

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ И ДЛИН СТВОЛОВ МНОГОСТВОЛЬНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЛЕКТОРА

Фокеева Л.Х.

Альметьевский государственный нефтяной институт

Проведено гидродинамическое моделирование и установлен ряд закономерностей притока жидкости к многоствольным горизонтальным скважинам. Разработаны рекомендации по выбору оптимальной траектории и длин стволов. Предложено геолого-экономическое решение задачи определения оптимальной траектории и длин стволов с учетом особенностей коллектора. Рассмотрены вопросы бурения многоствольных скважин на нескольких пластах или горизонтах.

Введение

Ведущие зарубежные сервисные компании располагают сегодня необходимыми технологиями и оборудованием для многозабойного бурения, что создает предпосылки для ее широкого распространения. Технология строительства многоствольных скважин, основанная на отечественном опыте, получает широкое распространение и в ряде российских нефтяных компаний – ОАО «Татнефть», ОАО «Сургутнефтегаз» и др. В настоящее время в ОАО «Татнефть» пробурено более 30 двуствольных, одна четырехствольная и три трехствольные скважины. Ряд конструкций скважин приведен на рисунке 1.

Бурение многоствольных горизонтальных скважин считается перспективным направлением. Руководство компании «Halliburton» полагает, что для извлечения нефти из малопродуктивных коллекторов требуются горизонтальные скважины большой длины. Пробурив несколько стволов, можно значительно сократить затраты и увеличить дебит и объем дополнительно извлекаемых запасов. Аналогичные рассуждения приводят Алиев З.С., Сомов Б.Е. и Чекушин В.Ф. [1] - для низкопродуктивных маломощных и с большой площадью залежей использование многоствольных скважин может быть практически единственным вариантом их освоения.

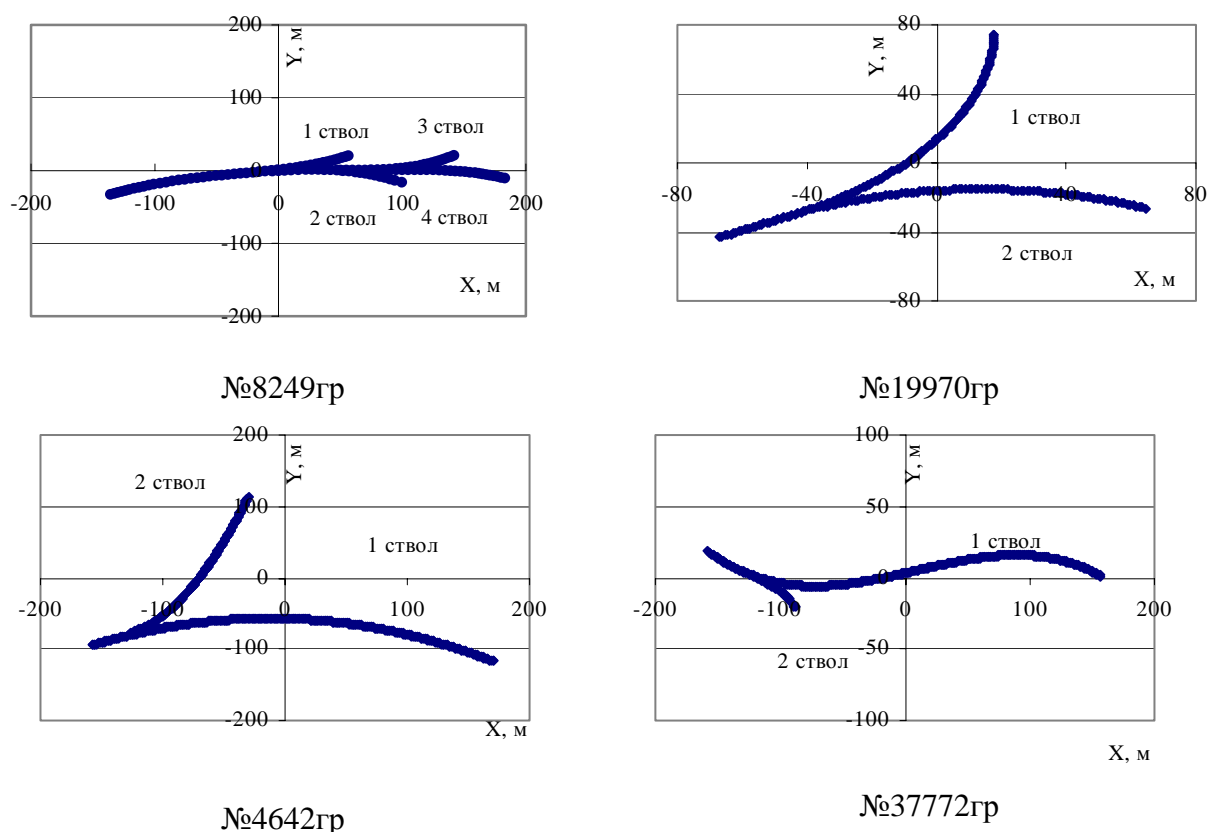


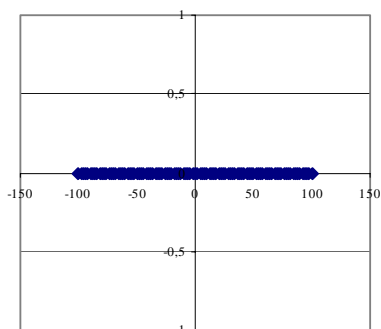
Рисунок 1 - Примеры траектории стволов многоствольных скважин в ОАО «Татнефть» (вид сверху)

Основным преимуществом многозабойных скважин является снижение фильтрационных сопротивлений за счет наличия ответвлений от основного горизонтального ствола. Данный фактор является первичным. Вторичными факторами являются: увеличение коэффициента продуктивности, дебита, нефтеотдачи пласта, сокращение затрат на строительство скважины в себестоимости добычи нефти и др.

