 30...36 \end{cases} \quad (4.2)$$

Следовательно, в случае, когда забои РГС необходимо развести с удалением от основного ствола РГС на 150 м, забои ответвлений должны попадать в круг допуска радиусом 30 м (для попадания в круг допуска величиной 6–8 м на больших глубинах дополнительно требуется дорогостоящее геонавигационное оборудование).

Таким образом, для качественной проводки РГС должны выполняться следующие условия (критерии эффективности проводки) [79]:

– интенсивность искривления в интервале набора кривизны (L2) предпочтительна $2,5\text{--}3,0^\circ/10\text{ м}$, а при возможности – свыше $4,0^\circ/10\text{ м}$ (Рисунок 2.4);

– фактический угол разведения стволов необходимо определять по разнице между азимутальными углами участков стабилизации (L3) первого и второго стволов (либо основного ГУ и бокового ответвления);

– допустимый радиус круга допуска в горизонтальной проекции ($r_{\text{доп}}$) в конце участков набора кривизны и стабилизации (забоя) профиля разветвленной РГС составляет не более 30 м (существующие телеметрические системы позволяют выдержать такой круг допуска в зависимости от точности приборов, глубины, широты и азимута бурения);

– после набора кривизны должен быть выдержан участок стабилизации (L3) для оценки фактического угла разведения стволов по отношению друг к другу.

Данные показатели (требования) к профилям должны быть отражены в проекте на бурение и при анализе результатов строительства РГС.

Выводы по главе 4

1. Обоснована технология строительства РГС, обеспечивающая более технологичный процесс «зарезки» нового ствола в открытом ГУ и гарантированный спуск хвостовика в основной горизонтальный ствол.

2. Установлено, что при локальном подъеме профиля перед интервалом зарезки нового ствола в открытом ГУ площадь контакта вооружения долота с горной породой в наработанном «уступе» увеличивается до двух раз, существенно повышая вероятность успешной зарезки нового ствола в сравнении с существующими способами наработки желоба в открытом стволе.

3. Определены наиболее технологичные виды разветвленно-горизонтальных профилей и измеряемые технологические показатели для оценки успешности их бурения.

4. Рекомендовано апробировать на скважинах с тремя и более забоями усовершенствованный способ зарезки стволов в необсаженном интервале.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫСЛОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН

5.1. Методика промысловых испытаний разработанных решений

Анализ опыта строительства РГС свидетельствует о наличии технологических сложностей при бурении скважин с четырьмя и более забоями [23]. В связи с этим при проведении промысловых исследований осуществлялась оценка технологической эффективности методики проектирования профиля и технологии зарезки ответвлений и т.д. Объектом исследований являются РГС с тремя-пятью забоями, пробуренные в 2013 году.

Стандартная технология до проведения ОНР (1 кв. 2009 г. – 1 кв. 2013 г.) предполагает проектирование и бурение РГС без локального изменения профиля в интервале срезки. Разработанный в работе подход подразумевает определение конфигурации профиля РГС с учетом комплекса геолого-технических ограничений, проектирование профиля РГС с локальным его изменением в интервале зарезки ответвлений. Реализация данных решений направлено на:

- учет существующих геологических и технических ограничений (по используемому буровому и телеметрическому оборудованию) при предпроектной оценке возможности бурения РГС;
- повышение коммерческих скоростей бурения РГС;
- гарантированный спуск хвостовика в основной ГУ скважины.

Данные показатели приняты в качестве критериев оценки промысловых результатов.

В работе представлен пример реализации разработанных решений по проектированию и бурению РГС, на примере четырехзабойной скважины № 8829Г куста № 908 Нивагальского месторождения. Данная РГС была первой из четырех-пятизабойных скважин, пробуренных на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

5.2. Результаты внедрения методики проектирования РГС

РГС № 8829Г проектировалась в сентябре 2013 г.

Специалистами в области разработки месторождений был определен участок для реализации многозабойного бурения (Рисунок 5.1). В виду заложения скважины на целевой пласт АВ2 с риском подтягивания конуса обводнения и получения обводненной продукции, в оснастку заканчивания основного ГУ планировалось включить заколонные набухающие пакеры, разобщающие ответвления между собой вдоль основного ГУ. Кроме основного ГУ необходимо было пробурить три боковых ответвления с удалением их от основного ствола на 100–150 м. Протяженность основного ГУ составляет 600 м, смещение от устья скважины на точку Т1 – 745 м.

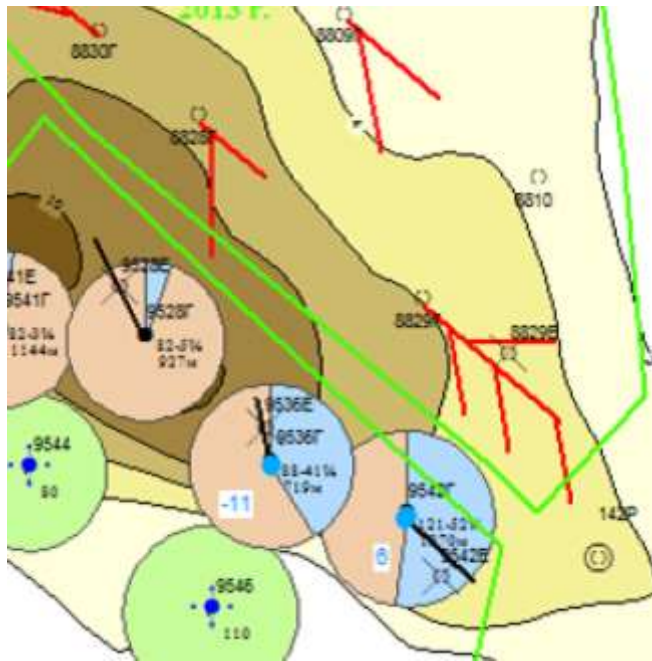


Рисунок 5.1 – Участок заложения РГС № 8829Г

В соответствии с разработанными критериями оперативной оценки сложности профиля скважины (Таблица 3.2) было определено, что профиль планируемой скважины № 8829Г признается технологичным: проектное смещение на точку вскрытия целевого пласта 745 м при минимально требуемом 600 м, разница азимутов на точку Т1 и основного ГУ не превышает 90°. Так как

РГС соответствует критериями оперативной оценки сложности профиля на первой стадии планирования принято, что профиль может быть реализован с применением ГЗД. В соответствии с этим для дальнейших расчетов приняты:

$$L_{\text{КНБК}} = 50 \text{ м} - \text{ожидаемая длина КНБК};$$

$$L_{\text{непромера}} = 20 \text{ м} - \text{ожидаемая длина «зоны непромера» ЗТС};$$

$$i = 2 \dots 3 \text{ ‰} / 10 \text{ м} - \text{ожидаемая интенсивность набора кривизны в ответвлениях}.$$

Согласно разработанной методике определено возможное количество ответвлений по формулам (3.33) – (3.35):

$$N_{\text{max}(1)} \approx \frac{L_{(t1-t3)} - 7 \cdot L_{\text{непромера}}}{4 \cdot L_{\text{непромера}}} = \frac{600 - 7 \cdot 20}{4 \cdot 20} = 5,75.$$

$$N_{\text{max}(2)} \approx 2 \cdot \left(\frac{L_{(t1-t3)}}{S_{\text{ответвления}}} - 1 \right) = 2 \cdot \left(\frac{600}{120 \dots 150} - 1 \right) = 6 \dots 8.$$

$$N_{\text{max}(3)} \approx \frac{L_{(t1-t3)}}{L_{\text{срезок(пакер)}}} - 1 = \frac{600}{166 \dots 185} - 1 = 2,24 \dots 2,61.$$

где $L_{\text{срезок(пакер)}} = C \cdot i^D + L_{\text{желоба}} = 237,05 \cdot (2,0 \dots 3,0)^{-0,567} + 25 = 166 \dots 185 \text{ м}.$

$$C = 34,146 \cdot R_{\text{интерф.}}^{0,4953} = 34,146 \cdot 50^{0,4953} = 237,05.$$

$$D = -0,0015 \cdot R_{\text{интерф.}} - 0,492 = -0,0015 \cdot 50 - 0,492 = -0,567$$

$R_{\text{интерф.}} = 50 \text{ м}$ – условно принятая величина зона интерференции между ответвлениями и основным ГУ в РГС.

Из полученного диапазона $\{N_{\text{max}(1)}; N_{\text{max}(2)}; N_{\text{max}(3)}\}$ выбрано меньшее значение, которое и принято за максимальное возможное количество ответвлений РГС. Минимальное количество ответвлений составляет два, однако с учетом того, что принятая в расчетах величина интерференции носит условный характер, решено было увеличить количество ответвлений до трех.

Точки зарезки ответвлений приняты:

- для первого ответвления – на удалении свыше 50 м от башмака эксплуатационной колонны (с превышением ожидаемой длины КНБК $L_{\text{КНБК}}$);

- для последующих ответвлений – на удалении от предыдущей точки зарезки, превышающем минимально допустимую величину (3.39):

$$L_{\text{срезок}(min)} = L_{\text{непромера}} + 35 \text{ м} = 20 + 35 = 55 \text{ м}$$

Далее определена удаленность забоя ответвления от основного ствола РГС (3.40) - (3.43):

$$S_{\text{отв.1}} = S_{\text{ответвления}} = 125 \dots 150 \text{ м}$$

$$S_{\text{отв.2}} = 573,3 \cdot i^{-1} = 573,3 \cdot (2,0 \dots 3,0)^{-1} = 191 \dots 286,5 \text{ м}$$

$$S_{\text{max}} = \max \left\{ \begin{array}{l} S_{\text{отв.1}} \\ S_{\text{отв.2}} \end{array} \right\} = 286,5 \text{ м}$$

$$S_{\text{отв.3}} = \left\{ \begin{array}{l} R_{\text{интерф.}} \\ \text{или} \\ 0,80 \cdot S_{\text{max}} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 50 \\ \text{или} \\ 0,80 \cdot 286,5 \end{array} \right\} = 50 \text{ м}$$

На основании полученного диапазона $\{S_{\text{отв.1}}; S_{\text{отв.2}}; S_{\text{отв.3}}\} = 50 \dots 286,5 \text{ м}$ по результатам моделирования в ГГДМ, определено оптимальное смещение забоя ответвления $S_{\text{оптим.}}$ (от основного ствола РГС). В данном случае минимально требуемое удаление забоя ответвления от основного ГУ было изначально установлено в диапазоне 100–150 м. Эта величина соответствует расчетному диапазону, в связи с чем, принято $S_{\text{заб.}} = 120 \dots 150 \text{ м}$.

В зависимости от варьирования $i = 2-3 \text{ ‰} / 10 \text{ м}$ и $S_{\text{оптим.}} = 120-150 \text{ м}$ определена величина (Рисунок 3.23) по формуле (3.44):

$$A_{\text{заб.}(min)} = \sqrt{\left(\frac{573,3}{i}\right)^2 - \left(\frac{573,3}{i} - S_{\text{оптим.}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{573,3}{2,0 \dots 3,0}\right)^2 - \left(\frac{573,3}{2,0 \dots 3,0} - 120 \dots 150\right)^2} = 186,5 \dots 233,2 \text{ м}$$

С учетом полученных результатов определена технически реализуемая область заложения забоев ответвлений (3.45):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{\text{заб.}} = 120 \dots 150 \text{ м} \\ A_{\text{заб.}} \geq 186,5 \dots 233,2 \text{ м} \end{array} \right.$$

Таким образом, по результатам предварительной оценки было установлено, что скважина № 8829Г может иметь до трех забоев, с расстоянием между точками резки соседних ответвлений более 55 м, смещением забоев ответвлений относительно точек их резки – вдоль основного ГУ на величину $A_{\text{заб.}} \geq 186,5 \dots 233,2 \text{ м}$ и с удалением от основного ГУ на $S_{\text{заб.}} = 120 \dots 150 \text{ м}$. При предварительной оценке принято, что профиль данной РГС может быть

реализован с бурильной компоновкой, включающей ГЗД, в соответствии с чем, согласно определенным специалистами в области разработки координатам начала и окончания основного ГУ и ответвлений (Таблица 5.1) в дальнейшем Недропользователем выполнена оценка экономической целесообразности бурения РГС № 8829Г и сформировано техническое задание на разработку индивидуального технического проекта (ИТП).

Таблица 5.1 – Координаты начала и окончаний стволов в РГС № 8829Г

Наименование ствола		Декартовы координаты	
		Долгота	Широта
Основной ГУ	начало (точка Т1)	336859,0	828699,6
	окончание (точка Т2)	337318,6	828453,4
Ответвление G1	начало ответвления	336935,6	828956,7
	окончание ответвления	336979,0	828710,5
Ответвление G2	начало ответвления	336989,2	828911,7
	окончание ответвления	337239,2	828911,7
Ответвление G3	начало ответвления	337065,8	828847,4
	окончание ответвления	337109,2	828601,2

В рамках разработки ИТП был просчитан профиль скважины (Рисунок 5.2) и выполнен комплекс инженерных расчетов и уточнены технико-технологические решения, в соответствии с которыми подтверждено, что бурение РГС осуществимо с применением стандартного ГЗД. Профиль РГС в интервале срезки был запланирован с учетом обеспечения в точках зарезки ответвлений - локального подъема профиля, а по основному ГУ – локальное падение зенитного угла в этих участках. В частности, для формирования бокового ответвления с пространственной интенсивностью 2,5°/10 м, принята величина интенсивности по зенитному углу 1,5°/10 м, по азимуту – 2,0°/10 м. При построении профиля набор уступа (локальный подъем) выполняется за 10 м (разворот по азимуту на 2°, набор по зениту с 90° до 91,5°), в следующие 10 м осуществляется завершение локального подъема профиля с падением зенитного угла с 91,5° до 90° (при сохранении набора с разворотом по азимуту еще на 2°). Ниже интервала с «локальным подъемом-падением ЗУ» осуществляет набор кривизны в азимутальной плоскости, обеспечивающей попадание ответвления в проектный забой.

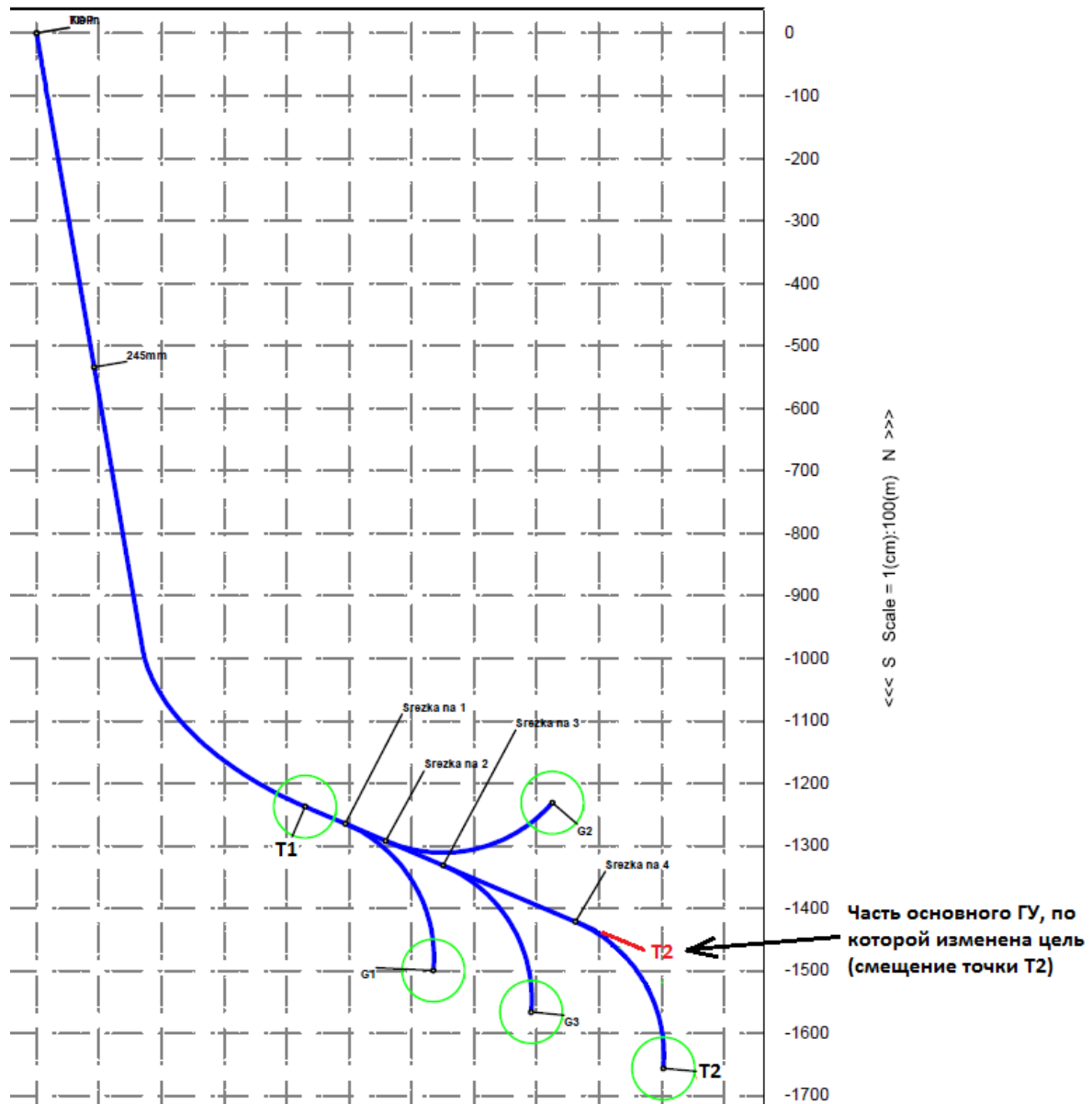


Рисунок 5.2 – Проектный профиль РГС №8829Г (горизонтальная проекция)

Благодаря такой форме профиля в дальнейшем скважина была пробурена без существенных отклонений от проект с реализацией проектного профиля (Рисунок 5.3) - начата бурением 01.10.2013 г., эксплуатационная колонна 178 мм спущена на глубину 2429 м и зацементирована 01.11.2013 г., бурение горизонтальных участков начато 20.11.2013 г (после разбуривания цементного стакана и оснастки эксплуатационной колонны до глубины 2434 м, записи ГК в интервале 2365–2434 м), скважина закончена бурением 21.12.2013 г.

