

На правах рукописи

За

ЗАЙЦЕВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ
ОКОЛОСКВАЖИННЫХ ЗОН ПЛАСТА НА
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СКВАЖИН В ПРОЦЕССЕ
РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**Специальность: 25.00.17 – разработка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва 2007

Работа выполнена в Институте проблем нефти и газа РАН

Научный руководитель:

д.т.н., проф. Н.Н. Михайлов

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Н.М. Дмитриев
(РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина)

д.т.н., В.А. Черных (ИПНГ РАН)

Ведущая организация:

ОАО "ВНИИнефть" им.
академика А.П.Крылова

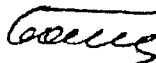
Защита состоится «_03_»__октября__ 2007 г. в __15__ часов
на заседании Диссертационного совета Д.002.076.01 ИПНГ
РАН в зале Ученого Совета ИПНГ РАН (119333, г. Москва, ул.
Губкина, д.3, ИПНГ РАН).

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря
Диссертационного Совета ИПНГ РАН.

Автореферат разослан «___»_____ 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета
к.т.н.

М.Н. Баганова



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы. При сооружении и эксплуатации скважин в части нефтегазового пласта, прилегающей к скважине, происходят техногенные изменения природных фильтрационных свойств и формируется система околоскважинных зон. Околоскважинные зоны обуславливают значительные потери пластовой энергии и снижение продуктивности по отношению к природному состоянию пласта - без измененных околоскважинных зон. Для увеличения продуктивности скважин разработан широкий набор методов и технологий воздействия на околоскважинную зону. Однако эти технологии не учитывают комплексный механизм поражения пласта и изменений состояний околоскважинных зон в различных геолого-технологических условиях, что и обуславливает их низкую эффективность.

Традиционно влияние околоскважинных зон при гидродинамических расчетах рассматривалось как влияние одной или нескольких цилиндрических однородных околоскважинных областей с измененной проницаемостью.

Такой подход не является научно обоснованным, поскольку не учитывает различия механизмов изменения фильтрационных свойств пласта и не позволяет проводить анализ влияния комплексного поражения пласта на производительность скважин. Поэтому разработка способов учета изменений состояния сложнопостроенных околоскважинных зон при гидродинамическом анализе производительности скважин позволит обоснованно выбирать технологии повышения производительности скважин за счет согласования процессов поражения и улучшения фильтрационных свойств пласта в околоскважинных зонах. Это и определяет актуальность диссертационной работы.

Цель работы. Количественный и качественный анализ влияния изменений состояний околоскважинных зон пласта на производительность эксплуатационных и нагнетательных скважин.

Объект исследования: Однородный пласт, вскрытый вертикальными и горизонтальными скважинами и осложненный системой околоскважинных зон с различными механизмами изменения природных фильтрационных свойств.

Основные задачи исследования

1. Анализ и обобщение существующих представлений о закономерностях изменений природных фильтрационных свойств пласта в околоскважинных зонах и о способах учета этих закономерностей при гидродинамических расчетах производительности скважин.
2. Разработка обобщенных гидродинамических моделей влияния комплексных изменений фильтрационных свойств пласта в околоскважинных зонах на производительность скважин.
3. Изучение совместного и индивидуального влияния проявления различных механизмов изменения фильтрационных свойств пласта в околоскважинных зонах на производительность добывающих и нагнетательных скважин.
4. Разработка количественных и качественных критериев влияния особенностей изменения околоскважинных зон пласта на производительность скважин.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы нефтегазовой подземной гидродинамики, аналитические и численные решения задач стационарной фильтрации в пласте и в околоскважинных зонах, данные физики пласта и результаты промысловых гидродинамических исследований, результаты теоретических, лабораторных и промысловых исследований по изучению изменений фильтрационных свойств пласта в околоскважинных зонах.

Научная новизна.

1. Разработан комплекс гидродинамических моделей влияния изменений околоскважинных зон на производительность скважин, отличающихся от известных тем, что позволяет в явном виде учитывать:

- комплексный механизм поражения пласта в околоскважинных зонах;
- реальный характер радиальной неоднородности околоскважинных зон по проницаемости;
- реальный характер изменения проницаемости пласта в зависимости от изменения пластового давления;
- изменение проницаемости околоскважинных зон за счет капиллярного защемления несмачивающей и смачивающей фаз.