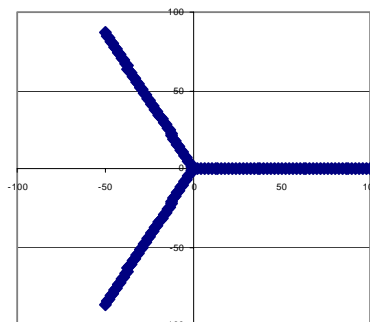
Кроме снижения фильтрационных сопротивлений применение многоствольных скважин увеличивает вероятность нахождения участков пласта с хорошими коллекторскими свойствами. Именно в связи с этой причиной получены кратные увеличения продуктивных характеристик многоствольных скважин, описанные в работе [5].

На повестке дня стоят вопросы выбора наиболее эффективной и экономичной архитектуры дренажа с учетом уникальных характеристик каждого коллектора и рациональной эксплуатации этих скважин.

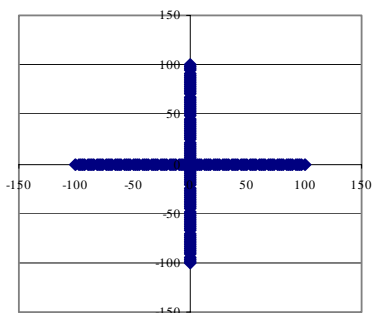
Для детального изучения данных вопросов необходимо выполнять гидродинамическое моделирование. Исходной информацией для этого служат результаты гидродинамических исследований.



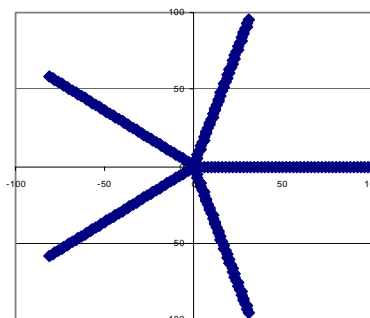
а)



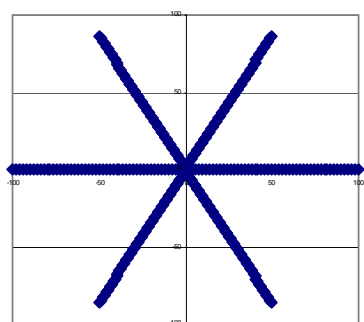
б)



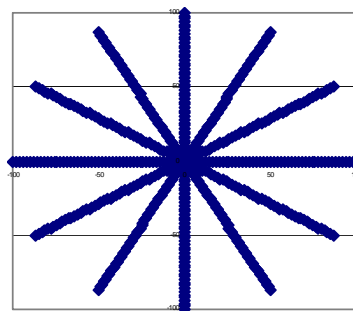
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2 – Траектории стволов модельных скважин, используемых для расчета дебита по формуле Борисова Ю.П., Пилатовского В.П., Табакова В.П.

К настоящему времени отсутствуют публикации по интерпретации результатов гидродинамических исследований на неустановившихся режимах фильтрации для многоствольных скважин. Более того, для установившейся фильтрации известна только одна зависимость, описывающая приток в

однородном пласте к многоствольной горизонтальной скважине – уравнение Борисова Ю.П., Пилатовского В.П., Табакова В.П. [2]. Авторами рассматривались только прямые стволы одинаковой длины, расположенные на равном удалении друг от друга (рисунок 2). Другие теоретические зависимости выведены для наклонных стволов скважины [8] и многоярусной многоствольной скважины. Отметим, что в общем случае стволы многоствольной скважины могут быть различной длины и конфигурации. Согласно работе [1] многоствольные горизонтальные скважины практически не изучены.

В связи с этим, ранее нами были предложены и апробированы способы определения фильтрационных параметров пласта по данным установившихся и неуставившихся исследований многоствольной горизонтальной скважины с различной конфигурацией стволов [6,9,7]. Для описания притока жидкости использовался прием, применяемый для одноствольных горизонтальных скважин. Исходная пространственная задача сводилась к решению двух плоских задач. В вертикальной плоскости - к притоку жидкости к точечному стоку в полосе с непроницаемыми кровлей и подошвой. В горизонтальной плоскости - к течению жидкости к стоку, представляющему собой искривленные вертикальные трещины, проходящие через всю толщину пласта [3]. При моделировании сложной траектории ствола в горизонтальной плоскости использовался набор вертикальных скважин (узлов), достаточно близко расположенных друг к другу (рисунок 1).

Располагая относительно простой гидродинамической моделью, проведено изучение оптимальной траектории и длин стволов многоствольных горизонтальных скважин с учетом особенностей коллектора.

Изучение влияния траектории стволов скважины на ее продуктивность

Вначале рассмотрено, какая из траекторий обеспечивает максимальную продуктивность при заданной длине ствола скважины. С этой целью выполнено моделирование для различных траекторий стволов. Изучалось влияние искривления ствола в горизонтальной плоскости, а также влияние ответвлений и разделение на несколько стволов. Данные по отношению (кратности)

продуктивности многоствольной скважины к продуктивности прямого ствола ГС этой же длины свидетельствуют о следующих закономерностях (рисунок 3).

Искривление ствола в виде четверти окружности снижает продуктивность всего лишь на 1%, в виде полуокружности – на 4% (рисунок 3.1 б). Круговой ствол имеет гораздо большее снижение – 15%. Наличие ответвлений уменьшает продуктивность скважины. Так, для скважины с тремя разнесенными стволами на одинаковое расстояние друг от друга снижение продуктивности составляет 6% (рисунок 3.1 в), для скважины с четырьмя стволами – 12% (рисунок 3.1 г). Чем больше пересечений стволов, тем меньше значение получаемой продуктивности (рисунок 3.1 д). Фрактальная структура при заданной длине ствола резко снижает продуктивность.