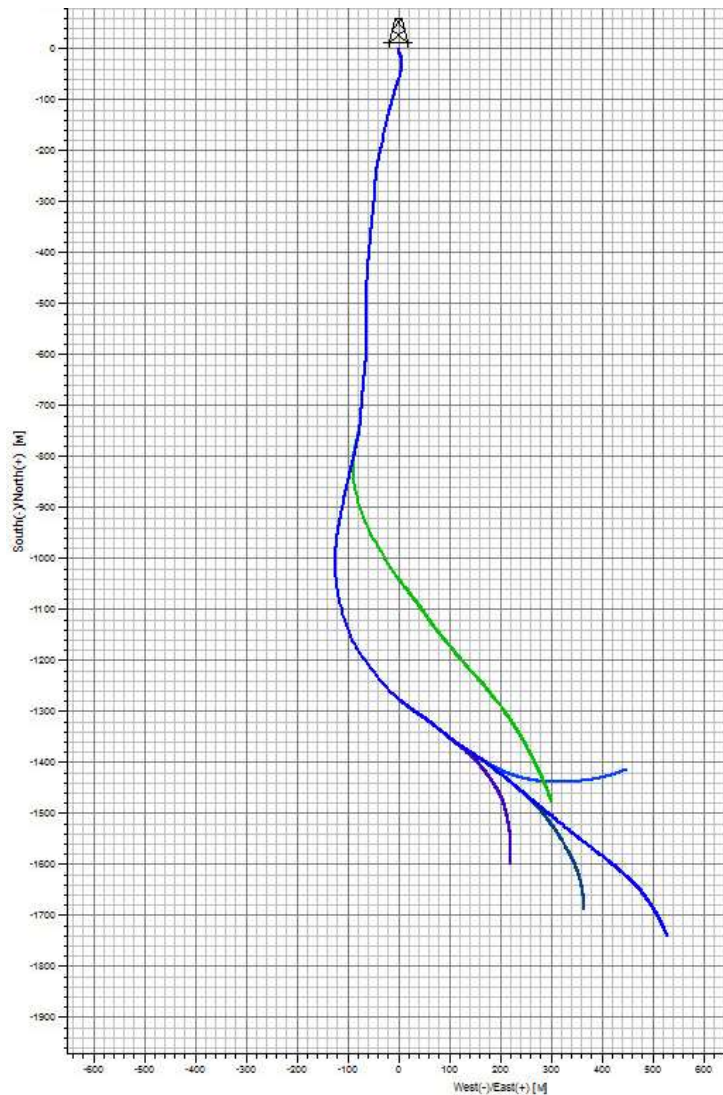


Рисунок 5.3 – Фактический профиль РГС № 8829Г (горизонтальная проекция)

Следует отметить, что в процессе проектирования Недропользователем было принято решение об изменении окончательного забоя основного ГУ (точки T2), как указано на Рисунке 5.2. В процессе проводки на изменённую цель (точку T2) бурение основного ГУ было остановлено за 30 м до планового забоя (Таблица 5.2), по причине недохождения нагрузки на долото. «Зависание» компоновки на данной глубине было зафиксировано по показаниям датчика нагрузки на долото и было обусловлено применением бурильного инструмента, отличного от предусмотренного в ИТП. Данное отклонение можно считать не существенным, т.к. профиль основного ГУ попал в круг допуска (радиусом 50 м от цели T2).

Таблица 5.2 – Основные сведения по применению наддолотного модуля CoPilot при бурении ГУ в РГС № 8829Г Нивагальского месторождения

№ ГУ	Интервал ГУ, м			
	проект		факт	
	от	до	от	до
1 (на G1)	2408	2800	2429	2792
2 (на G2)	2508	2879	2501	2874
3 (на G3)	2578	2957	2574	2947
4 (на T2)	2678	3106	2675	3087

После апробирования при проектировании РГС во 2–4 кварталах 2013 г. методика была включена в разработанный автором «Технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» (приказ о введении в действие № 23 от 04.02.2015) [84]. С февраля 2015 г. по февраль 2018 г. на основании указанного регламента запланированы, спроектированы и успешно пробурены 15 четырех-шести и 106 трехзабойных РГС (Приложения А-В).

5.3. Результаты внедрения технологии строительства РГС

Предложенная в работе технология зарезки основного ствола из отходящего в сторону ответвления предусмотрена в ИТП на строительство РГС № 8829Г.

Скважина пробурена период 01.10.2013-21.12.2013 в соответствии с проектными решениями и реализацией проектного профиля (Рисунок 5.4). Общее время на строительство горизонтального участка – 744,5 ч. Проектный горизонт АВ2. Длина (проект/факт) основного горизонтального ствола – 610/658 м, ответвления №1 – 89/294 м, ответвление №2 – 428/306 м, ответвление №3 – 369/279 м. Интервал открытого ствола от башмака эксплуатационной колонны до точки срезки №1 – 69 м, точки срезки №2 – 139 м, точки срезки №3 – 239 м. Таким образом, расстояние между соседними точками срезов в РГС составило 100 м. Для бурения в интервале продуктивного пласта применялась прямая

эмульсия плотностью 990–1010 кг/м³, по применению которой имеется положительный опыт промышленных работ

1) После достижения забоя 2792 м первого ответвления (цели G1) проведена СПО инструмента для смены КНБК с включением в оснастку многодатчикового модуля CoPilot, передающего в режиме реального времени одновременно с показаниями ЗТС следующие измеряемые показатели:

- нагрузка на долото (на забое), тонн;
- момент (на забое), кН/м;
- момент изгиба, кН/м;
- дифференциальное давление, условные единицы (0–7);
- наличие вихревого движения долота, условные единицы (0–7);
- неравномерность вращения КНБК, условные единицы (0–7);
- подскакивание долота на забое, условные единицы (0–7);
- поперечные вибрации, условные единицы (0–7).

В режиме бурения и передачи данных в реальном времени, все параметры, полученные от CoPilot контролировались, соответственно обеспечивали возможность оперативного реагирования инженеров по направленному бурению.

2) После спуска КНБК с системой регистрации параметров бурения CoPilot начаты работы по наработке желоба с глубины 2498 м и срезки во второй ствол (на цель G2), при этом компоновка имела следующий состав:

Долото БИТ 155,6 ВТ 613 ТВ.000ФО (насадки 6x9.5мм) № 16321– 0,19м; ВЗД 4 3/4" Ultra X-treme M1XP/LS (ND4–5), Ø123.6/130.3мм заходность 5/6, угол отклонителя 1.8 град. № 10323953– 6,71м; Переводник Ø 127.6 мм № 12204152– 0,91м; Телесистема OnTrak (датчики: резистивиметр, гамма, инклинометрия, модуль памяти) Ø 127мм № 12649774–6,14м; MWD - stab - mod (немагнитный стабилизатор) Ø 149/127.5мм № 12806005–1м; Пульсатор ВСРМ Ø 127,5мм № 11995785–3,34м; Модуль-CoPilot (модуль динамики бурения) Ø 127,5мм № 13046273–2,72м; NM - stab - string (немагнитный стабилизатор) Ø 144/127.5мм № 11888160–0,88м; ЛитоТрак (датчики: пористость, проницаемость) Ø 127мм № 13108460–4,4м; Переводник Ø 127.6мм № 106887731– 0,91м; Колонный

калибратор Ø 139/122мм № SBDR 6478–1,45м; Монель (немагнитная УБТ) Ø 122 № ZH10030196–8,9м; Переводник-Фильтр Ø 120мм № 11750149–1,5м; ТБ EU 89x9,35 "G105" (32 свечи) Ø 89мм № 2001/02–788,98м; УБТ-HWI -88.9x57 (8трубки) Ø 89мм № 2056–98,16м; Яс Ø 125,4 мм № 1420–7625–9,32м; УБТ-HWI -88.9x57 (4трубки) № 2056 - 49,08м; ТБ EU 89x9,35 "G105" № 2001/02 -ост.

Была сделана первая попытка «срезки» с не вращающейся компоновкой. После того, как началась срезка, CoPilot зафиксировал небольшую нагрузку на долото. В то же время перепад давления стал показывать некоторые признаки бурения. На основании всех поступающих данных от CoPilot было сделано предположение об успешности срезки и начале бурения бокового ствола. К сожалению, физико-механические свойства породы не давали возможности дальнейшего углубления в используемом режиме - компоновка стала уходить из бокового ствола обратно. Учитывая это, было принято решение продолжить бурение бокового ствола в режиме вращения. Таким образом, проблема была решена и ствол успешно пробурен. Время, затраченное на работы связанные с наработкой желоба и срезкой №1 во второй ствол, составило 22 ч (включая СПО и др. работы). Параметры режима срезка и бурения ответвление на цель G2 представлены на Рисунке 5.4.

После достижения забоя 2874 м (цели G2) проведен подъем инструмента для ревизии КНБК и системы CoPilot.

3) После спуска в скважину КНБК начаты работы по наработке желоба с глубины 2568 м и срезки в третий ствол (на цель G3), при этом компоновка имела следующий состав:

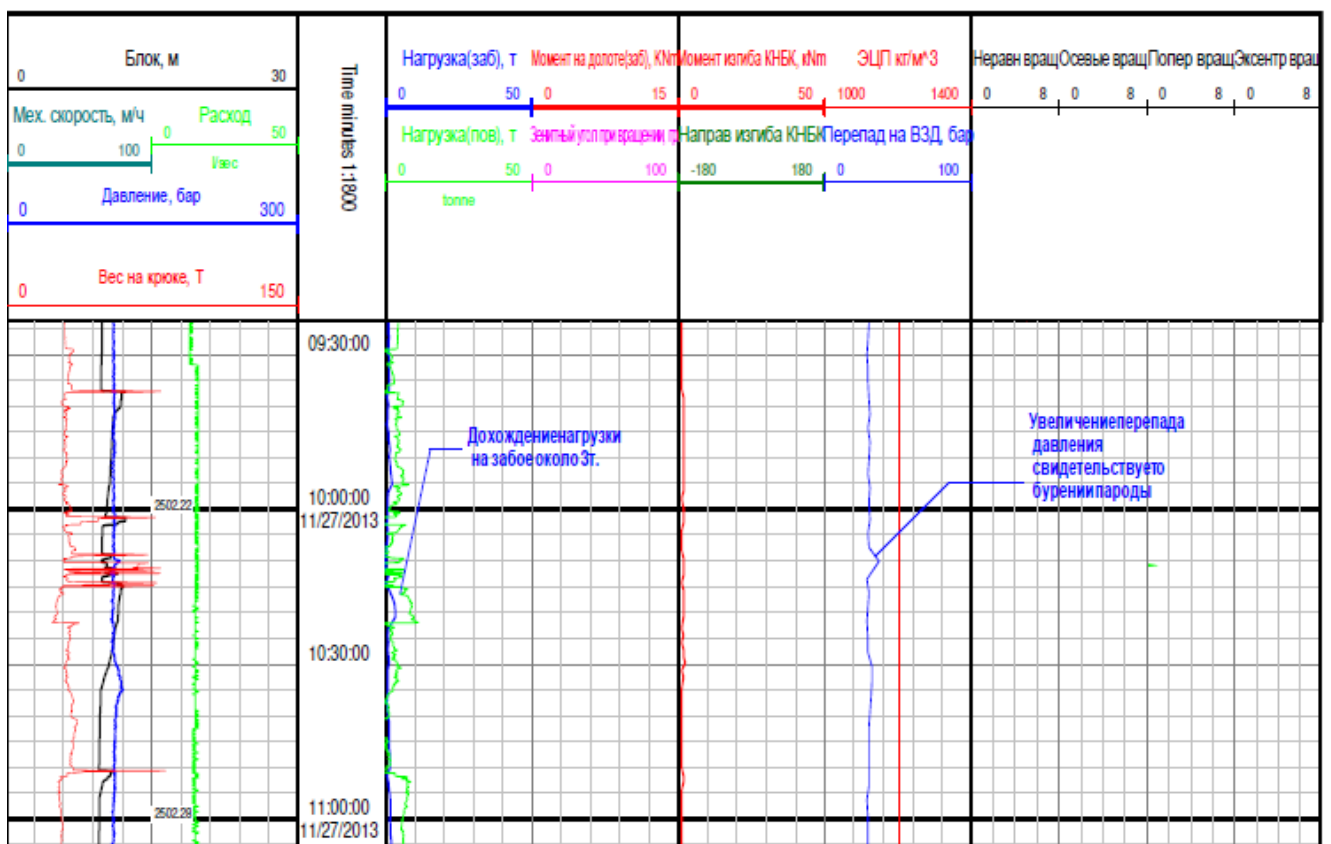
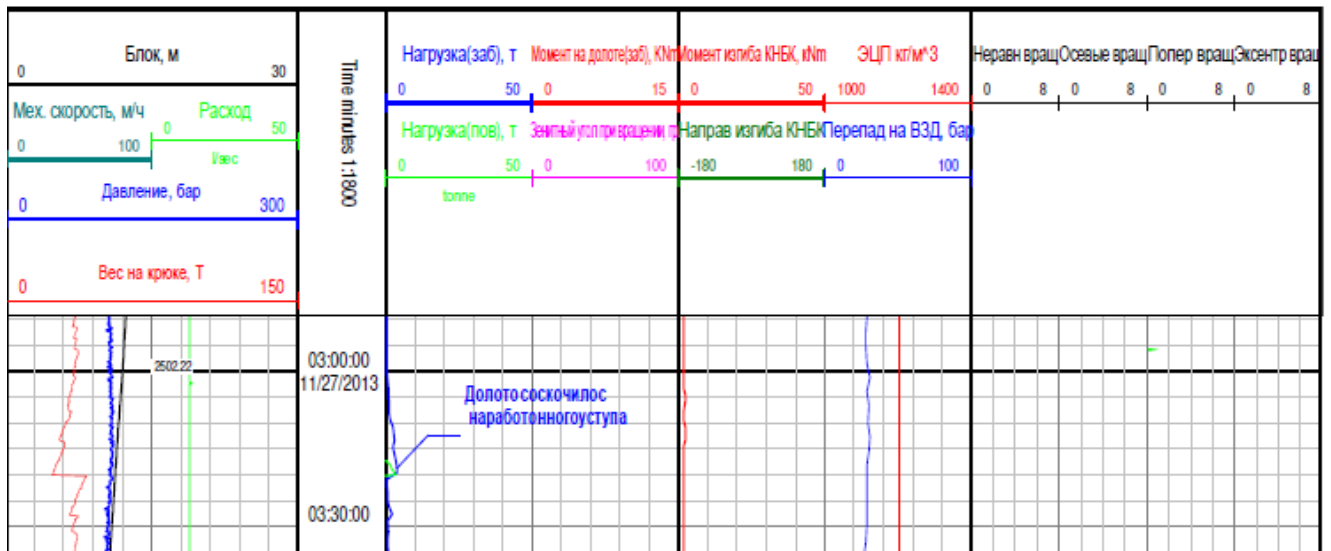


Рисунок 5.4 – Показатели режима бурения на цель G2

Долото БИТ 155,6 ВТ 613 ТВ.000ФО (насадки 6x9.5мм) № 16321– 0,19м; ВЗД 4 3/4" Ultra X-treme MIXP/LS (ND4–5), Ø123.6/130.3мм заходность 5/6, угол отклонителя 1.8 град. № 10323953– 6,71м; Переводник Ø 127.6 мм № 12204152– 0,91м; Телесистема OnTrak (датчики: резистивиметр, гамма, инклинометрия, модуль памяти) Ø 127мм № 12649774–6,14м; MWD - stab - mod (немагнитный

стабилизатор) Ø 149/127.5мм № 12806005–1м; Пульсатор ВСРМ Ø 127,5мм № 11995785–3,34м; Модуль-CoPilot (модуль динамики бурения) Ø 127,5мм № 13046273–2,72м; NM - stab - string (немагнитный стабилизатор) Ø 144/127.5мм № 11888160–0,88м; ЛитоTrak (датчики: пористость, проницаемость) Ø 127мм № 13108460–4,4м; Переводник Ø 127.6мм № 106887731– 0,91м; Колонный калибратор Ø 139/122мм № SBDR 6478–1,45м; Монель (немагнитная УБТ) Ø 122 № ZH10030196–8,9м; Переводник-Фильтр Ø 120мм № 11750149–1,5м; ТБ EU 89x9,35 "G105" (32 свечи) Ø 89мм № 2001/02–788,98м; УБТ-HWI -88.9x57 (8трубки) Ø 89мм № 2056–98,16м; Яс Ø 125,4 мм № 1420–7625–9,32м; УБТ-HWI -88.9x57 (4трубки) № 2056 - 49,08м; ТБ EU 89x9,35 "G105" № 2001/02 -ост.

Срезку на цель G3 выполнялась по аналогии с успешным опытом по первому ответвлению. В течении второго ответвления параметры бурения контролировались на основе данных, поступающих из CoPilot. Проблемы, с которыми столкнулись при срезке № 1, во втором ответвлении не наблюдались. Реализованный метод признан эффективным.

Наработка желоба производилась плавным спуском в интервале 2568–2574м с вращением инструмента 3000 об/мин со скоростью 0.5 м/ч. Нагрузка на долото на забое составляла 0,2–0,3 тонны. На поверхности нагрузка на долото составляла 1 тонну. По достижении глубины 2574м вращение было остановлено. После расхаживания инструмента без вращения, был нащупан уступ на глубине 2574м, после чего начали зарезку нового ствола скважины с установкой отклонителя в положении $GTF=150^\circ$ в интервале 2574–2577м, со скоростью 2–3 м/ч нагрузкой 1–3 тонны. Появился реактивный момент на долоте, свидетельствующий о начале процесса бурения. Далее продолжили бурение в обычном режиме согласно план-программы.