2. Исследован вклад различных механизмов изменения природных фильтрационных свойств пласта (загрязнения, деформирования, защемления флюидов) в изменение производительности скважины при сложнопостроенных околоскважинных зонах. Показано что при совместном влиянии загрязнения и деформирования околоскважинной части пласта неучет особенностей радиальных изменений проницаемости приводит к ошибкам в определении производительности скважины в 1,5 и более раз;

- неучет реального характера зависимости проницаемости от пластового давления приводит к ошибкам в определении производительности в 2-3 раза.
 - совместное влияние загрязнения и капиллярного защемления флюидов в околоскважинной области пласта обуславливает изменение продуктивности в 2-3 раза для добывающих и приемистости для нагнетательных скважин.
- Влияние загрязнения в околоскважинной области пласта приводит к дополнительному снижению производительности по сравнению с влиянием только защемленных флюидов в 1,5-2 раза.

В горизонтальных скважинах основные закономерности совместного влияния различных механизмов загрязнения на производительность скважин качественно схожи со случаем вертикальных скважин.

3. Предложены критерии оценки состояния околоскважинных зон, определяющие производительность скважин для сложнопостроенных околоскважинных зон, основанные на:

- анализе нелинейных индикаторных диаграмм с определением параметров загрязнения и деформирования пластов по данным анализа разновременных исследований;
- на дифференцированном анализе интегральных значений скин-фактора с разделением его значений в зависимости от относительного вклада различных механизмов поражения пласта;
- на определении средних значений проницаемости сложнопостроенных околоскважинных зон.
- критерии эффективности повышения производительности скважин при комплексных изменениях фильтрационных свойств в результате воздействия на околоскважинные зоны.
- получены условия неэффективности воздействия на сложнопостроенные околоскважинные зоны.

Практическая значимость.

1. Разработанная методика оценки потерь производительности скважин при вводе их в эксплуатацию после консервации, которая была использована ОАО "Самаранефтегаз" может быть рекомендована для использования и в других организациях при проведении работ связанных с временным глушением скважин.
2. Установленные закономерности влияния сложнопостроенных околоскважинных зон на производительность скважин позволят обоснованно выбирать технологии интенсификации добычи в зависимости от фактического состояния околоскважинных зон.
3. Разработанные гидродинамические модели влияния изменений околоскважинных зон на производительность скважин позволят избежать 1,5-2х кратных ошибок при гидродинамических расчетах производительности скважин.
4. Полученные аналитические решения углубляют понимание относительной роли механизмов поражения пласта при решении проблем

производительности скважин. Они могут служить надежной основой для тестирования многочисленных компьютерных симуляторов.

5. Полученные критерии влияния сложнопостроенных околоскважинных зон на производительность скважин позволят приводить корректное сравнение эффективности различных технологических операций при заканчивании, интенсификации добычи и капитальном ремонте скважин.

Защищаемые положения

1. Обобщенные гидродинамические модели влияния сложнопостроенных околоскважинных зон на продуктивность скважин при комплексном механизме поражения пласта.
2. Закономерности влияния сложнопостроенных околоскважинных зон пласта на продуктивность эксплуатационных и приемистость нагнетательных скважин.
3. Информационные критерии оценки влияния сложнопостроенных околоскважинных зон на производительность скважин.

Апробация работы

Основное содержание работы докладывалось на XVI Губкинских чтениях (РГУ им.Губкина, 2002), 5-й научно-технической конференции “Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России” (РГУ им.Губкина, 2003), 5-й всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России (РГУ им.Губкина, 2003), XLVI-XLVIII научных конференциях “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (МФТИ, 2003-2005), конференции аспирантов, молодых преподавателей и сотрудников ВУЗов и организаций “Молодежная наука – нефтегазовому комплексу” (РГУ им.Губкина, 2004), конференции Фундаментальные проблемы разработки нефтегазовых месторождений, добычи и транспортировки углеводородного сырья (ИПНГ РАН, 2004),), 7-й всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России (РГУ

им.Губкина, 2005), , Всероссийской конференции «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности» (ИПНГ РАН, 2007).