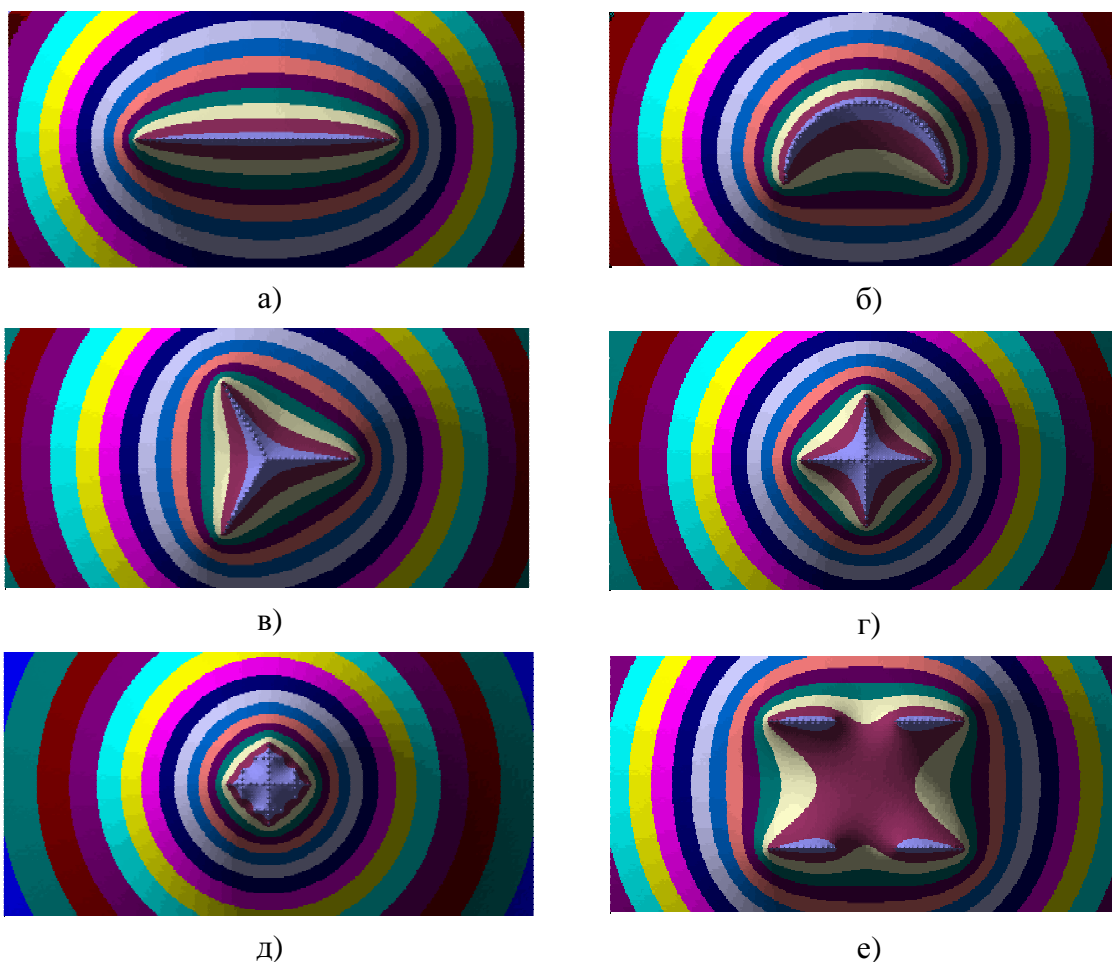


Рисунок 3 – Изобары для различных траекторий стволов суммарной одинаковой длины:

- а) прямой ствол (кратность продуктивности 1,00); б) половина окружности (0,96);
 в) пересечение трех стволов под углом 120° (0,94); г) пересечение двух стволов под прямым углом (0,88); д) пересечение двух стволов под прямым углом с ответвлениями на концах стволов (0,77); е) четыре отдельных ствола (1,12)

Увеличение продуктивности возможно только при разбиении на несколько отстоящих друг от друга стволов (рисунок 3.1 е). Данная картина соответствует зарезке нескольких боковых горизонтальных стволов. Однако для разнесения стволов также требуется дополнительное бурение. Выигрыш продуктивности будет компенсироваться увеличением общей длины скважины. Например, с учетом разнесения стволов для траектории стволов, представленных на рисунке 3.1 е, будет происходить снижение продуктивности на 43%. Наличие отдельных в продуктивном пласте стволов дает лишь возможность улучшить изоляцию обводнившихся участков пласта по сравнению многоствольной скважиной, разнесение стволов которой выполнено в продуктивном пласте.

Далее выполнено моделирование на примере реальных многоствольных скважин. Для этого проведен расчет дебита скважины от пробуренной в пласте длины ствола в однородном бесконечном пласте. Для моделирования использовались: гидропроводность пласта, забойное и пластовое давления, определенные по результатам гидродинамических исследований [7].

Отмечаются следующие закономерности (рисунки 4, 5). По мере бурения первого ствола скважины вначале наблюдается значительный рост дебита. Далее увеличение дебита с длиной ствола хорошо описывается линейным уравнением. При бурении второго ствола вначале происходит стабилизация дебита. Это обусловлено интерференцией узлов скважины, расположенных близко друг к другу. По мере увеличения длины второго ствола также наблюдается прирост дебита.

Для четырехствольной скважины №8249гр бурение каждого ствола вначале приводит к стабилизации дебита и последующему его росту по мере удаления от предыдущего ствола. Отсюда следует важный вывод - бурение дополнительных стволов малой длины не приводит к росту продуктивных характеристик скважины. Данный вывод подтверждает также скважина №37772гр, на которой бурение «аппендикса» практически не привело к увеличению дебита (рисунок 1).

Сравнение продолжения линии тренда с дебитом скважины свидетельствует, что бурение второго ствола в отличие от одноствольной скважины той же длины, снизило продуктивные характеристики скважины

№19970гр примерно на 17%, скважины №4642гр – на 12%. Бурение четырех стволов скважины №8249гр вместо одноствольной ГС той же длины уменьшило продуктивность на 29%.