Из диаграммы видно (Рисунок 5.5), что в процессе бурения ротором нагрузка на долото не остается постоянной. В связи с этим нестабильность в управлении компоновки в виде увеличения ЗУ в профиле скважины, что может негативно сказываться на последующем направленном бурении. Был скорректирован режим нагружения инструмента. Для этого исходя из данных

показаний изгибающего момента (max 18кН*м), который в свою очередь соответствует интенсивности приблизительно 6–7 градусов на 30 метров (2,0...2,3 °/10 м), приняты меры по уменьшению и устранению изгибающего момента.

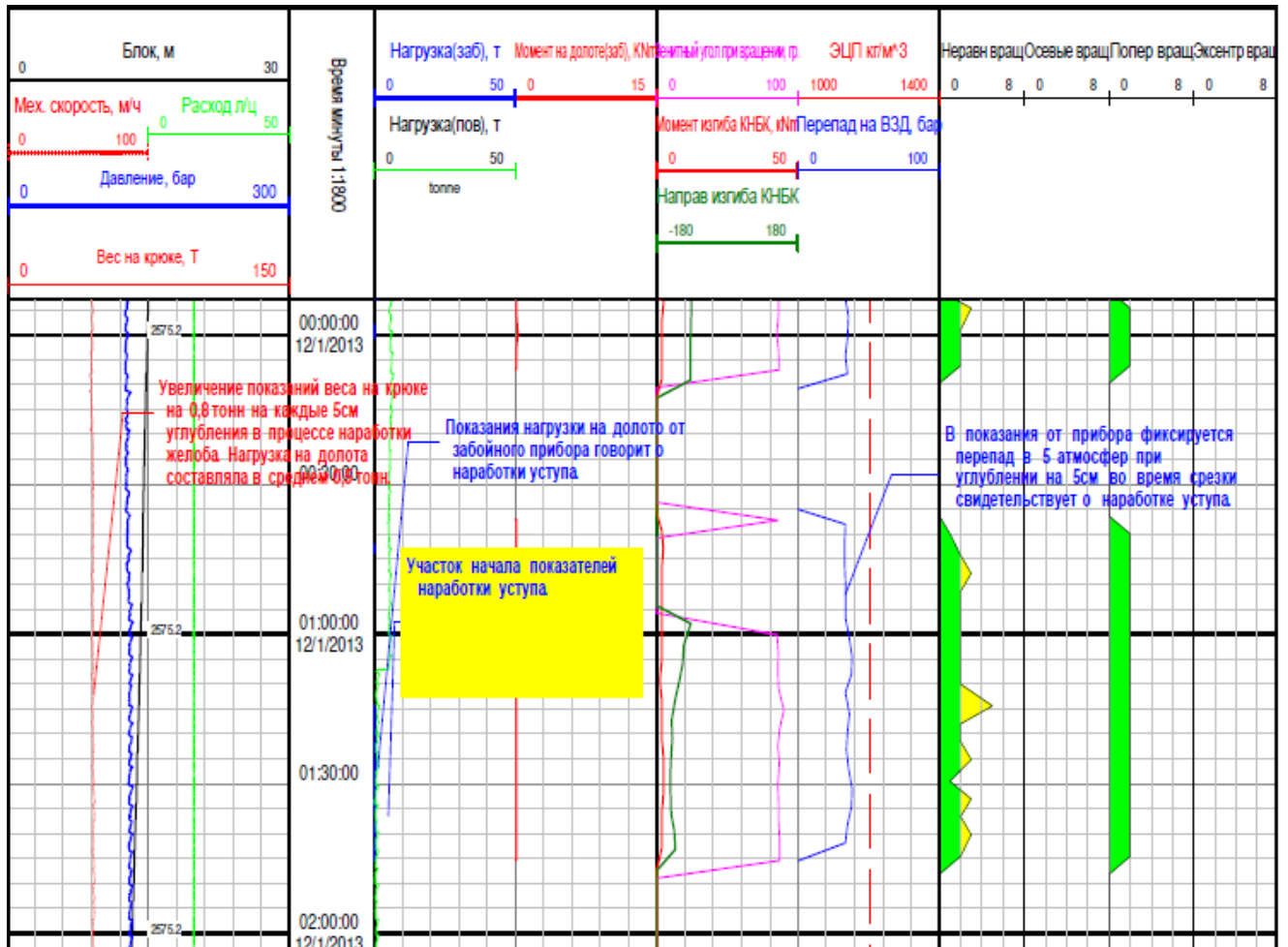


Рисунок 5.5 – Показатели режима бурения на цель G3

Время, затраченное на работы связанные с наработкой желоба и срезкой №2 в третий ствол, составило 14,6 ч (включая СПО и др. работы).

После достижения забоя 2947 м (цели G3) проведен подъем инструмента для ревизии КНБК и системы CoPilot.

4) Для бурения на окончательный забой (точку T2) использована компоновка, отличная от применяемой компоновки бурения предыдущего ответвления - КНБК включала модули телеметрии + CoPilot + ННК + ГТК. После

смены и спуска в скважину КНБК начаты работы по наработке желоба с глубины 2668 м и срезки в четвертый ствол (основной ГУ на цель Т2), при этом компоновка имела следующий состав:

Долото БИТ 155,6 ВТ 613 ТВ.000ФО(насадки 6x9.5мм) № 16279– 0,19м; ВЗД 4 3/4" Ultra X-treme M1XP/LS (ND4–5), Ø123.6/130.3мм заходность 5/6, угол отклонителя 1.8 град. № ZMTRBН13249– 6,71м; Переводник Ø 127.6 мм № 12204152–0,91м; Телесистема OnTrak (датчики: резистивиметр, гамма, инклинометрия, модуль памяти) Ø 127мм № 12649774–6,14м; MWD - stab - mod (немагнитный стабилизатор) Ø 149/127.5мм № 12806005–1м; Пульсатор ВСРМ Ø 127,5мм № 11995785–3,34м; Модуль-CoPilot (модуль динамики бурения) Ø 127,5мм № 13046273–2,72м; NM - stab - string (немагнитный стабилизатор) Ø 144/127.5мм № 11888160–0,88м; Переводник Ø 127.6мм № 106887731– 0,91м; Колонный калибратор Ø 139/122мм № SBDR 6478–1,45м; Монель (немагнитная УБТ) Ø 122 № ZH10030196–8,9м; Переводник-Фильтр Ø 120мм № 11750149–1,5м; ТБ EU 89x9,35 "G105" (32 свечи) Ø 89мм № 2001/02–788,98м; УБТ-НWI -88.9x57 (8трубки) Ø 89мм № 2056–98,16м; Яс Ø 125,4 мм № 1420–7625–9,32м; УБТ-НWI - 88.9x57 (4трубки) № 2056 - 49,08м; ТБ EU 89x9,35 "G105" № 2001/02 -ост.

Время, затраченное на работы связанные с наработкой желоба и срезкой №3 в четвертый ствол (на цель Т2), составило 28,8 ч (включая СПО и др. работы).

Проблем при бурении основного ГУ не возникало - нагрузка на долото в режиме вращения составляла 90 % от веса инструмента. Был обеспечен контроль над перегрузкой компоновки и долота, обеспечивая их работу в рамках эксплуатационных пределов. Однако в течении «режима направленного бурения» иногда имели место проблемы с доведением веса с поверхности на долота. В таких случаях инструмент разгружался с обеспечением дополнительного веса с поверхности и мониторингом веса на долоте.

В течении бурения в «режиме вращения» фиксировались вибрации. Были предприняты попытки по их устранению. Боковые колебания были устранены. После бурения слайдом во время перезаписи каротажа в роторном режиме частота вращения была снижена до 25 об/мин для снижения боковых вибраций на забое,

но крутильные колебания при этом сохранялись. Основная причина их существования - отсутствие возможности увеличения оборотов с поверхности. Границей эксплуатационных лимитов для забойного двигателя при угле перекоса 1,8° является частота в 35 об/мин. В режиме бурения скорость вращения была увеличена с 30 до 35 об/мин, во время перезаписи каротажа скорость снижена с 30 до 25 об/мин. После увеличения частоты вращения вибрации, связанные с вращением бурильной колонны, уменьшились. После 100 метров бурения крутильные колебания вновь возобновились.

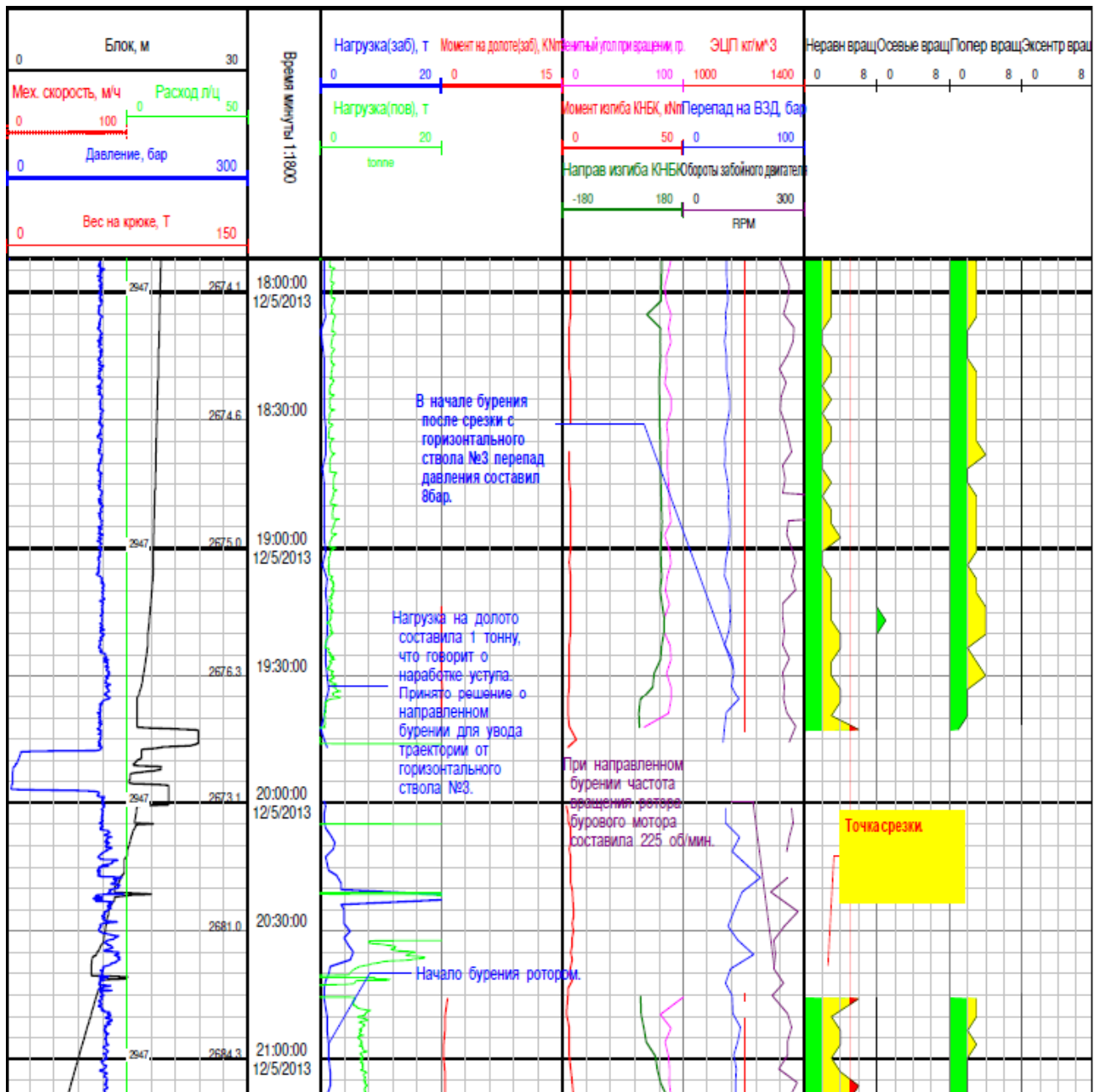


Рисунок 5.6 – Показатели режима бурения на цель Т2

Время срезок в РГС (наработка уступа под вооружением долота и непосредственно сам процессе зарезки) составило от 14,6 до 28,8 часов, что на 60% быстрее ранее полученных результатов (1-2 сутки) без использования разработанных в диссертационной работе решений.

5) После завершения работ по бурению основного ГУ выполнен контрольный подъем в башмак 178 мм колонны и проверочный спуск бурильной компоновки до окончательного забоя (до Т2), с шаблонированием ствола. Выполнен спуск хвостовика 114 мм с включением в его оснастку заколонных пакеров, разобщающих соседние ответвления по затрубному пространству хвостовика основного ГУ. Хвостовик установлен на глубине 2361–3081 м по стволу, нефтенабухающие пакеры - на глубинах 2537.5 м, 2631 м, 2772 м [28].

При этом интервал первого ответвления по стволу составляет 2504–2792 м, второго 2575–2874 м, третьего 2692–2947 м. Как видно, набухающие пакеры размещены:

- выше точек срезок 37,5 и 61,0 м;
- ниже точек срезок на 56 и 80 м.

Хвостовик в интервале между пакерами представлен фильтровой частью. Ответвления не обсаживались (Рисунок 5.7).

При спуске хвостовика 114 мм с включением в его оснастку пакеров существовал риск, что хвостовик вместо основного ГУ будет спущен в одно из ответвлений. Благодаря предложенной в работе специальной форме профиля в интервале срезки (локальное падение ЗУ в интервале разветвлений), спуск хвостовика выполнен в основной ГУ в штатном режиме. Успешность работ также подтверждалась по мере спускного инструмента: хвостовик спущен на глубину 3081 м при забое основного ГУ 3087 м, при этом забои ответвлений имеют меньшую глубину – 2792 м, 2874 м, 2947 м.

Скважина № 8829Г была первой четырехзабойной скважиной, пробуренной на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». После успешного выполнения работ на данной скважине следом успешно пробурена пятизабойная РГС № 9308Г куста № 461 Покачевского месторождения (Рисунок 5.8),

с дальнейшим тиражированием опыта строительства на ряде других месторождений, в том числе при промышленном разбурировании Пякяхинского месторождения системой РГС, преимущественно с тремя-пятью забоями.

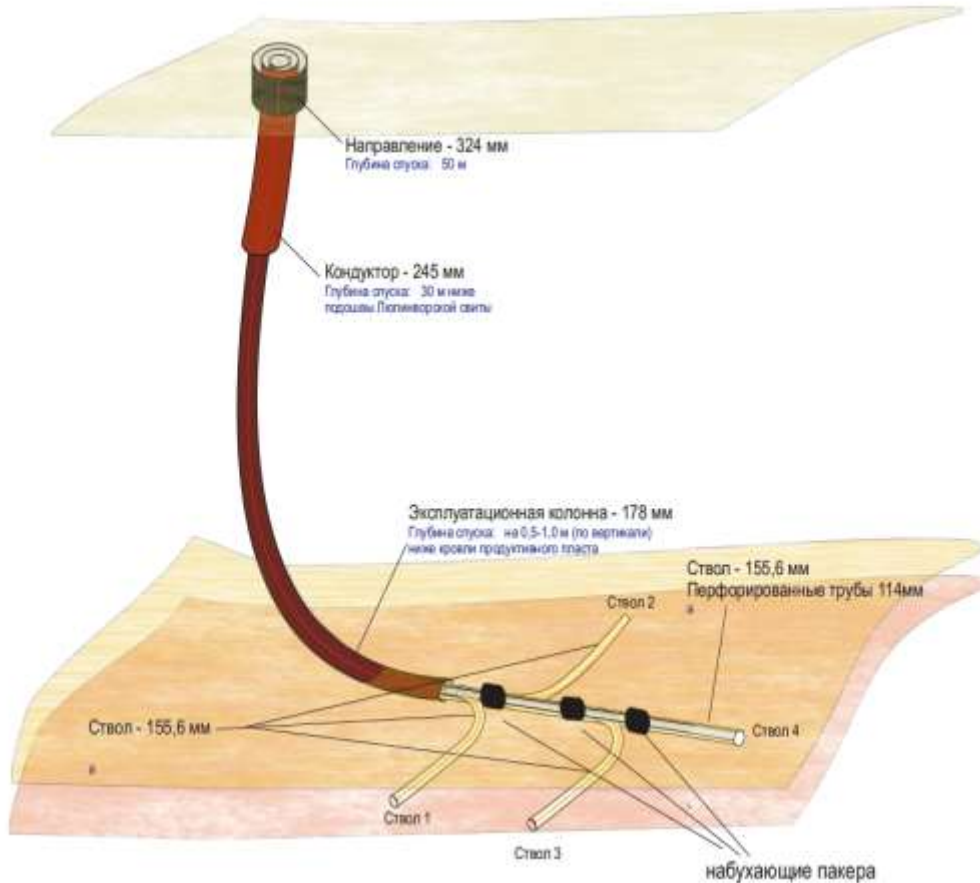


Рисунок 5.7 – Схема заканчивания РГС № 8829Г

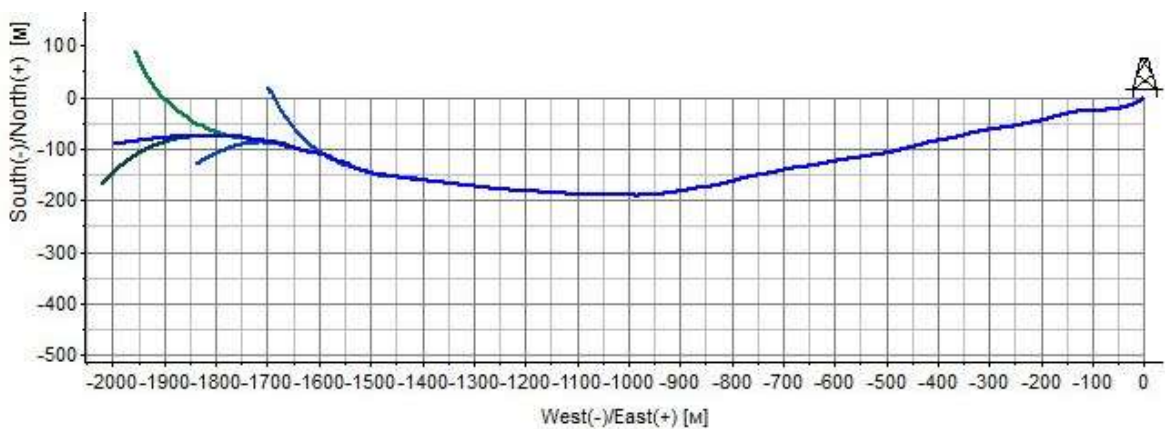


Рисунок 5.8 – Фактический профиль РГС № 9308Г (горизонтальная проекция)

Оценка результатов ОПР по бурению РГС с комплексом выработанных методических и технологических решений выполнена сопоставлением технико-экономических показателей строительства РГС, пробуренных на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» в более ранние периоды (2009–2013 гг.). Для этого весь массив данных был рассмотрен [89, 91] в разрезе групп пластов сопоставлением РГС, пробуренных с применением предложенных в данной работе технико-технологических решений и без их применения:

1) По группе пластов «А» первая двухзабойная РГС № 7322Г была пробурена сентябре-октябре 2009 г. на кусту № 751 Кечимовского месторождения, в ноябре-декабре 2012 г. пробурена вторая РГС № 1007Г куста № 790 Кечимовского месторождения. В феврале-марте 2013 г. пробурены двухзабойные РГС № 9207Г и № 9515Г Нивагальского месторождения, марте-апреле 2013 г. – двухзабойная РГС № 3332Г Лась-Еганского месторождения. Коммерческая скорость бурения данных РГС (Рисунок 5.9) составили 2098–2637 м/ст. мес. (в среднем 2333 м/ ст.-мес.).