Объем работы. Работа содержит введение, 4 главы текста, заключение, приложение и список используемой литературы. Общий объем работы составляет 131 страницу, в том числе 65 рисунков, 3 таблиц и список литературы из 89 наименований.

Работа выполнена в ИПНГ РАН. Автор выражает глубокую признательность Зам. Директора по научной работе проф. Максимова В.М. за поддержку работы. Особую благодарность автор выражает своему научному руководителю д.т.н., действительному члену РАЕН, проф. Михайлову Н.Н., который был идейным вдохновителем и постоянным наставником данной работы. Автор так же признателен ведущим специалистам ИПНГ РАН докторам технических наук С.Н.Закирову, Э.С.Закирову, А.М.Свалову, В.А.Черных, А.Я.Хавкину за ценные замечания, сделанные на этапе апробации работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении показана актуальность, цели, взаимосвязь с предыдущими исследованиями, новизна и практическая значимость работы.

В первой главе на основе существующих представлений проведен анализ процессов, приводящих к ухудшению фильтрационных свойств околоскважинной части нефтегазового пласта. Приведены результаты Михайлова Н.Н. и Джемесюка А.В., показывающие, что в промысловых условиях изменение проницаемости околоскважинных зон могут достигать 100-кратной величины и более. Поэтому для правильного обоснования технологий повышения продуктивности скважин необходима информация о текущем состоянии околоскважинных зон. Из всего многообразия техногенных процессов, приводящих к изменению проницаемости околоскважинной области пласта, могут быть выделены следующие основные механизмы. Это блокировка пор твердыми частицами и флюидами, изменение проницаемости вследствие деформации пласта. Эти механизмы позволяют охарактеризовать практически все техногенные последствия технологических операций по заканчиванию,

эксплуатации, ремонту скважин, а также интенсификации добычи. С помощью указанных механизмов можно описать любое технологическое состояние сложнопостроенных околоскважинных зон. Далее в работе проведен анализ существующих моделей учета каждого из этих механизмов при гидродинамических расчетах производительности скважин.

Влияние блокировки пор твердыми частицами (загрязнение околоскважинной зоны) традиционно учитывалось введением ступенчатой функции $A(r)=k(r)/k_0$, где k_0 – проницаемость чистой невозмущенной части пласта, значение которой в околоскважинной зоне отличается от остальной части пласта.

$$A = \begin{cases} A_0, & r_c \leq r < r_{oz} \\ 1, & r_{oz} < r \leq r_k \end{cases} \quad (1.1)$$

где r_c – радиус скважины, r_{oz} – радиус зоны загрязнения, r_k – радиус контура. Соответственно изменение проницаемости в околоскважинной зоне описывалось с использованием формулы $k = k_0 A(r)$. В этом случае получается традиционная аналитическая зависимость для производительности скважины.

Подобное задание функции изменения проницаемости приводит к известным простым аналитическим решениям, однако оно не всегда точно описывает процессы, происходящие в пласте, что может приводить к ошибкам в определении производительности скважин.

Анализ экспериментальных данных по изучению характера изменения проницаемости в результате фильтрационной коагуляции твердыми частицами, частицами парафинов, смол, асфальтенов, неорганических солей, микробиологическими и другими частицами показывает, что в околоскважинной зоне радиальное изменение проницаемости, как правило, сильно отличается от ступенчатой функции (1.1) и описывается самыми различными функциями, в том числе и немонотонными.

В некоторых из рассматриваемых работ, для учета загрязнения околоскважинной зоны, была рассмотрена функция загрязнения, зависящая от координат. При таком ее задании, в общем случае не может быть получено аналитического решения и проводились многочисленные численные расчеты. Для частного случая радиально-симметричного течения аналитические решения для определенных классов функций, описывающих загрязнение, были получены Домбровским (1967г.) Численные решения общей задачи были получены Толпаевым В.А. (2000г.)