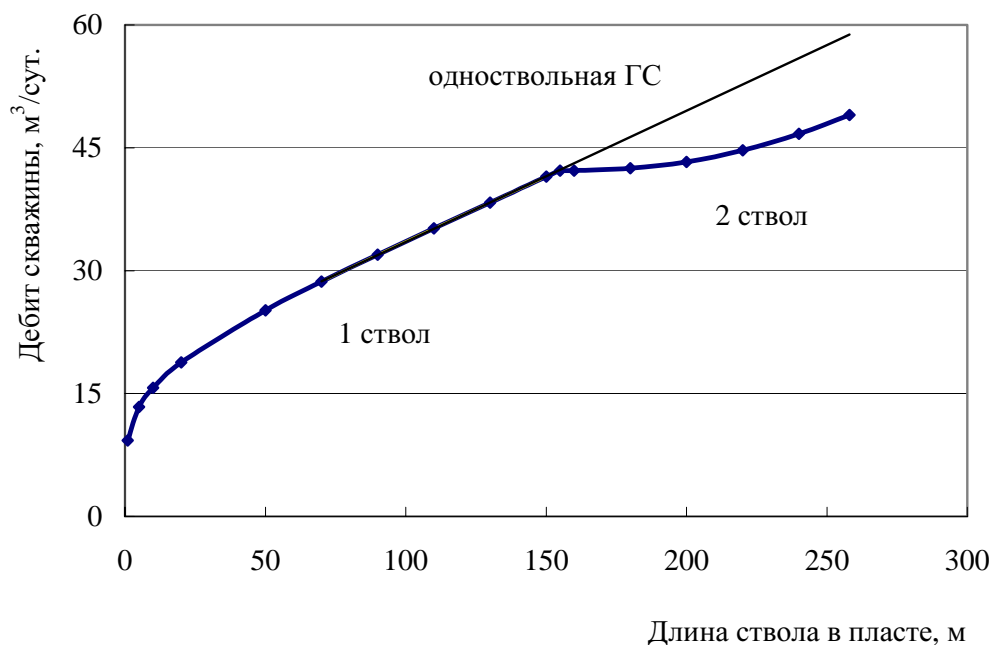


Рисунок 4 – Расчетное изменение дебита скважины №19970гр по мере бурения ее стволов

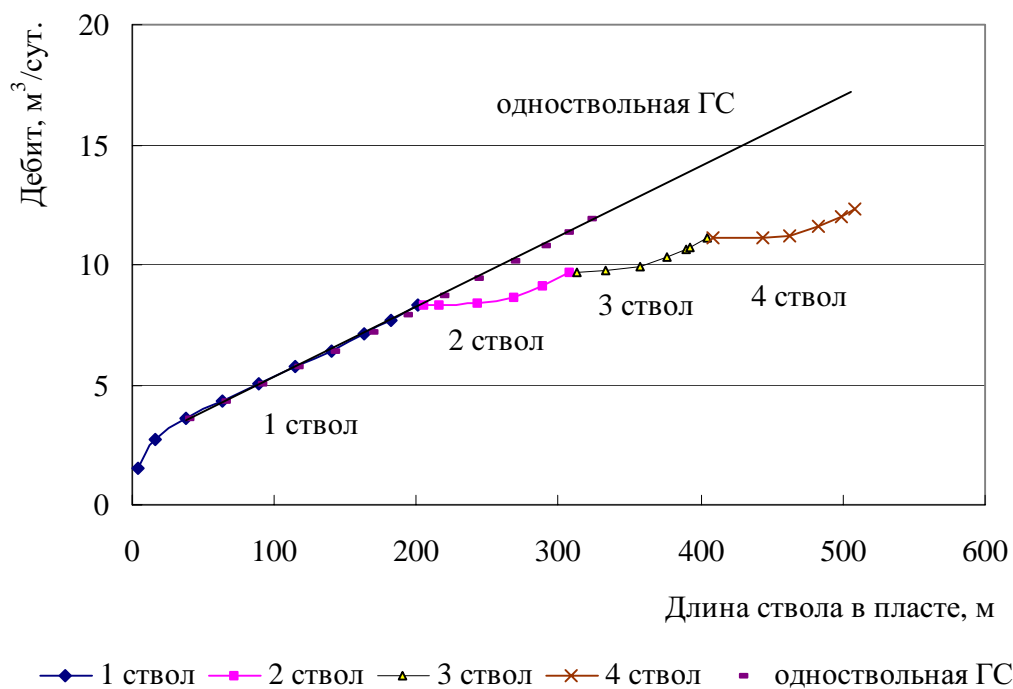


Рисунок 5 – Расчетное изменение дебита скважины №8249гр по мере бурения ее стволов

Более значительное снижение продуктивных характеристик по сравнению с модельными скважинами, представленными на рисунке 3, обусловлено плавным уводом стволов друг от друга. Это вызвано существующей технологией бурения и приводит к большему взаимовлиянию стволов.

Полученные выводы отчасти перекликаются с выводами работы [5], в которой отмечается, что увеличение числа стволов более определенного предела (4-6 стволов) не приводит к заметному приросту дебита в связи с возрастающей интерференцией между стволами.

Отметим, что в данной работе моделировался только однородный бесконечный пласт. Расчеты проведены без учета эффективной или работающей длины стволов скважины. В действительности, бурение стволов в различных направлениях увеличивает вероятность пересечения трещин пласта [5]. Кроме того, в отличие от бесконечного пласта, когда влиянием соседних скважин можно пренебречь, для реальной скважины вместо линейного увеличения дебита с длиной будет наблюдаться постепенное снижение темпов роста дебита (рисунок б). Учет влияния данных факторов является темой отдельной работы.