На последующих двух- и трехзабойных РГС, пробуренных в период с марта по декабрь 2013 г. (№ 1016Г Кечимовского и №№ 9555Г, 9209Г, 9521Г, 9535Г, 6324Г Нивагальского месторождений), проведены ОПР с апробацией решений, разработанных в диссертационной работе. Коммерческие скорости бурения по данным скважинам составили 2891–3362 м/ст.-мес. (в среднем 3090 м/ст.-мес.).

2) По группе пластов «Б» к концу 2013 г. пробурены три РГС: двухзабойная № 8141Г пробурена в феврале-марте 2009 г. на кусту № 63 Дружного месторождения, трехзабойные РГС №№ 6622Г и 6624Г на кусту № 933 Нивагальского месторождения соответственно в июле-августе и сентябре-октябре 2013 г. Как видно представленных данных (Рисунок 5.10), после применения разработанных в работе решений коммерческая скорость увеличилась с 2267 м/ст.-мес. до 2688–2843 м/ст.-мес.

3) По группе пластов «Ю» к концу 2013 года пробурены пять двухзабойных и одна пятизабойная РГС (Рисунок 5.11):

- двухзабойные скважины без применения предложенных работе решений: № 7183Г Повховского месторождения пробурена в декабре 2009 г. - феврале 2010 г., №№ 1703Г и 1493Г Северо-Покачевского в феврале-июне 2013 г. Коммерческие скорости бурения по данным РГС составили 1412–1781 м/ст. мес. (в среднем 1565 м/ст.-мес.);

- с применением разработанных в работе решений: двухзабойные № 9916Г Покачевского (август-сентябрь 2013 г.) и № 1809Г Северо-Покачевского месторождений (ноябрь-декабрь 2013 г.), пятизабойная РГС № 9308Г Покачевского месторождения (ноябрь-декабрь 2013 г.). Комерческие скорости по данным скважинам составили соответственно 2151, 2216 и 2267 м/ст.мес. (в среднем 2211 м/ ст.мес.).

Таким образом, по группе пластов «А» прирост коммерческих скоростей бурения составил 32,4%, по группе пластов «Б» - 22%, по группе пластов «Ю» - 41,3% [89, 91, 93].

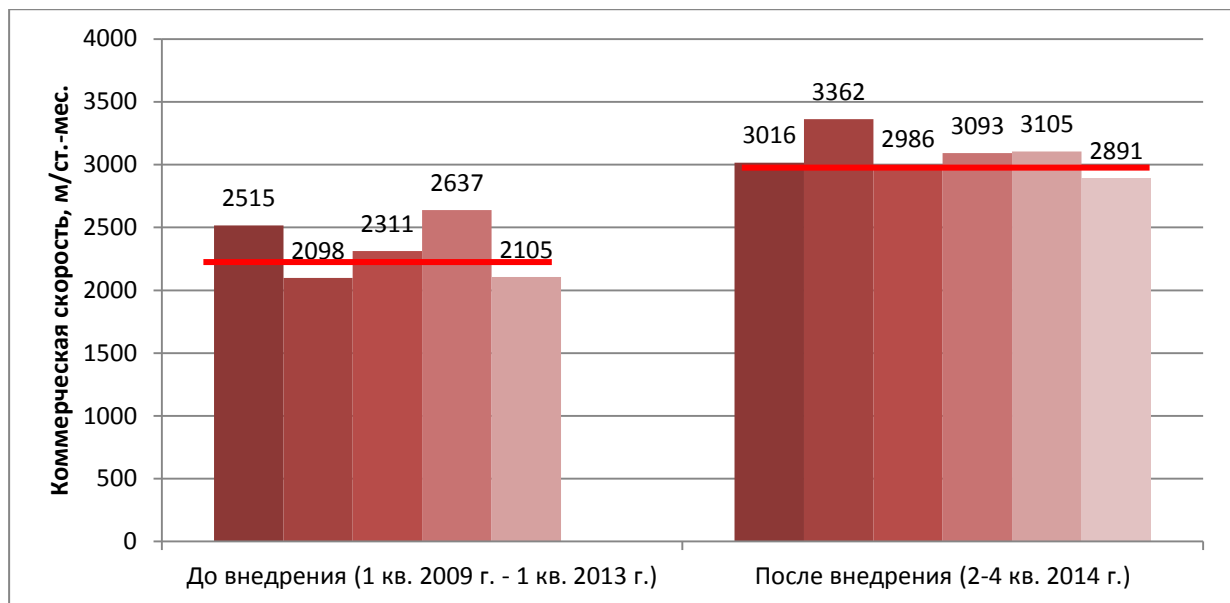


Рисунок 5.9 – Коммерческие скорости строительства РГС по группе пластов АВ с применением разработанных решений и без их применения

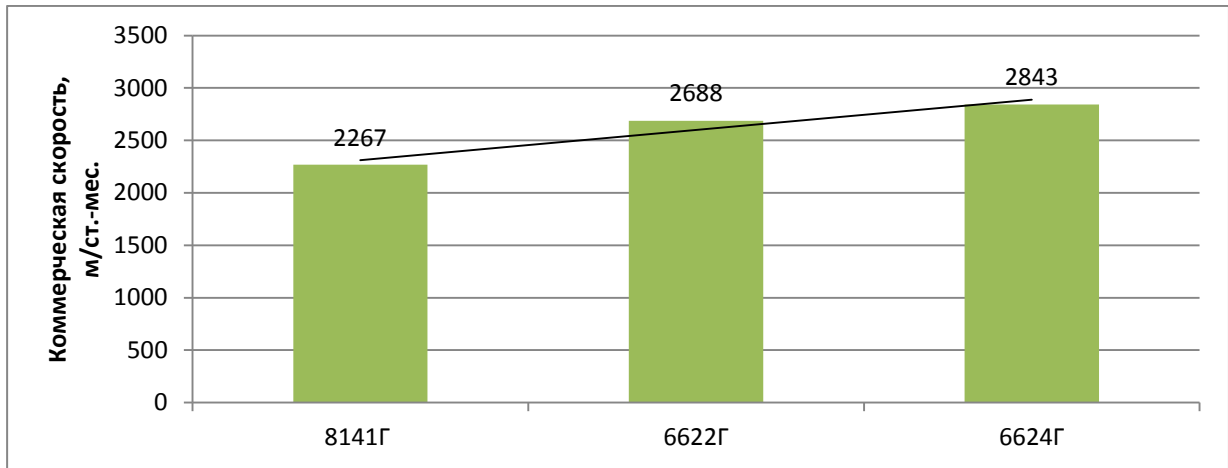


Рисунок 5.10 – Коммерческие скорости строительства РГС по группе пластов Б с применением разработанных решений (№№ 6622Г, 6624Г) и без их применения (№ 8141Г)

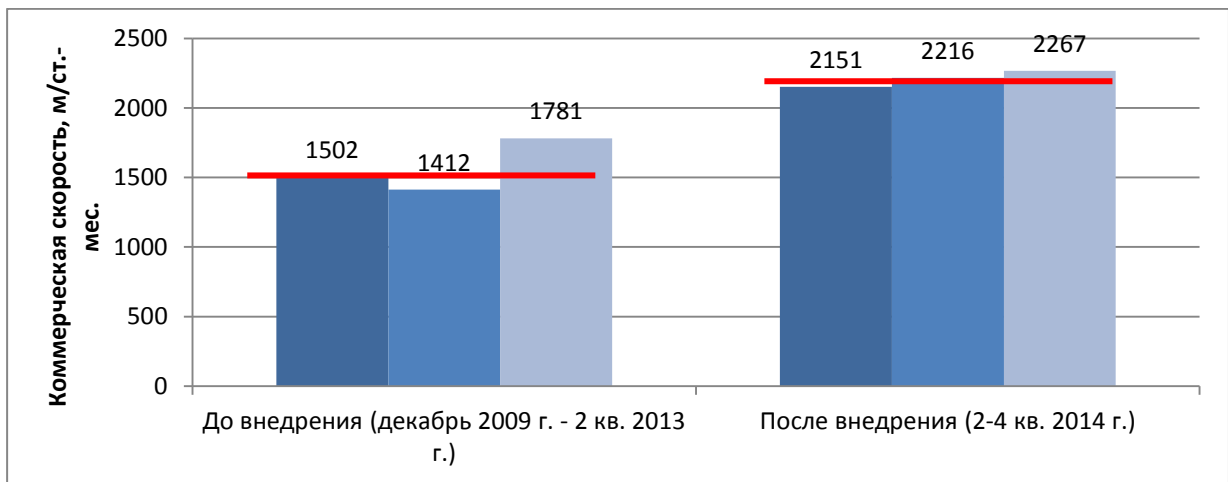


Рисунок 5.11 – Коммерческие скорости строительства РГС по группе пластов АВ с применением разработанных решений и без их применения

С учетом полученных результатов, с 2014 года, разработанные методика проектирования и технология резки ответвлений в РГС приняты к внедрению в ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». Если достигнутая в 2013 г. коммерческая скорость бурения РГС была ниже чем в ГС на 200 м/ст.мес. (соответственно 2237 и 2437 м/ст.мес.), то в 2014 г. с учетом предложенных решений коммерческая скорость по РГС превысила коммерческую скорость по ГС на 148 м/ст.мес. (соответственно 2577 и 2429 м/ст.мес.). Рост коммерческой скорости бурения в РГС относительно 2013 г. составил более 15%, при этом коммерческая скорость по ГС практически не изменилась (рисунки 5.12 и 5.13).

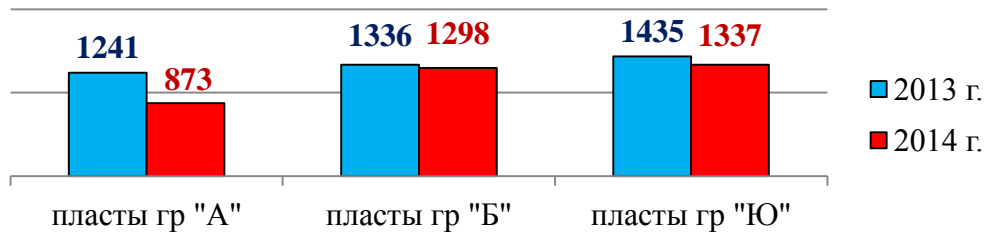


Рисунок 5.12 – Средняя продолжительность бурения РГС, часов

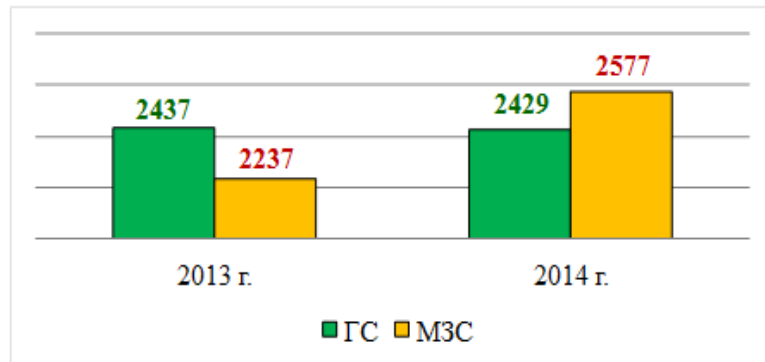


Рисунок 5.13 – Коммерческие скорости бурения ГС и РГС, м/ст.мес.

Кроме того, во всех скважинах спуск хвостовика в основной ствол РГС выполнен с первого раза согласно плану работ, что подтверждается по «мере» спускного инструмента.

Таким образом, в результате внедрения разработанных в работе технико-технологических решений обеспечено повышение коммерческой скорости на 22–41,3% и 100% успешный спуск хвостовика в основной ГУ без применения дополнительных мероприятий и технических средств.

С учетом результатов предложенных решений с апреля 2014 года технология бурения РГС на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» переведена к промышленному внедрению по средне- и высокопроницаемым пластам.

Применение разработанных в работе методических и технологических решений позволили на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» реализовать в промышленных масштабах строительство РГС с тремя и более забоями (Таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Статистика бурения РГС на месторождениях
ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»

Месторождение	Пласт	Количество забоев, шт.	Количество скважин, шт.
Ватъеганское	АВ1/2	3	1 (2015 г.)
	БВ1	3	1 (2014 г.)
Восточно-Перевальное	АС9	3	8 (2014–2016 гг.)
	Ач3	3	1 (2015 г.)
Восточно-Придорожное	ЮВ1	2	1 (2014 г.)
	ЮВ1	3	3 (2014 г.)
Имилорское	ЮВ1	3	1 (2016 г.)
Кечимовское	АВ2	2	3 (2010–2016 гг.)
	АВ2	3	4 (2012–2016 гг.)
Когалымское	БС16–17	3	5 (2014–2015 гг.)
	БС11	2	1 (2009 г.)
Лас-Ёганское	АВ2	3	2 (2013 г.)
	АВ2	2	1 (2013 г.)
Красноленинское	ВК1	4	1 (2015 г.)
		3	1 (2014 г.)
Малоключевое	ЮВ2	2	1 (2014 г.)
	ЮВ1	3	1 (2014 г.)
Урьевское	АВ1	3	1 (2014 г.)
Нивагальское	АВ2	4	3 (2013–2016 гг.)
	АВ1, АВ2 и БВ6	3	30 (2013–2016 гг.)
	АВ1 и АВ2	2	16 (2013–2016 гг.)
Повховское	ЮВ1	2	1 (2010 г.)
Покачевское	ЮВ1	5	1 (2014 г.)
	БВ8	3	1 (2016 г.)
	ЮВ1	2	3 (2013–2014 гг.)
	БВ8	2	1 (2016 г.)
	АВ1	2	1 (2016 г.)
Северо-Покамасовское	ЮВ1	3	7 (2014 г.)
Нонг-Еганское	ЮВ1	2	1 (2015 г.)
		3	5 (2014–2015 гг.)
		4	1 (2014 г.)
		5	1 (2014 г.)
Северо-Конитлорское	Ач8	3	2 (2015 г.)
Северо-Покачевское	ЮВ1	2	3 (2013–2014 гг.)
Северо-Семивидовское	П	2–3	4 (2014–2015 гг.)
Южно-Вьинтойское	БВ7	5	1 (2016 г.)
Южно-Ягунское	БС10	2–3	7 (2014–2015 гг.)
Тевлинско-Русскинское	ЮС1	2	1 (2013 г.)
Пяяхинское	БУ15	3	30 (2014–2016 г.)
	БУ15	5	4 (2014–2016 г.)
	БУ15–18	2	8 (2014–2016 г.)
ИТОГО, скважин			168

По состоянию на 01.01.2017 г. бурение РГС осуществлено на 21 месторождении (Таблица 5.3): на группы пластов А – 67 скважин, Б – 63 скважины, ВК – 2 скважина, Ач – 3 скважины и Ю – 33 скважины. Из пробуренных 168 РГС двухзабойные скважины составляют 27% (45 скв.), тогда как 73% приходится на скважины с тремя-пятью забоями (7 - пятизабойные, 5 - четырехзабойные, 111 - трехзабойные). Имеется также опыт строительства РГС, относимых к категории скважин с большим отходом от вертикали [85].

Если первые РГС на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» в 2009–2012 гг. строились в объеме не более двух скважин в год, то в дальнейшем объемы ежегодного строительства возросли до 23–50 скважин с реализацией технологии во всех добывающих территориально-производственных предприятиях (Рисунок 5.14) [89].

По состоянию на 01.11.2018 г. на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» введено в эксплуатацию свыше 250 РГС уровня сложности TAML2, запланировано бурение 6–10 забойных скважин.