Другим процессом, оказывающим влияние на проницаемость, является смыкание пор вследствие деформации скелета породы. Многочисленные эксперименты, описанные Басниевым К.С., Горбуновым А.Т., Михайловым Н.Н., Мищенко И.Т., Николаевским В.Н., Черных В.А. и другими, позволили выделить несколько основных видов зависимостей проницаемости от пластового давления. Для большинства из них могут быть получены аналитические зависимости для дебита скважины, которые и используются для учета влияния деформации пласта. Однако, как показали исследования, зависимость проницаемости от напряжений может иметь и гораздо более сложный вид, причем не обязательно носящий монотонный характер.

Кроме того, при росте перепада давления может начаться разрушение породы, что также может оказать влияние на проницаемость. Подобные явления описаны в работе Черных В.А.. Там же была предложена аналитическая зависимость проницаемости от давления, которая учитывает эффекты разрушения породы.

Таким образом, проведенный анализ показал, что описать всё многообразие различных состояний пласта с помощью стандартных подходов не представляется возможным. Это указывает на необходимость более детального изучения законов изменения проницаемости под влиянием деформации и построение обобщенных моделей их учета для гидродинамических расчетов. В промысловой практике обычно ухудшения фильтрационных свойств околоскважинной области пласта учитывается с помощью скин-фактора. В различ-

ных работах скин-фактор определялся и как дополнительное слагаемое в формуле Дююна, и как дополнительный перепад давления в околоскважинной зоне, также приводились определения этого параметра через дебит скважины и коэффициент продуктивности. Гидродинамический анализ скин-фактора проводится на основе цилиндрической модели несжимаемой околоскважинной зоны с заданием ступенчатой функции радиального изменения проницаемости.

Однако во всех определениях скин-фактор это комплексный параметр, отражающий интегрально все виды механизмов нарушения коллектора, влияющих на ухудшение проницаемости и пористости околоскважинного пространства продуктивного пласта и на снижение притока пластовой жидкости. При этом раздельное влияние каждого из факторов ухудшения проницаемости остается неопределенным и нельзя спрогнозировать изменение скин-фактора при изменении условий эксплуатации и интенсификации добычи.

В последние годы в связи с широкомасштабным внедрением постоянно действующих геолого-технологических моделей проводятся массовые численные расчеты влияния околоскважинных зон на показатели разработки. Такие гидродинамические расчеты не могут охарактеризовать влияние сложнопостроенных околоскважинных зон на продуктивность скважин, так как они не учитывают особую гидродинамику околоскважинных зон и не позволяют отразить комплексный механизм поражения пласта в околоскважинных зонах.

В современных гидродинамических симуляторах эффекты заземления смачивающей и несмачивающей фаз вообще не учитываются.

Анализ возможностей существующих гидродинамических моделей продуктивности скважин показывает, что с их помощью нельзя учитывать влияние особенностей сложнопостроенных околоскважинных зон на производительность скважин и необходимо дальнейшее развитие моделей продуктивности, учитывающих комплексный характер поражения пласта в сложнопостроенных околоскважинных зонах.

Во второй главе рассмотрен случай радиально-симметричной однофазной стационарной фильтрации несжимаемой жидкости к скважине с измененными фильтрационными свойствами околоскважинной зоны.

Считалось, что влияние на проницаемость оказывают 2 фактора: засорение околоскважинной зоны и сжимаемость пласта. Для получения решений в общем виде, влияние загрязнения учитывалось введением функции координат $A(x, y, z)$, в радиально-симметричном случае это будет функция радиуса $A(r)$. Зависимость проницаемости от давления учитывалась введением функции $f(p) = k(p)/k_0'$, где k_0' - проницаемость по фильтрующей фазе незагрязненного недеформированного пласта. Засорение и деформация – два различных механизма поражения пласта, которые проявляется в разное время. Поэтому их влияние на проницаемость предполагалось независимым. Полная проницаемость околоскважинной зоны определяется формулой

$$k(r, p) = k_0' f(p) A(r) \quad (2.1)$$

Получена система нелинейных уравнений, которая состоит из уравнения неразрывности, закона Дарси и выражения для проницаемости (2.1). Граничные условия были заданы для давления на скважине и контуре.