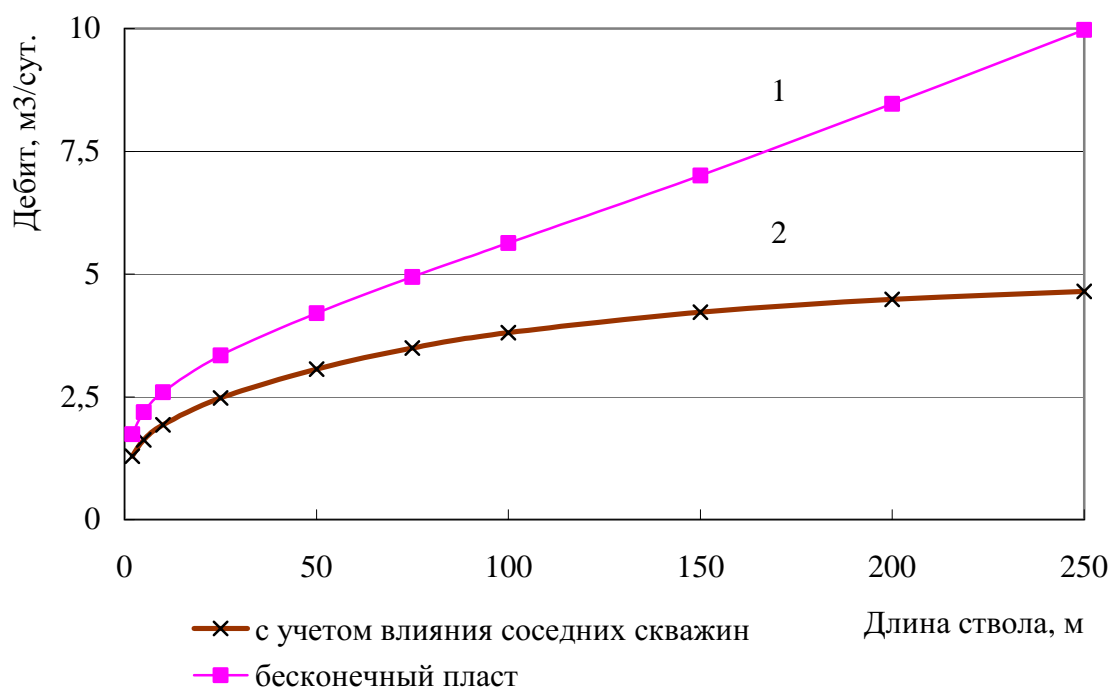


Рисунок б - Зависимость дебита от длины ствола для модели бесконечного пласта (1) и с учетом влияния соседних скважин (2)

В итоге, бурение многоствольной скважины изначально приводит к снижению продуктивности на единицу длины по сравнению с одноствольной горизонтальной скважиной. Наиболее эффективными являются скважины с малым числом стволов, с наибольшей длиной и разводкой стволов друг от друга.

Другими условиями применения многоствольных скважин могут быть: значительное удорожание строительства горизонтальной скважины большой длины, а также потребность в достижении высоких продуктивностей скважины при разработке низкопроницаемых коллекторов, шельфовых месторождений и при добыче высоковязких нефтей и битумов. Окончательное решение о выборе траектории многоствольных скважин должно приниматься после гидродинамического моделирования и экономического обоснования.

Определение оптимальной траектории и длин стволов многоствольных горизонтальных скважин

Одной из важных задач является определение оптимальной траектории и длин стволов с учетом геолого-физических характеристик коллектора. Увеличение числа и длин стволов приводит к росту продуктивности и дебита скважины. С другой стороны, стоимость скважины также увеличивается с ростом длины стволов. Поэтому существует оптимальная конфигурация многоствольной горизонтальной скважины.

Предлагаемый подход к решению этой задачи заключается в получении зависимостей дебита скважины и стоимости строительства для различных вариантов траекторий и длин стволов. При этом следует учитывать те требования к проектированию стволов, которые были рассмотрены ранее. Далее рассчитывается чистый дисконтированный поток наличности NPV или индекс доходности инвестиций ИД и определяются их максимумы. Выбирается та система дренажа и длина стволов, которая приводит к максимуму данных экономических показателей. В качестве примера на рисунке 5 приведены результаты расчетов для модельных многоствольных скважин с различным количеством стволов одинаковой длины, разнесенных от основного ствола по окружности на равном расстоянии друг от друга.

Для расчетов использовались следующие исходные данные: проницаемость $0,016 \text{ мкм}^2$, гидропроводность $3,5 \text{ мкм}^2 \cdot \text{м}/(\text{Па}\cdot\text{с})$, глубина кровли 1100 м, депрессия 4,0 МПа. Отмечается, что с увеличением числа стволов происходит замедление роста дебита, увеличение стоимости скважины. Параметр NPV для заданных условий имеет максимальное значение при количестве стволов, равном 6. Соответственно, именно эта конструкция скважины (рисунок 2д) является оптимальной.

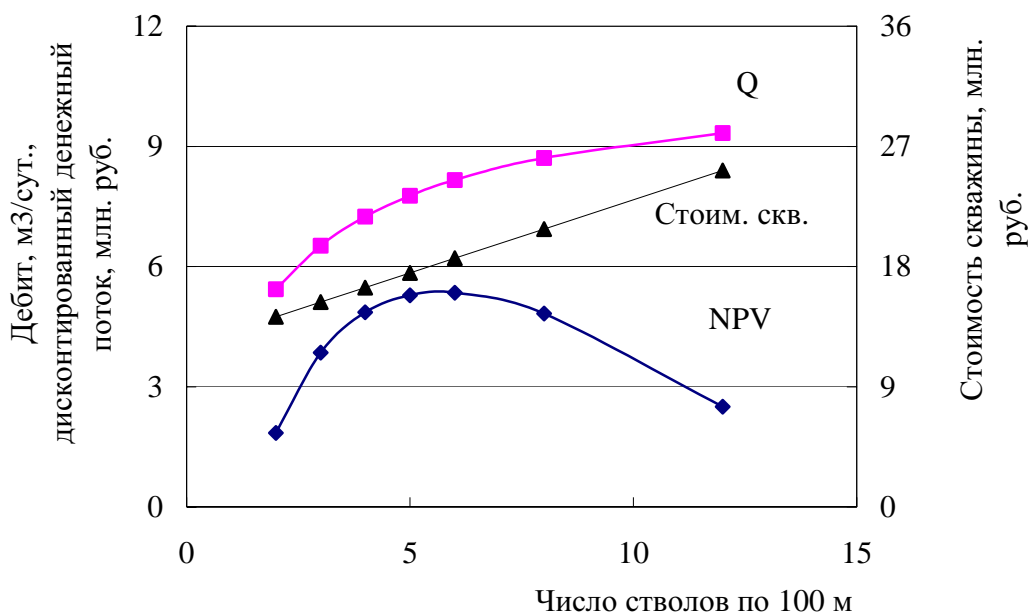


Рисунок 7 – Зависимости дебита, стоимости строительства и накопленного дисконтированного потока наличности NPV от числа стволов модельных скважин, представленных на рисунке 2 (проницаемость $0,016 \text{ мкм}^2$)

Для пласта с проницаемостью, большей в 1,5 раза ($0,024 \text{ мкм}^2$) по сравнению с предыдущими расчетами, картина изменяется (рисунок 8). Максимум NPV достигается при числе стволов, равном 8.