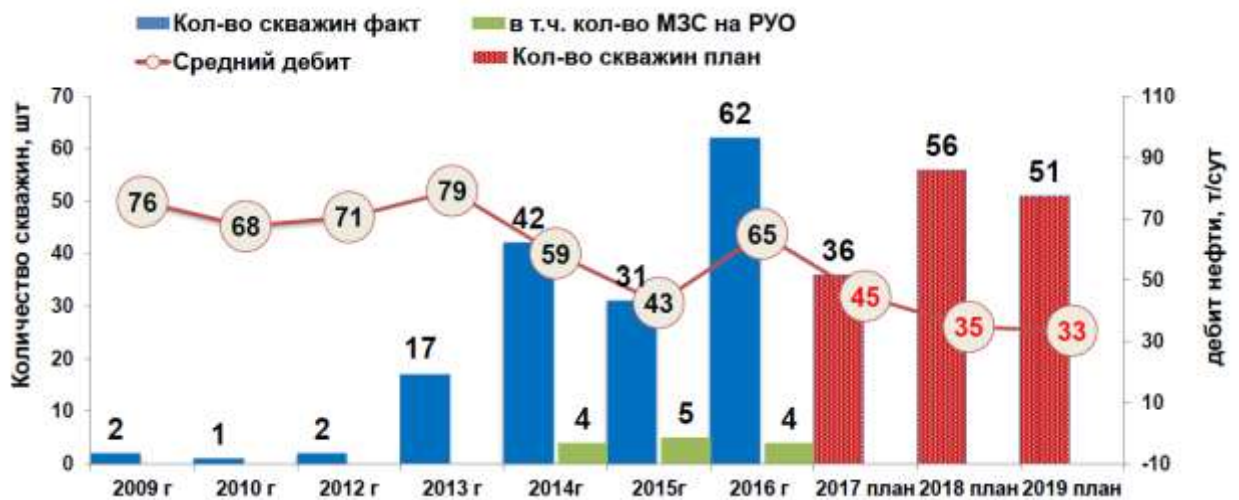


Рисунок 5.14 – Динамика ввода ГС с многозабойным окончанием в разрезе ТПП ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»

5.4. Результаты оценки продуктивности РГС

Исходя из того, что РГС позволяют увеличивать охват пласта воздействием и эксплуатировать пласт при меньших депрессиях, чем в ГС, первоначально РГС бурились на высокопродуктивные пласты Ваденской свиты (АВ, БВ6), характеризующиеся высокой проницаемостью и наличием подстилающей воды. В дальнейшем технология тиражировалась и по другим группам эксплуатационным объектам (Таблица 5.3).

Мониторинг работы РГС по объектам АВ1/3 Нивагальского месторождения с проницаемостью более 100 мД свидетельствует, что в сравнении со стандартными ГС (обе категории скважин - без гидроразрыва), при сопоставимой либо меньшей депрессии в РГС имеют: начальные дебиты выше на 40–100%, при дальнейшей эксплуатации – на 25–100%; обводненность ниже на 25–30% в начале эксплуатации и на 10–20% через год (Рисунок 5.15).

Схожие результаты получены и по отложениям проницаемостью свыше 50 мД, с подстилающей подошвенной водой. Типовой разрез таких отложений по пласту ЮВ1 представлен на Рисунке 5.16.

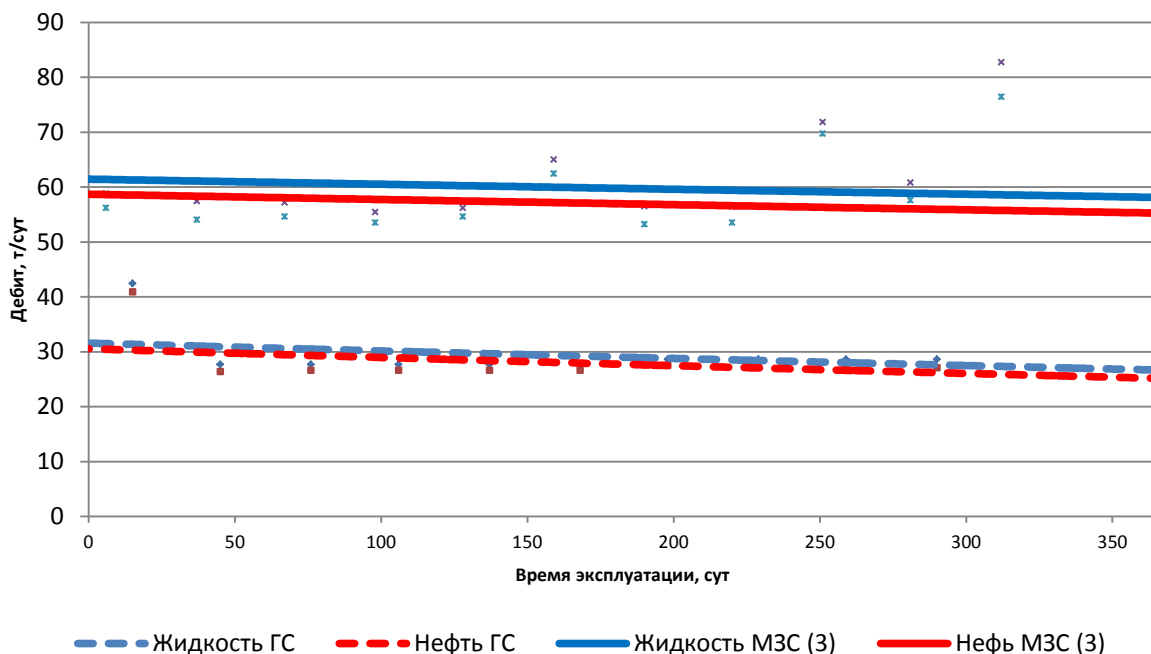


Рисунок 5.15 – Дебиты трехзбойных РГС и ГС без МГРП (Нивагальское месторождение, пласт АВ1/3, проницаемость более 100 мД, Кн.н. 45–50 %)

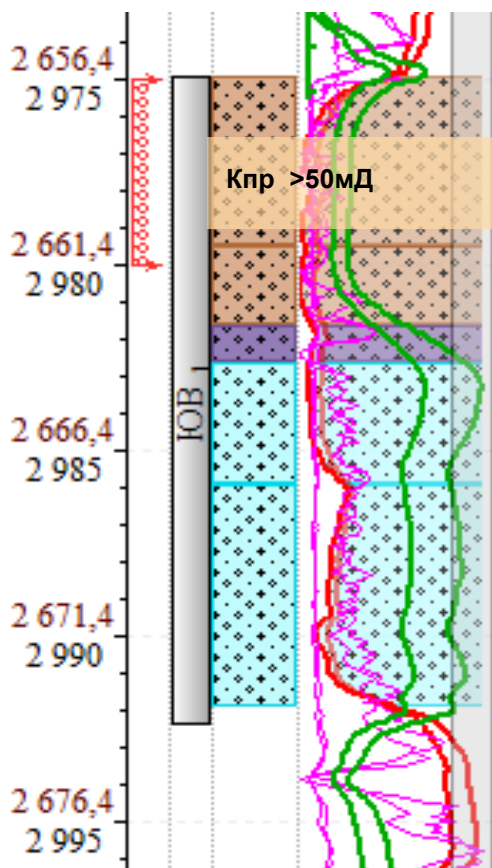


Рисунок 5.16 – Геологический разрез высокопродуктивного (>50 мД) в нефтенасыщенной части пласта ЮВ1, с подошвенной водой

На Рисунке 5.17 приведена выкопировка карты текущего состояния и актуализированных нефтенасыщенных толщин по участку объекта ЮВ₁ Покачевского месторождения, в условиях улучшенного коллектора с проницаемостью $K_{пр} \geq 100 \text{ мД}$, где в непосредственной близости расположены РГС № 9308Г и ГС № 9305Г ($H_{эф. нн} = 4 \text{ м}$, $K_{нн} = 0,59$, $K_{пор} = 0,17$, $K_{прон.} = 150 \text{ мД}$).

Как видно из представленных данных, при сопоставимой обводнённости скважинной продукции запускной дебит РГС многократно выше, чем в ГС, как по жидкости, так и по нефти (Таблица 5.4). Длительный мониторинг работы скважин данного участка (Рисунок 5.18) также свидетельствует, что в первые полтора года дебит РГС по нефти сохраняется на уровне 120–135 т/сут при обводнённости 5–10%, тогда как в ГС эти показатели 54–64 т/сут и 6–8% соответственно. При дальнейшей эксплуатации обводненность продукции в РГС постепенно возрастает, при этом дебит по нефти сохраняется на 20% выше, чем в ГС.

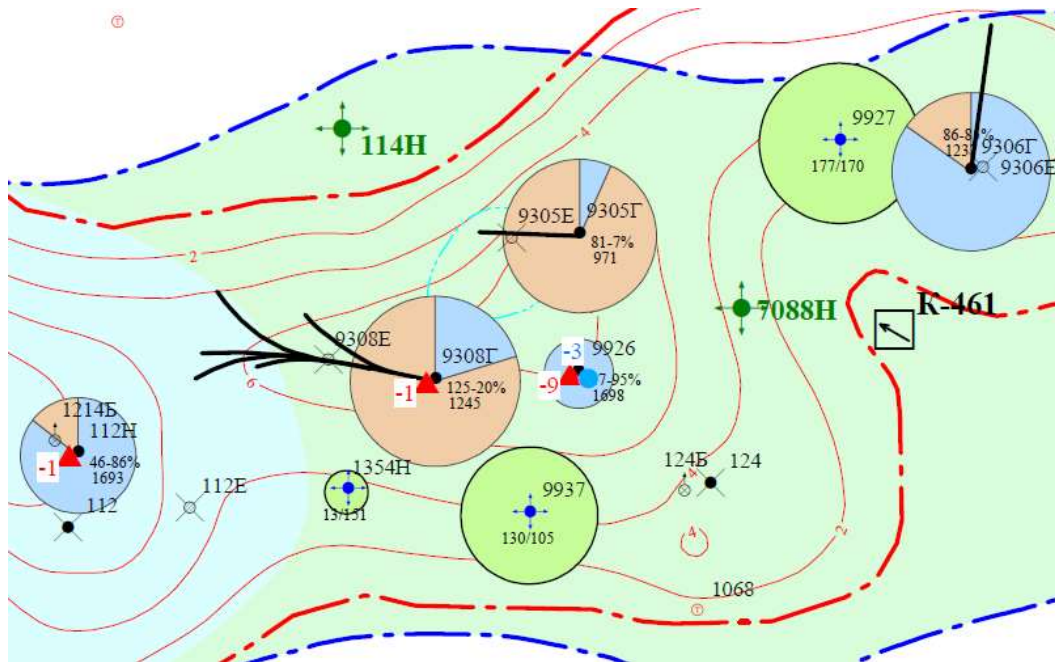


Рисунок 5.17 – Фрагмент карты текущего состояния и актуализированных нефтенасыщенных толщин

Таблица 5.4 – Сравнительная характеристика запускных дебитов в РГС и ГС, заложенных в идентичных условиях на высокопродуктивные отложения с подстилающей подошвенной водой

Вид скважин	Запускной режим			Накопленная добыча, тыс. тонн	Q _н , т/сут	К _{прод} , м ³ /сут/атм
	Q _ж , т/сут	Q _н , т/сут	обводненность, %			
РГС № 9308Г	146	123	16	84,7	121	2,1
ГС № 9305Г	60	53	11	41,6	59	0,9

В целом, на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» вводимым в эксплуатацию РГС средний удельный дебит первого года эксплуатации составляет 58,7 т/сут. По 308 ГС, в т.ч. с МГРП, средний удельный дебит первого года составляют 30,7 т/сут. Таким образом, РГС практически вдвое эффективнее ГС. Кроме больших начальных дебитов, для РГС характерны и более низкие темпы падения дебитов нефти, за счет менее интенсивного обводнения (рис. 5.19) [28].

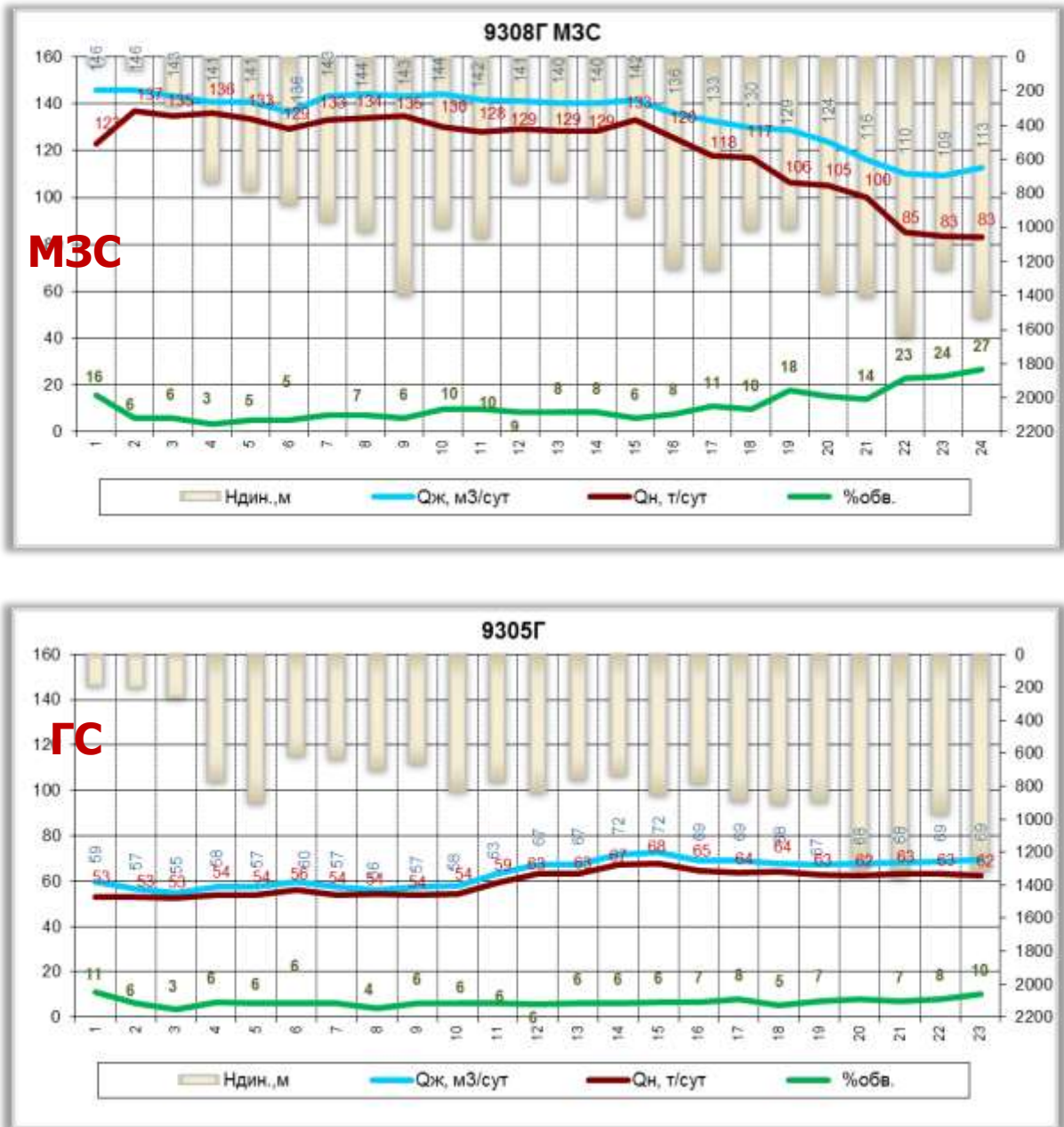


Рисунок 5.18 – Основные показатели эксплуатации РГС и ГС

Анализ средних начальных дебитов по нефти ГС с МГРП и РГС (Рисунок 5.19), пробуренных в пределах одних эксплуатационных объектов (Таблица 5.1), свидетельствует, что многозабойное заканчивание скважин обеспечивает дебиты, сопоставимые либо большие с заканчиваем ГС с МГРП (Рисунок 5.20). Следует отметить, что РГС пробурены на участках со средневзвешенной проницаемостью свыше 10 мД, в то время как МГРП производится в условиях коллекторов с худшими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

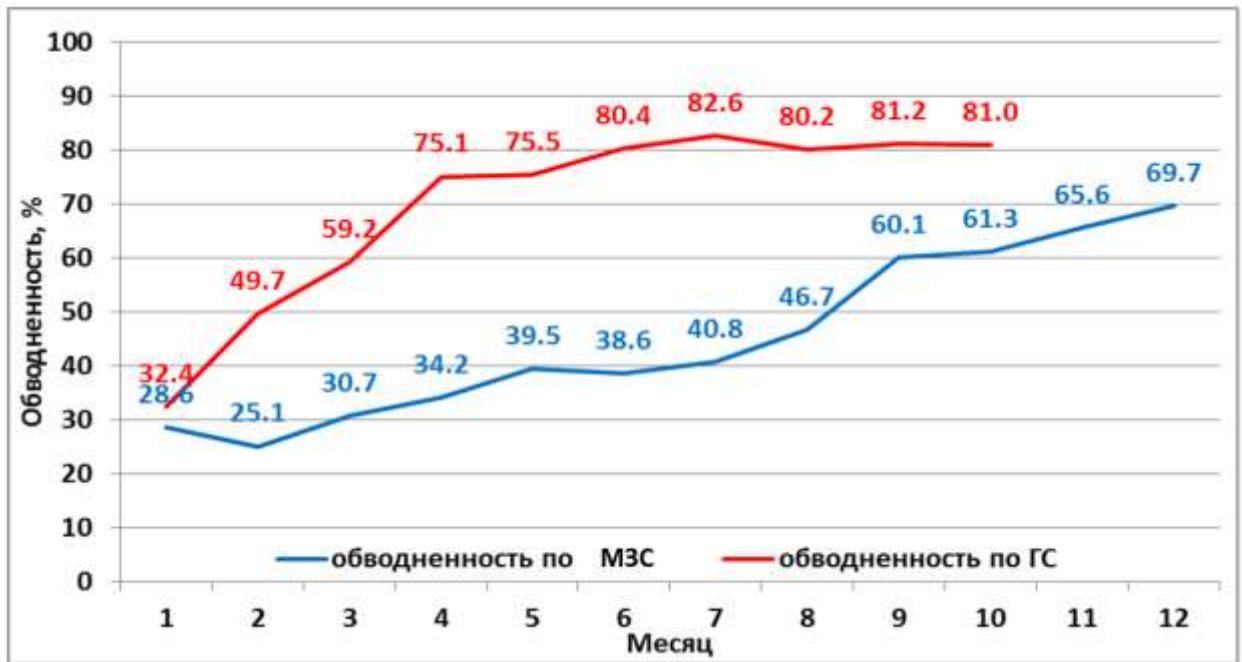


Рисунок 5.19 – Динамика обводнения многозабойных и одноствольных горизонтальных скважин Лас-Еганского месторождения (объект АВ₁₋₂)