Полученная система может быть решена аналитически в случае, если функции $A(r)$ и $f(p)$ непрерывны. В случае их разрывности (например ступенчатой функции $A(r)$), необходимо решить задачу в каждой из непрерывных областей, после чего “склеить” решения, используя условия равенства потоков и давлений на границах зон.

Для решения нелинейной задачи в работе предложено введение специальных интегральных функций $\Psi(r_i, r_j)$ и $\Phi(p_i, p_j)$ в виде.

$$\Psi(r_i, r_j) = \int_{r_i}^{r_j} \frac{dr}{A(r)r}, \quad \Phi(p_i, p_j) = \int_{p_i}^{p_j} f(p) dp \quad (2.2)$$

Для комплексного механизма поражения пласта мощности h получены аналитические выражения для распределения давления и дебита через интегральные функции (2.2).

$$Q = 2\pi h \frac{k'_0 \Phi(p_i, p_e)}{\mu \Psi(r_i, r_e)} \quad (2.3)$$

индексы k, c соответствуют контуру питания и радиусу скважины

Соотношение (2.3) связывает дебит скважины с загрязнением пласта $A(r)$ и изменением проницаемости в результате деформации $f(r)$. Соотношение (2.3) является обобщением известных аналитических решений, полученных различными авторами для частных случаев загрязнения и деформации. Для чистого недеформированного пласта ($f(r)=1, A(r)=1$) формула (2.3) трансформируется в известную формулу Дюпюи.

Далее в работе рассмотрены типичные случаи, позволяющие изучить влияние загрязнения и сжимаемости на продуктивность. Рассмотрены случаи загрязненного сжимаемого и чистого несжимаемого пластов.

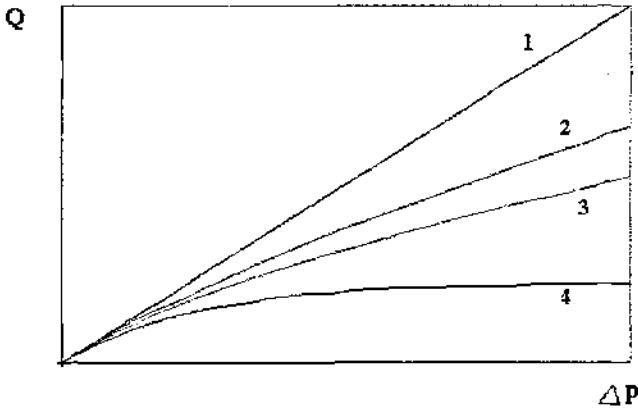
Показано что в случае загрязненного несжимаемого пласта индикаторные диаграммы будут прямолинейными, однако, в зависимости от вида функции загрязнения и радиуса загрязненной зоны, дебиты могут различаться в несколько раз.

Для сжимаемого пласта состояние околоскважинной зоны будет определяться функцией $f(r)$. Для анализа влияния сжимаемости на дебит были использованы функции трех видов: 1) несжимаемый пласт; 2)

$(k/k_0)^3 = (1 + BL \ln(p/p_0))$; 3) $k/k_0 = (p/p_0)^a$; 4) $k/k_0 = \exp(-\alpha(p_k - p))$. Показано, что в отличие от несжимаемого пласта, в данном случае индикаторные диаграммы нелинейные и в зависимости от вида функции сжимаемости дебиты скважины также могут различаться в несколько раз (рис.1).

В работе проведен анализ совместного влияния загрязнения и деформации. Исследован эффект и получено соотношение, связывающее эти эффекты.

Рис.1



При совместном влиянии загрязнения и деформации, коэффициент продуктивности, определяется выражением

$$K = \frac{Q}{\Delta p} = \frac{2\pi k'_0 h}{\mu} \frac{\Phi(p_i, p_e)}{\Psi(r_e, r_i)(p_i - p_e)} \quad (2.4)$$

Для несжимаемого, но загрязненного пласта коэффициент продуктивности не зависит от перепада давления, но его величина зависит от характера загрязнения пласта в околоскважинной зоне. В сжимаемом пласте коэффициент продуктивности также зависит и от депрессии.