Предлагаемый подход позволяет также оценить экономическую эффективность уже пробуренных скважин. В качестве примера на рисунке 9 приведены результаты расчетов по скважине №19970гр. Отмечается, что по мере бурения второго ствола экономические параметры NPV и ИД вначале, как и дебит, стабилизируются и лишь впоследствии начинают увеличиваться. Максимумы NPV и ИД достигаются для конечной пробуренной длины.

Дальнейшее увеличение длины стволов могло бы привести к еще лучшим экономическим показателям. Здесь следует отметить, что при расчетах дебита использовалась модель бесконечного пласта. При влиянии окружающих скважин действительный рост дебита будет меньшим, как показано на рисунке 6.

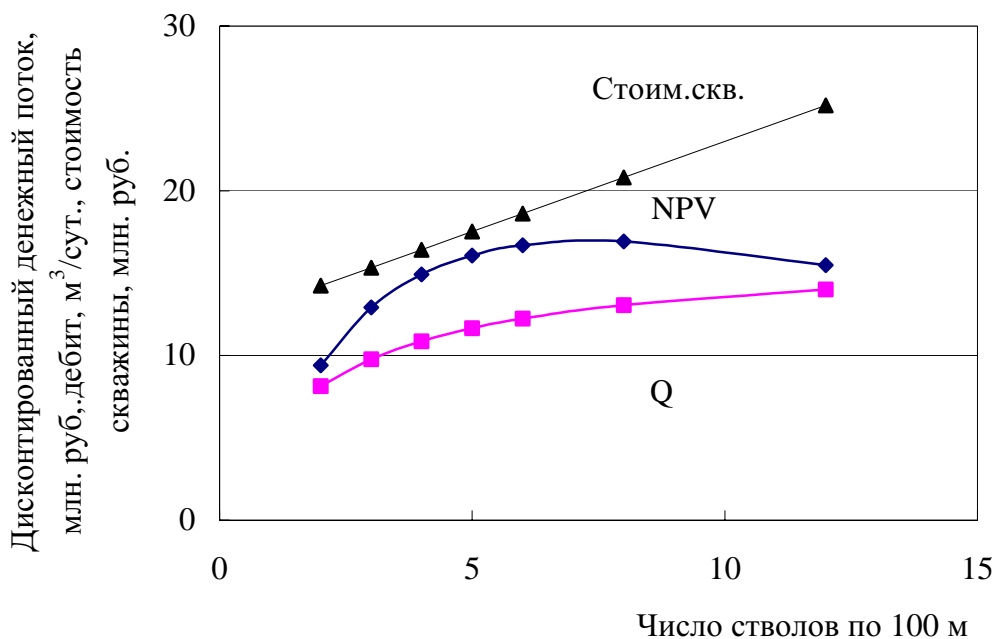
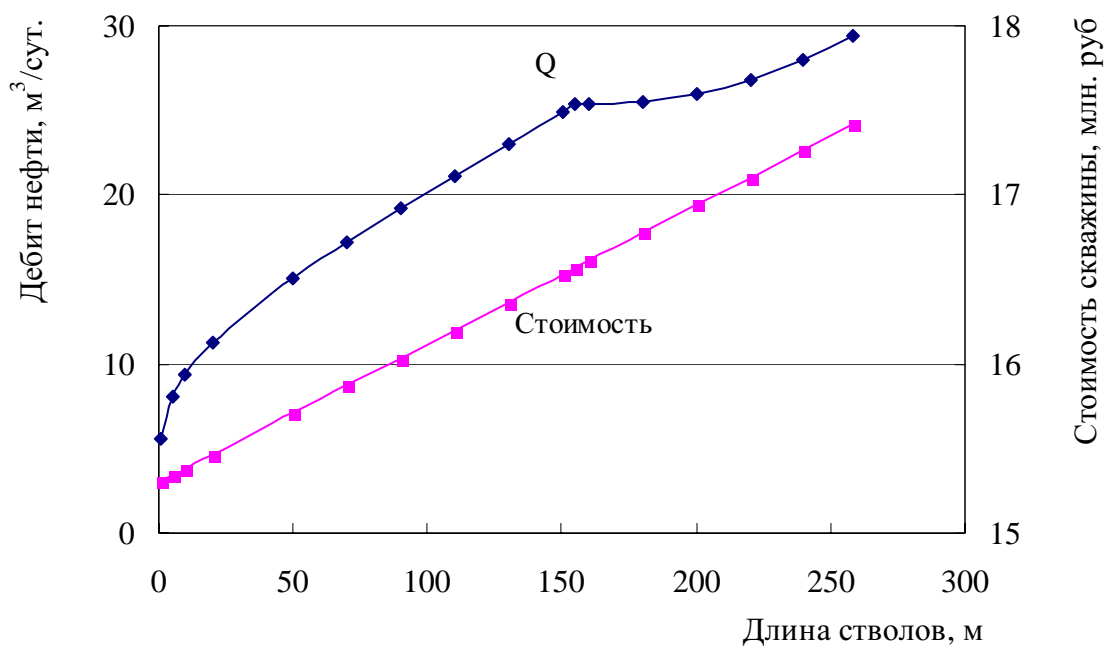