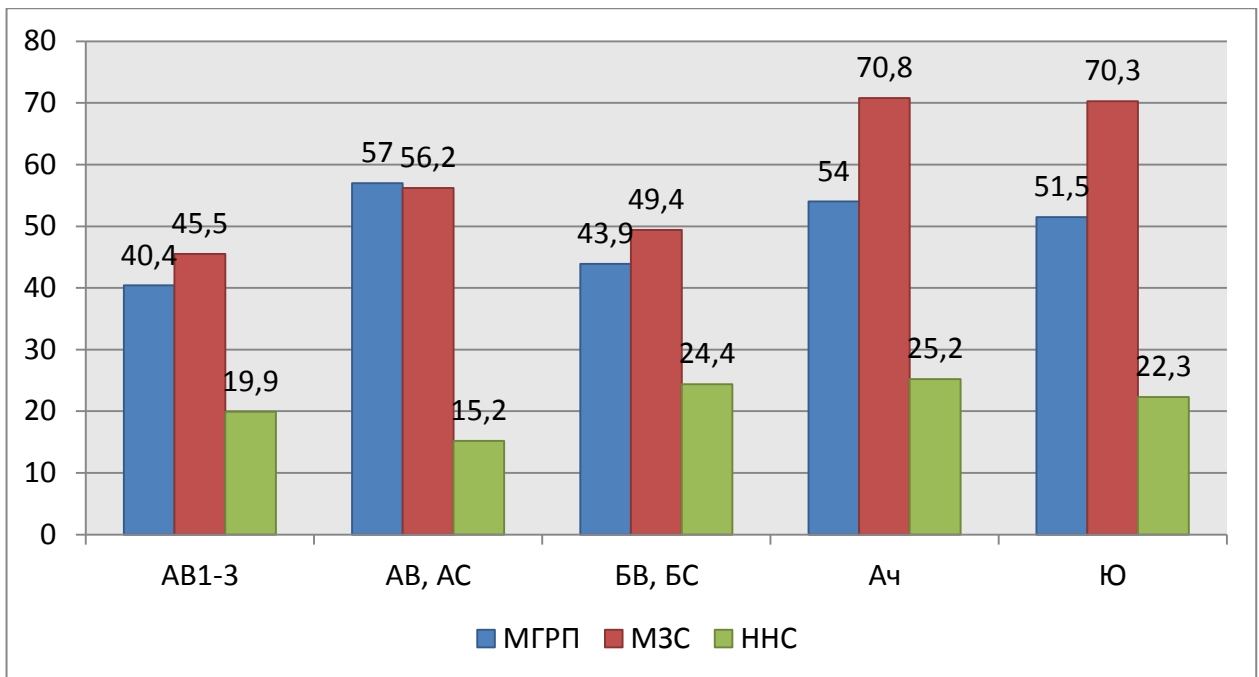


Рисунок 5.20 - Средние начальные дебиты по нефти в ГС с МГРП, РГС и ННС, т/сут.

Было установлено, что, по сравнению с ГС, кроме геометрического прироста (охвата пласта дренированием) за счет бурения ответвлений, в РГС протяженность вскрытых проницаемых нефтенасыщенных интервалов

увеличивается на 5-25 % за счет осуществления более точного проложения второго и последующих ответвлений по нефтенасыщенным пропласткам, по результатам уточнения геологического разреза по участку бурения при проводке предшествующих ответвлений. К примеру, в РГС №8829Г Нивагальского месторождения удельная протяженность проницаемых интервалов в суммарной по первому ответвлению составила 59,1%, второму – 61,8%, третьему – 80,4%, последнему – 83,3%, что позволило увеличить площадь дренирования скважины. Таким образом, реализованные в работе решения позволяют, как повысить степень охвата пласта дренированием, так и за счет минимизации интерференции между ответвлениями и основным ГУ скважины в полной мере реализовать потенциал РГС.

К настоящему времени по ряду месторождений РГС реализуются как элементы системы разработки. К примеру, на Пякяхинском месторождении, в 2014 г. было начато промышленное бурение с внедрением РГС как системы разработки пласта БУ15/1 [86]. Большинство добывающих скважин с многозабойным окончанием, преимущественно с 3–5 забоями (Рисунок 5.21), что обусловлено более высокими дебитами РГС в сравнении с ГС. Также имеется опыт бурения РГС с 6-7 забоями.

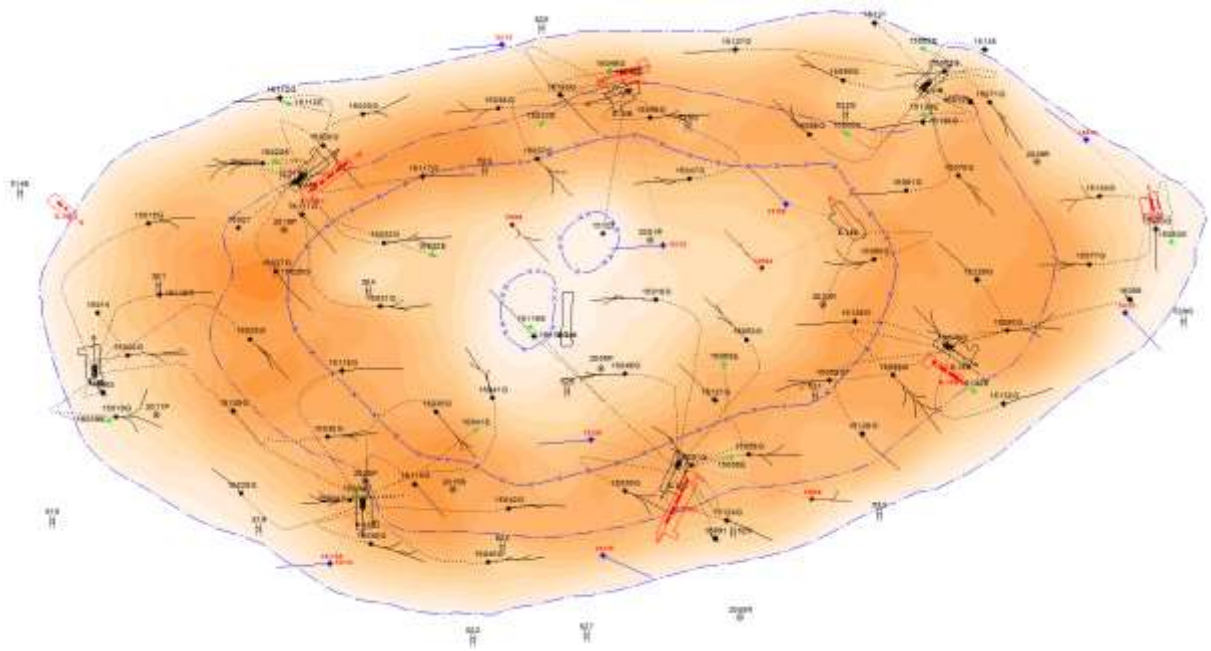


Рисунок 5.21 – Пробуренный и проектный фонд РГС пласта БУ15–1
Пякяхинского месторождения

Реализация технологии многозабойного бурения на примере Пякяхинского месторождения позволила нивелировать существовавшие геологические неопределённости, существующие на момент его разбуривания, и в конце 2016 г. ввести месторождение в эксплуатацию со средним запускным дебитом РГС свыше 100 т/сут.

К проектам ПАО «ЛУКОЙЛ», где в ближайшей перспективе планируется масштабное внедрение РГС, относятся освоение ресурсов группы месторождений в Каспийском море, в районе Большехетской впадины полуострова Ямал и некоторые другие приоритетные проекты компании.

Выводы по главе 5

1. Разработанные в диссертационной работе методические и технико-технологические решения подтверждены результатами промысловых испытаний: сокращено время на зарезку ответвлений на 60% и обеспечено на 100% успешность спусков хвостовиков в РГС.

2. Установлено, что в РГС обеспечивается до 25 % прироста протяженности вскрытых проницаемых нефтенасыщенных интервалов за счет более точного проложения второго и последующих ответвлений по нефтенасыщенным пропласткам.

3. Разработанные методические и технологические решения по итогам промысловых испытаний были включены в технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин, на основании которого спроектированы и успешно пробурены 15 четырех-шести и 106 трехзабойных РГС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Выполнен анализ используемых на практике профилей и технологий бурения МЗС различной конфигурации, проведено их ранжирование по сложности технической реализации. Установлена актуальность и необходимость совершенствования в части разработки методических основ обоснования количества ответвлений, расстояний между точками их зарезки, расположения забоев с учетом технических ограничений бурового оборудования и геологических условий залегания целевого пласта.

2. Разработаны:

- методика определения технически возможной конфигурации РГС: максимального количества ответвлений и минимального расстояния между точками их зарезки, координат её забоев исходя из существующих геолого-технологических ограничений;

- технология строительства РГС, обеспечивающая высокую технологичность и сокращение процесса зарезки нового ствола в открытом горизонтальном участке и гарантированный спуск хвостовика в основной горизонтальный ствол.

3. Предложенные методики и технико-технологические решения подтверждены промысловыми результатами. Рост коммерческой скорости строительства скважин составил более 15 %, что обеспечено сокращением времени на зарезку ответвлений на 60% и 100% успешным спуском хвостовиков в требуемый ствол РГС. Кроме того, при строительстве РГС обеспечивается до 25 % прироста протяженности вскрытых проницаемых нефтенасыщенных интервалов за счет осуществления более точного проложения второго и последующих ответвлений по нефтенасыщенным пропласткам.

4. Разработан и внедрен «Технологический регламент по планированию и строительству МЗС на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». С учетом требований регламента технология строительства РГС внедрена на ряде крупных нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений Западной Сибири.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь

ПРИКАЗ № 23

«04» сентября 2015г.

г. Когалым

О введении в действие РД

В целях повышения эффективности строительства скважин с горизонтальным окончанием, многозабойных скважин и упорядочения требований к профилю скважины с учетом современных требований

ПРИКАЗЫВАЮ:

1. Утвердить и ввести в действие «Технологический регламент на строительство скважин с горизонтальным окончанием ствола на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», согласно Приложению № 1.
2. Утвердить и ввести в действие «Технологический регламент по проектированию и контролю траекторий скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», согласно Приложению № 2.
3. Утвердить и ввести в действие «Технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», согласно Приложению № 3.
4. Заместителю генерального директора по бурению ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» В.Н. Ковалеву:
 - 4.1. Поручить операторам договоров подряда на строительство скважин, заключенных ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» с контрагентами, осуществляющими свою деятельность на объектах и территориях производственной деятельности ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», заключить в срок до 31.03.2015 года дополнительные соглашения с указанием в них условий о применении настоящих Регламентов.
 - 4.2. При заключении договоров подряда на строительство скважин включать в тексты договоров условие о применении настоящих Регламентов.
5. Начальнику отдела организационного развития ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» В.В. Кузьмину внести изменения в Библиотеку РД ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».
6. Контроль за исполнением приказа возложить на заместителя генерального директора по бурению ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» В.Н. Ковалева.

Вице-президент ОАО «ЛУКОЙЛ»,
 Генеральный директор

С.А. Кочуров

В.В. Фатихов
 6-12-73

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технологический регламент по планированию
и строительству многозбойных скважин
на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

к технологическому регламенту по планированию и строительству многозбойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»

Разработчик: филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г.Тюмени

Заместитель директора филиала
по научной работе в области
строительства скважин, к.т.н.



Д.Л. Бакиров
«__» _____ 2015г.

Начальник отдела
техники и технологии
строительства скважин



М.М. Фаттахов
«__» _____ 2015г.

Согласовано: ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»

Заместитель генерального
директора по бурению



В.Н. Ковалев
«__» _____ 2015г.

Начальник технологического отдела



В.В. Фатихов
«__» _____ 2015г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



Филиал ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг"
"КогалымНИПИнефть" в г. Тюмени

№ К/06-01-19 Дата 15.03.2018

исл № _____ от _____

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что методика проектирования профиля многозабойных скважин (МЗС) и технология зарезки ответвлений в МЗС, разработанные М.М. Фаттаховым:

1) включены в следующие групповые рабочие проекты на строительство скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»:

- ГРП № 366 ЭПх-М-17 на строительство многозабойных скважин на пласт АВ1-2 Ватьеганского месторождения;

- ГРП № 358 ЭЛ-М-17 на строительство многозабойных скважин на группу пластов АВ Нивагальского месторождения;

- ГРП № 375 ЭК-М-17 на строительство многозабойных скважин на пласт АС9 Восточно-Перевального месторождения;

- ГРП № 358 ЭЛ-М-17 на строительство многозабойных скважин на группу пластов ЮВ Малоключевого месторождения.

2) включены в «Технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» (введен в действие приказом № 23 от 04.02.2015 г.).

На основании проектной документации с учетом требований указанного технологического регламента за первые три года (с февраля 2015 г. по февраль 2018 г.) спроектированы и успешно пробурены 15 четырех-шести и 106 трехзабойных скважин (приложение).

Протяженность основного горизонтального ствола в пробуренных МЗС преимущественно 450-600 м, в отдельных скважинах до 1000 м. Все скважины реализованы в соответствии с проектными профилями. Рост коммерческой скорости бурения относительно начальной стадии промышленного применения МЗС (2013 г.) составляет свыше 15%. Во всех скважинах обеспечен спуск хвостовика в основной ствол МЗС до проектной глубины, без осложнений.

Главный инженер проекта
Управления проектирования и
мониторинга строительства скважин

М.В. Детин

**Перечень трех-шести забойных МЗС, пробуренных на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-
Западная Сибирь» с февраля 2015 г. по февраль 2018 г.**

Месторождение	Скважина	Куст	Пласт	Количество стволов	Строительство	
					начало	начало
Южно-Ягунское	247Г	323	БС10(1)	3	08.02.2015	22.03.2015
Южно-Ягунское	272Г	323	БС10(1)	3	23.03.2015	22.04.2015
Пяяхинское	15031Г	10Н	БУ15(1)	3	25.02.2015	25.04.2015
Пяяхинское	15055Г	17Н	БУ15(1)	3	15.02.2015	12.05.2015
Нивагальское	4934Г	759	АВ1/3	3	10.04.2015	29.05.2015
Южно-Ягунское	246Г	323	БС10(1)	3	22.04.2015	25.05.2015
Пяяхинское	15020Г	9Н	БУ15(1)	3	24.03.2015	03.06.2015
Пяяхинское	15053Г	15Н	БУ15(1)	3	10.03.2015	12.06.2015
Когальмское	4442Г	261	БС16(1)	3	22.04.2015	18.06.2015
Пяяхинское	15028Г	10Н	БУ15(1)	3	26.04.2015	22.06.2015
Южно-Ягунское	293Г	323	БС10(1)	3	26.05.2015	25.06.2015
Пяяхинское	15070Г	17Н	БУ15(1)	3	12.05.2015	05.07.2015
Нонг-Еганское	4304Г	29	ЮВ1/1	3	24.05.2015	07.07.2015
Пяяхинское	15025Г	9Н	БУ15(1)	3	03.06.2015	05.08.2015
Пяяхинское	15035Г	12Н	БУ15(1)	3	06.06.2015	02.08.2015
Пяяхинское	15018Г	15Н	БУ15(1)	3	12.06.2015	19.08.2015
Южно-Ягунское	294Г	323	БС10(1)	3	09.07.2015	05.08.2015
Нонг-Еганское	4312Г	29	ЮВ1/1	3	26.06.2015	22.08.2015
Пяяхинское	15071Г	17Н	БУ15(1)	3	05.07.2015	22.08.2015
Ватьеганское	1725Г	526	АВ1/2	3	31.07.2015	17.09.2015
Пяяхинское	15042Г	12Н	БУ15(1)	3	03.08.2015	26.09.2015
Северо-Конитлорское	1895Г	20	БС18-19	3	07.08.2015	27.09.2015
Пяяхинское	15048Г	13Н	БУ15(1)	3	18.08.2015	02.10.2015
Кечимовское	1019Г	776	АВ1/2	3	04.10.2015	03.11.2015
Пяяхинское	15046Г	15Н	БУ15(1)	3	01.10.2015	25.11.2015
Нивагальское	6330Г	735	АВ1/3	3	28.10.2015	07.12.2015
Нивагальское	6436Г	935	АВ1/3	3	31.10.2015	07.12.2015
Северо-Конитлорское	1898Г	20	Ачим8	3	07.10.2015	16.12.2015
Кечимовское	1017Г	776	АВ1-2	3	03.11.2015	20.12.2015
Нивагальское	4840Г	735	АВ1/3	3	07.12.2015	17.01.2016
Пяяхинское	15059Г	18Н	БУ15(1)	3	19.11.2015	17.01.2016
Нивагальское	6434Г	935	АВ1/3	3	07.12.2015	15.01.2016
Пяяхинское	15051Г	15Н	БУ15(1)	3	10.01.2016	02.03.2016
Пяяхинское	15045Г	12Н	БУ15(1)	3	06.01.2016	03.03.2016
Кечимовское	1018Г	776	АВ1/3	3	01.02.2016	17.03.2016
Пяяхинское	15076Г	18Н	БУ15(1)	3	17.01.2016	27.03.2016
Восточно-Перевальное	562Г	14В	АС9	3	05.02.2016	11.04.2016
Пяяхинское	15047Г	13Н	БУ15(1)	3	12.12.2015	15.04.2016
Нивагальское	4838Г	735	АВ1/3	3	07.03.2016	18.04.2016
Восточно-Перевальное	616Г	33	АС9	3	18.02.2016	18.04.2016
Имилорское	641Г	6	БС17	3	30.03.2016	11.05.2016
Восточно-Перевальное	554Г	14В	АС9	3	21.04.2016	08.06.2016
Нивагальское	6283Г	735	АВ1/3	3	25.05.2016	28.06.2016