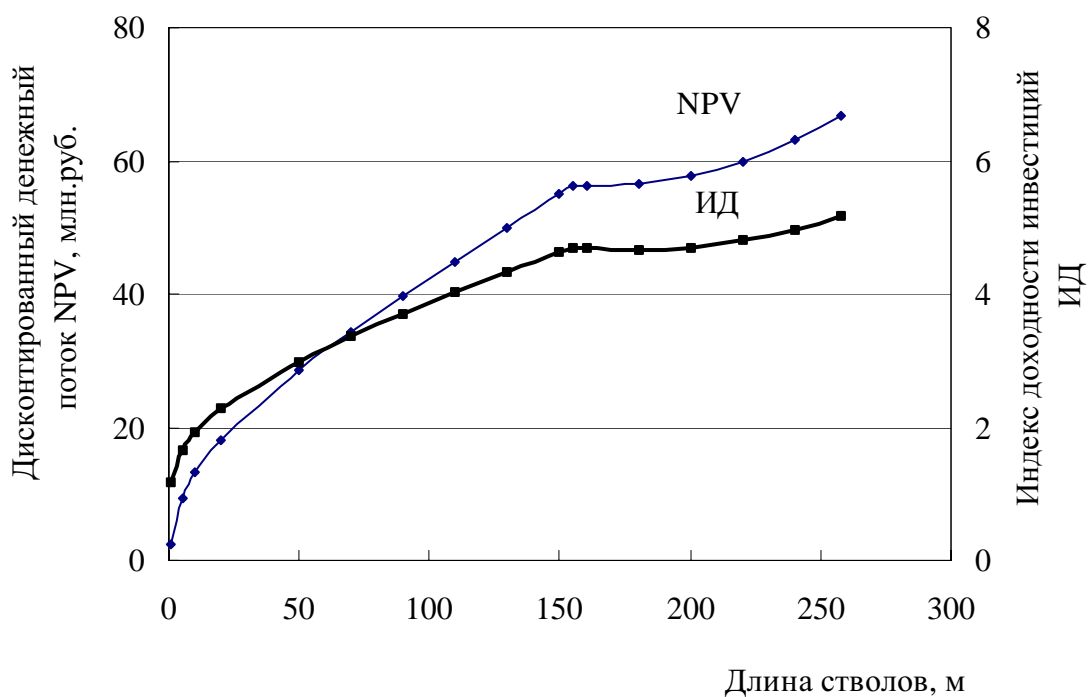
Рисунок 8 – Зависимости дебита, стоимости строительства и накопленного дисконтированного потока наличности NPV от числа стволов модельных скважин, представленных на рисунке 2 (проницаемость 0,024 мкм²)

Для скважины №4642гр несмотря на большую пробуренную длину, положительные значения NPV достигаются только при завершении второго ствола (рисунок 10). Индекс доходности чуть выше единицы. Для повышения эффективности строительства скважины в данных горно-геологических условиях необходимо бурить стволы большей длины и/или увеличивать число стволов.

В целом, решение задачи определения оптимальной траектории и длин стволов многоствольных горизонтальных скважин должно рассчитываться для каждой скважины отдельно с учетом геолого-физических характеристик коллектора.

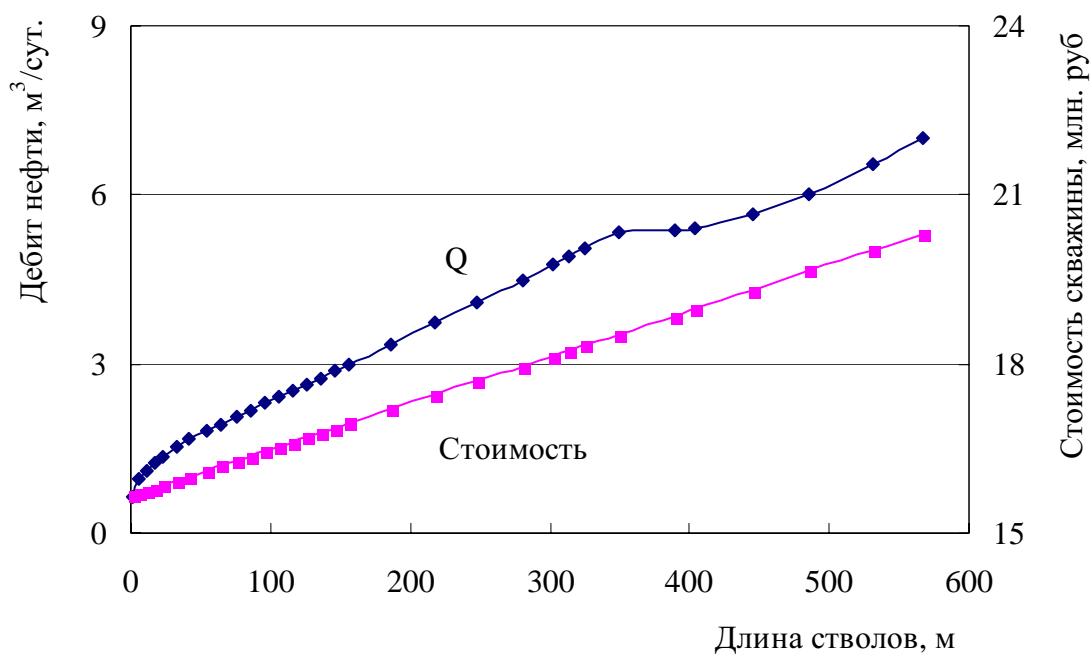


а)