Восточно-Перевальное	602Г	33	АС9	3	08.05.2016	06.07.2016
Пяяхинское	15058Г	15Н	БУ15(1)	3	01.05.2016	17.07.2016
Пяяхинское	15040Г	12Н	БУ15(1)	3	24.05.2016	25.07.2016
Нивагальское	6119Г	903	АВ1	4	10.06.2016	28.07.2016
Нивагальское	6403Г	935	АВ1/3	3	15.06.2016	22.07.2016
Восточно-Перевальное	945Г	14В	АС9	3	21.06.2016	12.08.2016
Нивагальское	6285Г	735	АВ1/3	3	21.07.2016	01.09.2016
Покачевское	9200Г	444	БВ8	3	15.07.2016	28.08.2016
Нивагальское	6118Г	903	АВ2	3	29.07.2016	09.09.2016
Пяяхинское	15050Г	15Н	БУ15(1)	3	17.07.2016	17.09.2016
Пяяхинское	15080Г	18Н	БУ15(1)	3	02.08.2016	20.09.2016
Восточно-Перевальное	599Г	33	АС9/4-5	3	16.07.2016	24.09.2016
Нивагальское	6287Г	735	АВ1/3	3	02.09.2016	07.10.2016
Нивагальское	9211Г	903	АВ2	3	10.09.2016	19.10.2016
Южно-Винтойское	1069Г	29	БВ7/3-4	5	22.08.2016	27.10.2016
Восточно-Перевальное	678Г	14В	АС9/4-5	3	03.09.2016	24.10.2016
Нивагальское	6320Г	925	АВ1/3	3	18.09.2016	19.10.2016
Пяяхинское	15037Г	13Н	БУ15(1)	3	13.08.2016	11.11.2016
Пяяхинское	15077Г	19Н	БУ15(1)	3	17.09.2016	18.11.2016
Пяяхинское	15235Г	12Н	БУ15(2)	5	25.07.2016	06.12.2016
Нивагальское	6224Г	924	АВ1/3	3	16.10.2016	07.12.2016
Пяяхинское	15069Г	18Н	БУ15(1)	5	20.09.2016	25.12.2016
Пяяхинское	15060Г	16Н	БУ15(1)	3	11.10.2016	30.12.2016
Восточно-Перевальное	593Г	33	АС9	3	13.10.2016	16.12.2016
Нивагальское	6322Г	925	АВ1/3	3	28.11.2016	16.01.2017
Пяяхинское	15038Г	13Н	БУ15(1)	3	12.11.2016	19.01.2017
Пяяхинское	15134Г	19Н	БУ15(1)	3	20.11.2016	02.02.2017
Кочевское	6321Г	38	БС10/5-6	3	19.01.2017	10.03.2017
Пяяхинское	15259Г	18Н	БУ15(2)	4	26.12.2016	20.03.2017
Пяяхинское	15260Г	16Н	БУ15(2)	5	01.01.2017	19.03.2017
Восточно-Перевальное	535Г	33	АС9	3	11.01.2017	20.03.2017
Пяяхинское	15036Г	13Н	БУ15(1)	3	21.01.2017	25.03.2017
Восточно-Перевальное	550Г	15В	АС9/4-5	3	11.01.2017	03.04.2017
Нивагальское	6222Г	924	АВ1/3	3	08.03.2017	17.04.2017
Нивагальское	6274Г	925	АВ1/3	3	16.03.2017	15.04.2017
Малоключевое	811Г	7	БВ10	3	07.04.2017	12.05.2017
Пяяхинское	15054Г	16Н	БУ15(1)	3	20.03.2017	01.06.2017
Пяяхинское	15231Г	10Н2	БУ15(2)	5	21.03.2017	03.06.2017
Пяяхинское	15236Г	13Н	БУ15(2)	5	26.03.2017	31.05.2017
Восточно-Перевальное	542Г	15В	АС9	3	27.04.2017	06.06.2017
Кочевское	6320Г	38	БС10/5-6	3	16.04.2017	08.06.2017
Тевлинско-Рускинское	5122Г	227Д	ЮС1/1	3	20.04.2017	16.06.2017
Восточно-Перевальное	565Г	17В	АС9	3	30.04.2017	21.06.2017
Нивагальское	6220Г	924	АВ1/3	3	06.06.2017	04.07.2017
Нивагальское	6226Г	925	АВ1/3	3	05.06.2017	11.07.2017
Западно-Покамасовское	329Г	3Б	ЮВ1	3	21.06.2017	22.07.2017
Западно-Покамасовское	306Г	3	ЮВ1/3	4	04.06.2017	02.08.2017
Пяяхинское	15253Г	15Н2	БУ15(2)	5	30.05.2017	04.09.2017
Восточно-Перевальное	647Г	15В	АС9	3	19.06.2017	20.08.2017
Восточно-Перевальное	556Г	17В	АС9	3	04.07.2017	07.08.2017

Нивагальское	6184Г	924	АВ1/3	3	05.07.2017	11.08.2017
Тевлинско-Русскинское	5136Г	227Д	ЮС1/1	3	04.07.2017	01.09.2017
Сыморьяхское	7982Г	3	Т1-2	3	12.07.2017	05.09.2017
Восточно-Перевальное	629Г	16В	АС9	3	22.07.2017	29.08.2017
Покачевское	9714Г	440	АВ1/3	3	24.07.2017	24.08.2017
Нивагальское	6228Г	925	АВ1/3	3	29.07.2017	03.09.2017
Западно-Покамасовское	308Г	3	ЮВ1/3	3	03.08.2017	23.09.2017
Пяяхинское	15232Г	10Н2	БУ15(2)	5	04.06.2017	01.10.2017
Нивагальское	6219Г	924	АВ1/3	3	12.08.2017	29.09.2017
Восточно-Перевальное	685Г	17В	АС9/4-5	3	26.08.2017	28.09.2017
Западно-Покамасовское	330Г	3Б	ЮВ1	3	13.09.2017	15.10.2017
Восточно-Перевальное	540Г	15В	АС9	3	05.09.2017	18.10.2017
Восточно-Перевальное	914Г	16В	АС9	3	21.09.2017	29.10.2017
Сыморьяхское	7986Г	3	ЮК2-4	3	22.10.2017	25.11.2017
Покачевское	9715Г	440	АВ1/3	5	28.10.2017	02.12.2017
Имилорское	1221Г	12	БС17	3	14.11.2017	14.12.2017
Западно-Покамасовское	328Г	3Б	ЮВ1	3	31.10.2017	16.12.2017
Пяяхинское	15254Г	16Н	БУ15(2)	5	05.11.2017	08.01.2018
Нивагальское	6182Г	924	АВ1/3	3	18.12.2017	13.01.2018
Восточно-Перевальное	614Г	16В	АС9	3	30.10.2017	13.01.2018
Пяяхинское	15248Г	13Н2	БУ15(2)	4	10.11.2017	13.01.2018
Пяяхинское	208Г	2Н	ПК18	5	03.12.2017	17.02.2018
Сыморьяхское	7992Г	3	Т1-2	3	08.12.2017	19.02.2018
Нивагальское	6160Г	924	АВ1/3	3	13.01.2018	17.02.2018
Пяяхинское	15246Г	15Н2	БУ15/1	6	09.12.2017	24.02.2018
Восточно-Придорожное	1095Г	18	ЮВ1/1	3	12.01.2018	01.03.2018
Пяяхинское	911Г	16Н	БУ6/2	3	10.01.2018	10.03.2018
Нивагальское	6289Г	929	АВ1/3	3	13.02.2018	12.03.2018

Главный инженер проекта
Управления проектирования и
мониторинга строительства скважин



М.В. Детин

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГС – горизонтальная скважина

МЗС – многозабойная скважина

ННС – наклонно-направленная скважина

ВС – вертикальная скважина

БС – боковой ствол

БГС – боковой ствол с горизонтальным окончанием

НГДУ – нефтегазодобывающее предприятие

ТПП – территориально-производственное предприятие

МСС – многоствольные скважины

TAML – обозначение международной классификации многоствольных скважин

ГРП – гидроразрыв пласта

МГРП – многостадийный ГРП

ГУ – горизонтальный участок (профиля)

ЯНАО – Ямало-Ненецкий автономный округ

ГИС – геофизические исследования скважин

ГДИ – гидродинамические исследования (скважин)

ПГИ – промыслово-геофизические исследования

СПО – спускоподъемные операции

МЛСП – морская ледостойкая стационарная платформа

РИР – ремонтно-изоляционные работы

ОПЗ – обработка призабойной зоны

ОПЭ – опытно-промышленная эксплуатация

ОПР – опытно-промышленные работы

ПНП – повышение нефтеотдачи пластов

КНБК – компоновка низа бурильной колонны

GTF (Gravity Tool Face) – угол между верхней точкой ствола и корпусом отклонителя КНБК

ЗУ – зенитный угол

ЗТС – забойные телеметрические системы

КС – кажущееся сопротивление горных пород

ПС – сопротивление поляризации

КПБ – каротаж в процессе бурения (LWD)

ГГДМ – геолого-гидродинамическая модель

ТЭП – технико-экономические показатели

ГЗД – гидравлический забойный двигатель

РВО – раствор на водной основе

РГС – разветвленно-горизонтальная скважина

РУО – раствор на углеводородной основе

РУС – роторно-управляемая система

ПТД – проектно-технологический документ на разработку месторождения

ИТП – индивидуальный технический проект (на строительство скважины)

БУ – буровая установка

ННК – нейтрон-нейтронный каротаж

ГГК – гамма-гамма каротаж

ВНК – водонефтяной контакт (в залежи)

ФЕС – фильтрационно-ёмкостные свойства (коллектора)

ГНКТ – гибкие насосно-компрессорные трубы (койлтюбинг)

ТИУ – ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

УГНТУ – ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян А. М. Вскрытие пластов многозабойными и горизонтальными скважинами / А. М. Григорян. – Москва : Недра, 1969. – 192 с. с илл. – Текст : непосредственный.
2. Оганов А. С. Многозабойное бурение скважин развитие, проблемы и успехи / А. С. Оганов, Г. С. Оганов, С. В. Позднышев. – Москва: ВНИИОЭНГ, 2001. – Текст : непосредственный.
3. Повалихин А. С. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин / А. С. Повалихин, А. Г. Калинин, С. Н. Бастриков, К. М. Солодкий ; под общей редакцией докт. техн. наук., проф. А. Г. Калинина. – Москва : ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. – 647 с. – Текст : непосредственный.
4. Техника и технология строительства боковых стволов в нефтяных и газовых скважинах : учебное пособие / В. М. Шенбергер, Г. П. Зозуля, М. Г. Гейхман [и др.]. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2007. – 496 с. – Текст : непосредственный.
5. MacKenzie A. Multilateral classification system with example applications / A. MacKenzie, C. Hogg – Текст : непосредственный // World Oil. – 1999. – № 1. – С. 55–61.
6. Эхлиг-Экономидес С. Методика проектирования многозабойных скважин в приложении к трехмерной модели коллекторов / С. Эхлиг-Экономидес, Г.Р. Моват и С.Корбетт. – Текст : непосредственный // Сборник Европ. конф. СНИ-SPE по трехмерному моделированию коллекторов 16–17 апр. 1996 г. – Ставангер, Норвегия, 1996. – SPE 35505.
7. Сутияма Х. Выборочное применение многозабойных и ветвящихся стволов скважин / Х. Сутияма, Т. Точикава, Дж. М. Педен и Дж. Нилолл. – Текст : непосредственный // Сборник конф. СНИ-SPE по нефти и газу Тихоокеанских стран Азии, 14–16 апр. 1997 г. – Куала-Лумпур, Малайзия, 1997. – SPE 38033.
8. Хилл О. Повторное бурение дает новую жизнь старым месторождениям / О. Хилл, Е. Неме, С. Эхлиг-Экономидес, М. Молинедо. – Текст : непосредственный // Ойлфилд ревью 8. – 1996. – № 3. – С. 4–17.

9. Хранение природного газа в подземных хранилищах / А. Бари, Ф. Кротогино, Б. Преведель [и др.] – Текст : непосредственный // Ойлфилд ревью 14. – 2002. – № 2. – С. 3–17.

10. Фокеева Л. Х. Определение оптимальной траектории и длин стволов многоствольных горизонтальных скважин с учетом особенностей коллектора. – Текст : электронный // Нефтегазовое дело. – 2006. – URL : http://www.ogbus.ru/authors/Fokeeva/Fokeeva_1.pdf (дата обращения: 12.03.2020).

11. Иктисанов В. А. Гидродинамические исследования и моделирование многоствольных горизонтальных скважин / В. А. Иктисанов. – Казань : Плутон, 2007. – 123 с. – Текст : непосредственный.

12. Иктисанов В. А. Моделирование притока жидкости к многоствольным скважинам / В. А. Иктисанов, Л. Х. Фокеева. – Текст : непосредственный // Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов. Проблемы их освоения : материалы науч. конф. – Казань, 2005. – С. 121–123.

13. Иктисанов В. А. Численное моделирование установившейся фильтрации жидкости к многоствольным скважинам / В. А. Иктисанов. – Текст : непосредственный // Современные технологии гидродинамических и диагностических исследований скважин на всех стадиях разработки месторождений : материалы 4-й науч.-практ. конф. – Томск, 2005. – С. 70–74.

14. Мукминов И. Р. Моделирование разработки нефтегазовых месторождений горизонтальными скважинами : 25.00.17 : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Р. Мукминов ; УГНТУ. – Уфа, 2004. – 24 с. – Текст : непосредственный.

15. Григорян А. М. Многозабойное бурение / А. М. Григорян, К. И. Коваленко. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 1953. – № 4.

16. Хисамов Р. Опыт строительства и эксплуатации скважин сложной архитектуры в ПАО «Татнефть» / Р. Хисамов. – Текст : электронный. – URL : <http://www.km.ru/referats/4339CD5511E7495FA87F8B2B30E108F3> (дата обращения: 12.03.2020).

17. Кульчицкий В. В. Проектирование специальных профилей и разработка технологии бурения наклонно-направленных скважин применительно к эксплуатации месторождений механизированными способами : 05.15.10 : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Кульчицкий. – Тюмень, 1984. – Текст : непосредственный.

18. Сафиуллин М. Н. Опыт бурения наклонно-направленных скважин с малоинтенсивным набором кривизны / М. Н. Сафиуллин, Н. П. Захарченко, В.В. Кульчицкий. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1984. – Вып. 10. – С. 24–27. – Текст : непосредственный.

19. Кульчицкий В. В. Геонавигационные технологии проводки наклонно-направленных и горизонтальных скважин / В. В. Кульчицкий. – Москва : ВНИИОЭНГ, 2000. – 350 с. – Текст : непосредственный.

20. Кульчицкий В. В. Истоки технологий бурения пологих и горизонтальных скважин в Западной Сибири / В. В. Кульчицкий // Бурение и нефть. – 2006. – № 11. – С. 17–19. – Текст : непосредственный.

21. Многозабойные скважины: области эффективного применения, технология работ и задачи планирования / Р. А. Исмаков, М. М. Фаттахов, Д. Л. Бакиров [и др.] – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 9. – С. 25–26.

22. Дубровин А. И. Анализ проведения зарезок в открытом стволе при бурении многоствольных скважин / А. И. Дубровин, Н. В. Абалтусов. – Текст : непосредственный // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2014. – № 3. – С. 8–14.

23. Хисамов Р. С. Стратегия разработки месторождений на поздней стадии, перспективы добычи углеводородных ресурсов из нетрадиционных источников углеводородов в Республике Татарстан / Р. С. Хисамов. – Текст : электронный // Бурение и нефть. – 2015. – № 1. – URL : <http://burneft.ru/archive/issues/2015-01/10> (дата обращения: 12.03.2020).

24. Комплексный подход к сопровождению бурения скважин в группе компаний «Газпром нефть» / А. В. Билинчук, А. Н. Говзич, А. Н. Ситников [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 48–51.

25. Клиценко Г. В. Строительство горизонтально-разветвленных скважин в России. Современное состояние и перспективы / Г. В. Клиценко. – Текст : электронный. – URL : <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s074/s074-014.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

26. Stalder J. L. Многоствольные горизонтальные скважины увеличивают дебит и снижают стоимость барреля нефти на месторождении Зуата Венесуэла / John L. Stalder, Gregory D. York, Robert J. Kopper [и др.] – Текст : электронный. // SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, 12–14 March, 2001, Porlamar, Margarita Island, Venezuela. – SPE 69700. – URL : <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-69700-MS>. (дата обращения: 12.03.2020).

27. Эффективность внедрения технологии строительства многозабойных скважин с горизонтальным окончанием на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, Л. С. Бондаренко [и др.] – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 10. – С. 42–45.

28. Ахияров А. В. Анализ работы многозабойных и многоствольных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» / А. В. Ахияров. – Текст : электронный // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): материалы Девятой Международной научно-технической конференции ; отв. ред. О. А. Новоселов. – Т.1. Бурение и разработка нефтяных и газовых месторождений. – Тюмень, 2014. – 350 с. – URL : <http://www.studfiles.ru/preview/5334307/page:8/> (дата обращения: 12.03.2020).

29. Бакиров Д. Л. Многозабойные скважины: практический опыт Западной Сибири / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов. – Тюмень : ОАО «Тюменский дом печати», 2015. – 232 с. – Текст : непосредственный.

30. Шамгунов Р. Методы повышения нефтеотдачи пластов: состояние и перспективы / Р. Шамгунов. – Текст : электронный // Нефтегазовая Вертикаль. – 2012. – № 17. – С. 80–85.– URL : <http://www.ngv.ru/upload/iblock/339/339d3d7cd3ad84bea39e0deaec6925af.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

31. Подкуйко П. П. Обоснование и внедрение технологии строительства скважин с разветвленно-горизонтальным окончанием на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» / П. П. Подкуйко, Д.Л. Бакиров, И.К. Ахметшин, М.М. Фаттахов. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 9. – С. 27–29.

32. Климов М. Особенности разработки месторождений системой многоствольных горизонтальных скважин. Практический опыт / М. Климов, Л. Гапонова, М. Карнаухов. – Текст : непосредственный // ВЕСТНИК SPE. Россия и Каспийский регион. – 2009. – № 4 (май). – С. 9–18.

33. Климов М. Особенности разработки месторождений системой многоствольных горизонтальных скважин. Практический опыт / М. Климов, Л. Гапонова, М. Карнаухов. – Текст : электронный // Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка, 28–30 окт. 2008 г., г. Москва. – URL : <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/SPE-117372-RU?id=conference-paper%2FSPE-117372-RU> (дата обращения: 12.03.2020).

34. Опыт бурения многозабойных горизонтальных скважин в ПАО «Удмуртнефть» / И. П. Заикин, К. В. Кемпф, О. Л. Готлиб [и др.] – Текст : электронный // ROGTEC MAGAZINE. – 2011. – Март. – URL : http://rogtecmagazine.com/PDF/Issue_024/04_Rosneft_EOR_Udmumefit.pdf (дата обращения: 12.03.2020).

35. Опыт бурения многоствольных скважин в республике Коми / И. П. Заикин, К. В. Кемпф, А. И. Федоров [и др.] – Текст : электронный // Научно-технический вестник ПАО «НК «Роснефть». – 2011. – № 1–3. – С. 14–15. – URL : http://www.rosneft.ru/attach/0/02/92/v01_2011.pdf (дата обращения: 12.03.2020)

36. Красневский Ю. С. Опыт и перспективы разработки залежей нижнепермских отложений многозабойными горизонтальными скважинами на примере Лемезинского месторождения / Ю. С. Красневский. – Текст : непосредственный // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, 14–16 окт. 2014 г. – Москва, 2014. – SPE 171217.

37. Коносов Д. А. Опыт бурения первой многозабойной скважины на Ванкорском месторождении / Д. А. Коносов. – Текст : непосредственный // Инжиниринг строительства и реконструкции скважин ПАО «НК «Роснефть»: тезисы докладов V науч.-практ. конф., 9–10 июня 2015 г., г. Самара / ООО «СамараНИПИнефть». – Самара, 2015. – С. 29–30.

38. Первый отечественный опыт проектирования строительства скважин с большим отклонением ствола от вертикали на арктическом шельфе России / Гарри Оганов [и др.] – Текст : электронный // Нефть и капитал. Технологии ТЭК. – 2005. – № 8. – URL : http://www.oilcapital.ru/edition/technik/archives/technik/technik_04_2005/74712/public/74781.shtml. (дата обращения: 12.03.2020).

39. Отгружена первая партия нефти с месторождения «Приразломная» в Арктике. – Текст : электронный. – URL : <http://www.oilcapital.ru/transport/239290.html> (дата обращения: 12.03.2020).

40. Генеральный директор ПАО «Севернефтегазпром» Станислав Цыганков выступил на международной конференции «Ямал Нефтегаз 2014», которая проходит в Салехарде. – Текст : электронный // Информационное агентство «Север-Пресс». – URL : <http://www.yamal.org/ekonomika/neft-i-gaz/item/2784-na-yuzhno-russkom-mestorozhdenii-buryat-skvazhinu-na-turonskuyu-zalezh> (дата обращения: 12.03.2020).

41. Кустышев И. А. Опыт проектирования многозабойных скважин для разработки Южно-Русского месторождения / А. И. Кустышев, И. В. Чижов, В. А. Сметанин. – Текст : непосредственный // Наука и техника в газовой промышленности. – 2010. – № 1. – С. 4–8.

42. Цыганков С. Е. Особенности опытно-промышленной разработки туронской газовой залежи Южно-Русского месторождения / С. Е. Цыганков, А. А. Дорофеев, Т. В. Сопнев. – Текст : непосредственный // Газовая промышленность. – 2014. – № 5. – С. 32–34.

43. Освоение низкопроницаемых пластов многозабойными газовыми скважинами / А.В. Кустышев, В.А. Сеханиашвили, И.А. Кустышев, А.В. Штоль. – Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 5. – С. 15–17.

44. Патент 2379487 RU МПК (51) E21B 43/14 92006.01), E21B 7/04 (2006.01). Конструкция многозабойной скважины для эксплуатации в зоне многолетнемерзлых пород / Крылов Г.В., Кустышев А.В., Гафаров Н.А. [и др.] – Текст : электронный ; патентообладатель ПАО «Газпром». – № 2008124925/03; заявл. 18.06.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2. – URL : <http://www.freepatent.ru/patents/2379487> (дата обращения: 12.03.2020).

45. Патент 2536523 RU E21B 43/14, E21B37/06. Способ разработки многопластового месторождения газа / Цыганков С.Е., Касьяненко А.А., Дорофеев А.А. [и др.] – Текст : электронный ; патентообладатель ПАО «Севернефтегазпром». – 2013134425/03; заявл. 24.07.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36. – URL : <http://www.findpatent.ru/patent/253/2536523.html> (дата обращения: 12.03.2020).

46. Патент на полезную модель № 137844 RU МПК (51) E21B 7/04 (2006.01), E21B 43/00 (2006.01). Конструкция многозабойной газовой скважины для беспакерной эксплуатации / Сехниашвили В. А., Кустышев И.А., Кустышев А.В., Немков А.В. [и др.] – Текст : электронный ; патентообладатель ПАО «Газпром». – № 2013149413/03; заявл. 07.11.2013; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – URL : <http://poleznayamodel.ru/model/13/137844.html> (дата обращения: 12.03.2020).

47. Патент на полезную модель № 137662 RU МПК E21B 7/04 (2006.01), E21B 43/00 (2006.01). Конструкция многозабойной газовой скважины / Сехниашвили В. А., Кустышев И.А., Кустышев А.В., Немков А.В. [и др.] – Текст : электронный ; патентообладатель ПАО «Газпром». – № 2013149411/03; заявл.

07.11.2013; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – URL : <http://bankpatentov.ru/node/562967> (дата обращения: 12.03.2020).

48. Вакула А. Применение горизонтальных технологий при разработке месторождений ПАО «Татнефть» / А. Вакула, Р. Бикбулатов. – Текст : электронный // Бурение и нефть. – 2009. – № 10. – URL : <http://burneft.ru/archive/issues/2009-10/11> (дата обращения: 12.03.2020).

49. Строительство и эксплуатация горизонтальных и многозабойных скважин в Татарстане / Р.Х. Фаткуллин [и др.] – Текст : электронный // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 3. – С. 54–55.

50. Патент 2214496 RU МПК7 E21B7/06. Безклиновый способ бурения многоствольной скважины / Заявитель и патентообладатель ПАО НПО «Буровая техника», ООО «Татнефть-Бурение». – 2002117003/03; заяв. 26.06.2002; опубл. 20.10.2003. – 3 с. – Текст : непосредственный.

51. Иктисанов В. А. Методы расчета продуктивности и интерпретации КВД для скважин сложной архитектуры / В. А. Иктисанов. – Текст : непосредственный // Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка, 26–28 окт. 2010 г. – Москва, 2010. – SPE 133477.

52. Бурение наклонных и горизонтальных скважин / А. Г. Калинин [и др.]. – Москва : Недра, 1997. – С.127–160. – Текст : непосредственный.

53. Хакимзянов И. Н. Теория и практика разработки нефтяных месторождений скважинами с горизонтальным окончанием : 25.00.17: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / И. Н. Хакимзянов ; ТатНИПИнефть. – Текст : электронный. – Бугульма, 2012. – URL : <http://earthpapers.net/teoriya-i-praktika-razrabotki-neftyanyh-mestorozhdeniy-skvazhinami-s-gorizontalnym-okonchaniem> (дата обращения: 12.03.2020).

54. Ахметгареев В. Применение скважин сложной архитектуры для разработки трудноизвлекаемых запасов нефти в карбонатных коллекторах месторождений Республики Татарстан / В. Ахметгареев, З. Идиятуллина. – Текст : электронный // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, 14–16 окт. 2014 г. – Москва, 2014. – SPE 171327.

55. Основные итоги и перспективы разработки баженовской свиты Салымского месторождения / В.П. Степанов [и др.] – Текст : непосредственный // Геофизика. – 2007. – № 4.

56. Информационный бюллетень ТНК-ВР. – 2007. – № 6. – 29 с. – Текст : непосредственный.

57. Русское месторождение: современные подходы к разработке / А. Корабельников [и др.] / Текст : электронный // Новатор. – 2008. – № 25 (декабрь). – С. 8–12. – URL : <http://ru.scribd.com/doc/36266998/TNK-BP-Innovator25> (дата обращения: 12.03.2020).

58. Одного ствола мало. «Тюменнефтегаз» пробурил на Русском месторождении пятиствольную горизонтальную скважину. – Текст : электронный // Нефтесервис. – 2009. – № 03 (интернет сайт www.indpg.ru). – URL : <http://www.indpg.ru/nefteservis/2009/03/26967.html> (дата обращения: 12.03.2020).

59. Обоснование применения многозабойных скважин на Самотлорском месторождении / А.Ф. Сунагатуллин, А.В. Аржиловский, Т.Ф. Манапов, Ю.В. Михеев. – Текст : непосредственный // Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка, 26–28 окт. 2010 г. – Москва, 2010. – SPE 136085.

60. Третьяков Д. Л. Первый опыт освоения и ремонта многозабойных скважин с применением механизма ориентации гибкой трубы / Д. Л. Третьяков, М. И. Галай. – Текст : электронный // Колтюбинговые технологии. – 2013. – 1 (1) 2013. – С. 60–63. – URL : <http://tp-ning.ru/img/14-Remont-2.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

61. Оптимизация размещения и порядка бурения многоствольных скважин в процессе мониторинга разработки Кравцовского месторождения / В. Ф. Сомов, В. З. Минликаев, В. М. Десятков [и др.] – Текст : электронный // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 5.

62. Комплексный подход к проектированию многоствольных скважин на шельфе Каспийского моря / А. Василевич, В. Звягин, Р. Фомиев [и др.] – Текст : электронный // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, 14–16 окт. 2014 г. – Москва, 2014. – SPE 171267.

63. Фаттахов М. М. Техничко-экономическое обоснование строительства многоствольных скважин / М. М. Фаттахов. – Текст : непосредственный // Сборник работ победителей XX юбил. конкурса на лучшую молодежную науч.-техн. разработку по проблемам топл.-энерг. комплекса ; Министерство энергетики Рос. Федерации; Общерос. общественная орг. «Нац. система развития науч., твор. и инновац. деят. молодежи России «ИНТЕГРАЦИЯ». – Москва, 2013. – 344 с.

64. Мимс М. Проектирование и ведение бурения для скважин с большим отклонением от вертикали и сложных скважин / М. Мимс, Т. Крепп, Х. Вильямс. – Текст : непосредственный // K&M Текнолоджи Груп, ЛЛК. – Хьюстон, Техас, 1999. – 227 с.

65. Фаттахов М. М. Оптимизация профилей скважин с большой протяженностью горизонтального участка / М. М. Фаттахов, И. К. Ахметшин. – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2012. – № 8. – С.42–44.

66. Бакиров Д. Л. Опыт строительства скважин сложной архитектуры на месторождениях ПАО «ЛУКОЙЛ» в Западной Сибири / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, Л. С. Бондаренко. – Текст : непосредственный // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, 14 - 16 окт. 2014 г. – Москва, 2014. – SPE 171264.

67. Бакиров Д. Л. Строительство многоствольных и многозабойных скважин на месторождениях ОАО «ЛУКОЙЛ» в Западной Сибири / Д. Л. Бакиров, М.М. Фаттахов, Л.С. Бондаренко. – Текст : непосредственный // Инженерная практика. – 2015. – №3.– С. 24–26. – URL : <http://lib.glavteh.ru/materials/publication/stroitelstvo-mnogostvolnykh-i-mnogozaboynykh-skvazhin-na-mestorozhdeniyakh-oao-lukoil-v-zapadnoy-sib/> (дата обращения: 12.03.2020).

68. Джалилова А. Необычные скважины / А. Джалилова. – Текст : непосредственный // Республиканский еженедельник (Казахстан) газета «Новое поколение». – 2005. – № 24 (368).

69. Отчет о деятельности ПАО «ЛУКОЙЛ» за 2005 год. – Текст : электронный. – URL : <http://www.risk-manage.ru/catalog/2005/lukoil2005ru.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

70. Обоснование технологии строительства скважин с разветвлено-горизонтальным окончанием на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ– Западная Сибирь». – Текст : непосредственный // IX конференция молодых специалистов организаций, осуществляющих виды деятельности, связанной с использованием участками недр на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры : сборник материалов конференции ; отв. ред. докт. техн. наук В. В. Кривошеев. – Новосибирск: Параллель, 2009. – С. 245–248.

71. Уникальный опыт по проведению водоизоляционных работ с применением двух надувных пакеров на ГНКТ в горизонтальной скважине, законченной восьмистадийной компоновкой МГРП / А. С. Голованев, А. А. Потрясов, В.Н. Ковалев [и др.] – Текст : электронный // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, 14 - 16 окт. 2014 г. – Москва, 2014. – SPE 171268.

72. Веремко Н. А. Опыт применения многозонных ГРП в горизонтальных скважинах / Н. А. Веремко, В. В. Шкандратов [и др.] – Текст : непосредственный // Вестник ЦКР Роснедра. – 2012. – № 4. – С. 9–14.

73. К вопросу о заканчивании горизонтальных скважин с открытым забоем в терригенных коллекторах Западной Сибири / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, Д. В. Малютин, Э. В. Бабушкин. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 9. – С. 56–64.

74. Янин А. Н. Результаты эксплуатации добывающих скважин с открытым забоем на Мамонтовском месторождении / А. Н. Янин, Р. А. Нугуманов. – Текст : непосредственный // Проблемы разработки нефтяных месторождений Западной Сибири. – Тюмень; Курган : Зауралье, 2010. – 608 с.

75. Коваленко Ю. Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин : 01.02.04 : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Ю. Ф. Коваленко ; Библиотека ИПМех РАН. – Текст : электронный. – Москва, 2012. – 46 с. – URL : <http://www.ipmnet.ru/pdf/Kovalenko2012.pdf> (дата обращения: 12.03.2020).

76. Фаттахов М. М. Классификатор многозабойных и многоствольных скважин / М. М. Фаттахов. – Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2015. – № 4. – С. 22–24.

77. Технология бурения нефтяных и газовых скважин : учебник для вузов / А. Н. Попов, А. И. Спивак, Т. О. Акбулатов [и др.] ; под общ. ред. А. И. Спивака. – Текст : непосредственный. – Москва : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 509 с.

78. Расчеты при бурении наклонных и горизонтальных скважин : учебное пособие / Т. О. Акбулатов, Л. М. Левинсон, Р. Г. Салихов, Ф. Н. Янгиров. – Текст : непосредственный. – СПб.: ООО «Недра», 2005. – 119 с.

79. Исмаков Р. А. Обоснование требований к профилям разветвленно-горизонтальных стволов / Р. А. Исмаков, Д. Л. Бакиров, П. П. Подкуйко [и др.]. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 9. – С. 30–34.

80. Планирование профилей многозабойных скважин / М. М. Фаттахов, Д. Л. Бакиров, П. А. Багаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 11. – С. 36–48.

81. Яшков В. А. Применение новых технологий при бурении боковых наклонно-направленных стволов на месторождениях ПАО «Самаранефтегаз» / В. А. Яшков, А. Н. Коротов. – Текст : непосредственный // Нефть. Газ. Новации. – 2009. – № 10. – С. 73–78.

82. Справочник бурового мастера ; под общ. ред. В. П. Овчинникова, С. И. Грачева, А. А. Фролова. – Москва : Инфра-Инженерия, 2006. – 608 с. – Текст : непосредственный.

83. Подкуйко П. П. Критерии определения эффективности применения различных технологий при бурении горизонтальных стволов скважин / П. П. Подкуйко. – Текст : непосредственный // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море. – 2010. – № 8. – С. 2–3.

84. Технологический регламент по планированию и строительству многозабойных скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» /

исп. Бакиров Д. Л., Фаттахов М. М. : утв. приказом ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» от 04.02.2015 г. № 23 / ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». – Когалым, 2015. – Текст : непосредственный.

85. Бакиров Д. Л. Планирование и строительство многозабойных скважин с большим отходом от вертикали / Д. Л. Бакиров, И. К. Ахметшин, М. М. Фаттахов [и др.] – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 9. – С. 41–50.

86.. Применение инновационных решений при реализации нефтяного и газового проектов добычи углеводородов с вводом Пякяхинского месторождения ПАО «ЛУКОЙЛ» в 2016 г. / С. А. Солянов, М. Г. Мавлетдинов, А. В. Зайцев, Д. В. Аптулин. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. - № 8. – С.40–43.

87. Современный опыт заканчивания облегченных конструкций горизонтальных скважин / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, В. А. Бурдыга [и др.] – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 11. – С. 48-53.

88. Развитие технологий заканчивания скважин с горизонтальным и многозабойным окончанием в ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» / М. М. Фаттахов, Д. Л. Бакиров, В. А. Бурдыга [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2016. - № 8. – С. 25-27.

89. Сооружение боковых отводов при строительстве многозабойных скважин : учебное пособие / В. П. Овчинников, М. М. Фаттахов, Д. Л. Бакиров [и др.]. – Тюмень : ТИУ, 2017. – 130 с. – Текст : непосредственный.

90. Исследования на стенде осложнений, полученных при формировании многоствольных стыков // Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, Я. И. Баранников [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. – 2017. - № 10. – С.39-45

91. Техничко-технологические решения для повышения эффективности бурения многозабойных скважин // М. М. Фаттахов, Д. Л. Бакиров, Л. С.

Бондаренко [и др.]. – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 9. – С. 58-63.

92. Юдчиц В.В. Поиск новых технологий при эксплуатационном бурении для вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов / В. В. Юдчиц, Р. Е. Литовар, М. М. Фаттахов [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. – 2019. – № 9 (609) . – С. 5-9

93. Бакиров Д. Л. Совершенствование технологии строительства горизонтальных скважин / Д. Л. Бакиров, М. М. Фаттахов, Э. В. Бабушкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело. – 2020. - № 1. - С. 55-59