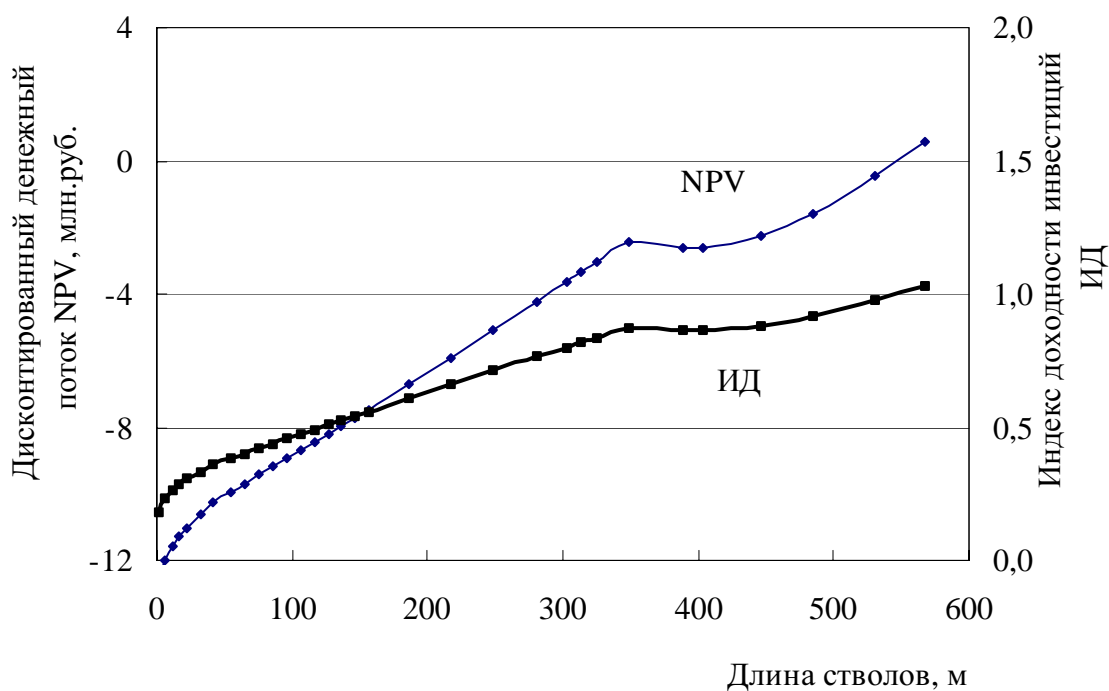


б)

Рисунок 9 – Результаты моделирования:
 а) дебита по нефти, стоимости скважины,
 б) дисконтированного денежного потока, индекса доходности инвестиций
 от пробуренной длины по скважине №19970гр



а)



б)

Рисунок 10 – Результаты моделирования:
 а) дебита по нефти, стоимости скважины,
 б) дисконтированного денежного потока, индекса доходности инвестиций
 от пробуренной длины по скважине №4642гр

Бурение многоствольных скважин при совместной или отдельной эксплуатации нескольких пластов или горизонтов

В предыдущих разделах предполагалось, что многоствольная горизонтальная скважина располагается в одном пласте. Бурение многоствольных скважин может быть эффективным при совместной или отдельной эксплуатации нескольких изолированных пластов или горизонтов. В этом случае каждый горизонт или пласт разрабатывается отдельным горизонтальным стволом. Снижение продуктивности за счет взаимовлияния стволов отсутствует. Гидродинамическое моделирование в этом случае аналогично моделированию одноствольной горизонтальной скважины с дебитом, составляющим часть от общего дебита.

Многоствольная скважина позволяет регулировать выработку запасов из различных горизонтов. Для этого для каждого пласта (горизонта) необходимо подбирать свою длину ствола, исходя из заданного критерия оптимизации. Наибольшие дебиты нефти в начальный период и обводненность в процессе эксплуатации будут достигаться при увеличении длины стола в высокопродуктивном коллекторе. Наиболее равномерная выработка пластов и максимальная нефтеотдача будут характерны при увеличении до определенного предела длины ствола в низкопроницаемом коллекторе. Учитывая, что дебит скважины прямо пропорционален гидропроводности, для равномерной выработки пластов в первом приближении необходимо, чтобы соотношение длин стволов было равно обратному соотношению гидропроводности различных горизонтов. При этом необходимо учитывать ряд дополнительных факторов: упругий запас пласта, тип коллектора, близость ВНК и др. В целом, бурение многоствольных скважин на различные горизонты с заданной длиной стола может позволить улучшить выработку запасов. Данное направление также является темой отдельной работы.

Одной из актуальных задач является разработка технических средств для регулирования притока из каждого ствола. Это позволит: проводить отсечку стволов по мере достижения высокой обводненности, т.е. регулировать процесс эксплуатации, а также выполнять гидродинамические

исследования каждого ствола. Разработка данных технических средств позволит полностью использовать преимущества многоствольных скважин.

Основные выводы

Выполнено гидродинамическое моделирование притока в однородном бесконечном пласте для различных траекторий стволов скважины. Отмечается, что наличие нескольких стволов увеличивает продуктивность скважины по сравнению с горизонтальной скважиной без ответвлений. Однако, рост числа стволов, их близость друг к другу, малые длины стволов, наличие плавных разводов стволов друг от друга снижают продуктивные характеристики на единицу длины ствола.

Многоствольные скважины могут быть эффективными по сравнению с одноствольными: при большой глубине залегания пластов, разбуривании шельфовых месторождений, значительном удорожании строительства одноствольных скважин большой длины, при разработке высоковязких нефтей и низкопроницаемых коллекторов.

Предложено геолого-экономическое решение задачи определения оптимальной траектории и длин стволов для многоствольных горизонтальных скважин с учетом особенностей коллектора.

Литература

1. Алиев З.С., Сомов Б.Е., Чекушин В.Ф. Обоснование конструкции горизонтальных и многоствольно-горизонтальных скважин для освоения нефтяных месторождений. – М.: Издательство «Техника». ООО «Тума групп», 2001. – 192 с.
2. Басниев К.С., Алиев З.С., Черных В.В. Методы расчетов дебитов наклонных и многоствольных горизонтальных скважин. – М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 1999.
3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. - М.: Недра, 1993.- 416 с.: ил.
4. Борисов Ю.П., Пилатовский В.П., Табаков В.П. Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. - М.: Недра, 1964. – 154 с.
5. Григорян А.М. Вскрытие пластов многозабойными и горизонтальными скважинами. М.: Недра. – 1969. – 192 с.

6. Иктисанов В.А., Фокеева Л.Х. Моделирование притока жидкости к многоствольным скважинам // Материалы науч.-практ. конференции «Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов. Проблемы их освоения». Изд-во КГУ. – 2005. – С. 121-123.
7. Иктисанов В.А., Фокеева Л.Х., Яраханова Д.Г. Интерпретация КВД многоствольных горизонтальных скважин // Материалы 5-й научно-технической конференции "Современные технологии гидродинамических и диагностических исследований скважин на всех стадиях разработки месторождений" / Изд-во Томского ун-та. Томск, 2006.- С. 83-85.
8. Табаков В.П. Определение дебита и эффективность многозабойной скважины в слоистом пласте // НТ сб. по добыче нефти, ВНИИ. – вып. 2. – 1960.
9. Фокеева Л.Х. Неустановившаяся фильтрация жидкости к многоствольным горизонтальным скважинам // Материалы научной сессии по итогам 2005 года. Часть 1. Изд-во АГНИ. -2006. – С. 64.