В следующем разделе рассмотрена задача о стационарном притоке газа к скважине с измененной проницаемостью в околоскважинной зоне. Фильтрация газа предполагалась по двучленному закону. Задача была сведена к задаче Коши и решалась численно.

На основе результатов решений выявлено влияние изменений состояний околоскважинной зоны на дебит газовой скважины, которые оказались схожими с результатами, полученными для несжимаемой жидкости.

В следующем разделе рассмотрена двумерная задача притока нефти к горизонтальной скважине.

Изменение проницаемости в околоскважинной зоне и сжимаемость пласта учитывалось следующим образом:

$$k_i(x, y, p) = k'_{0i} A_i(x, y) f(p),$$

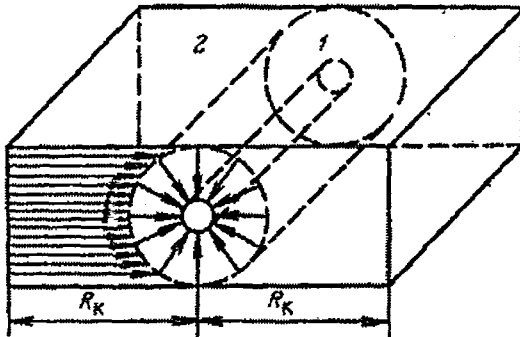
где k'_{0i} – проницаемость по направлениям X, Y в условиях невозмущенного пласта (константы); $A_i(x, y)$ и $f(p)$ – функции, учитывающие засорение и сжимаемость соответственно.

Полученное нелинейное дифференциальное уравнение решалось численно. Сравнение полученных результатов с известными аналитическими формулами показало достоверность результатов.

Как и для случая вертикальной скважины было показано влияние состояния околоскважинной зоны и факторов, его определяющих (степень ухудшения проницаемости, радиус околоскважинной зоны, функции загрязнения и сжимаемости) на продуктивность скважины.

Несмотря на невозможность получения аналитического решения в общем виде, для частных случаев при некоторых предположениях, это сделать удалось. В работе было получено аналитическое решение для частного случая, предполагающего разделение течение на два типа: плоскопараллельное и плоскорадиальное (рис.2).

Рис.2



Тогда дебит скважины может быть определен по формуле

$$Q = \frac{2\pi k'_0}{\mu} \frac{\Phi(p_c, p_k) h}{r_k \pi + h(\Psi(r_c, r_w) + \ln(h/2r_w))}, \quad (2.5)$$

где h – мощность пласта, $r_{гз}$ – радиус загрязненной зоны.

Для проверки достоверности полученного решения была использована известная формула (Алиев З.С. и Шереметов В.В., 1995г.). Было показано, что при радиусе контура превышающем мощность пласта в несколько раз расхождения полученного решения с известным составляют менее 10%, а при превышении на порядок – менее 4%. Таким образом, при достаточном большом радиусе контура формула (2.5) может быть использована при расчетах.

Третья глава посвящена исследованию влияния капиллярно-защемленных фаз на производительность скважин. Эффекты капиллярного защемления обуславливают изменение гидродинамически неподвижных насыщенных (нефть, вода) в околоскважинной части пласта. Наличие капиллярно-защемленных фаз ранее не учитывалось при анализе производительности скважин. Считалось, что неподвижное (остаточное) нефть (ОНН) и водонасыщение (ОВН) в околоскважинных зонах является величиной неизменной и соответствующей значениям для природного состояния пластов. Фазовая проницаемость по фильтрующей фазе соответствовала конечным точкам относительных фазовых проницаемостей, определенных в лабораторных условиях. В работе показана нефизичность такого подхода. В настоящее время установлено, что капиллярно-защемленные фазы могут приобретать подвижность при изменении соотношений гидродинамического перепада давлений к капиллярному. В работе рассмотрен случай фильтрации подвижных фаз (вода, нефть) при наличии капиллярно-защемленных (нефть, вода). Рассмотрено влияние капиллярно-защемленной нефти на приемистость нагнетательных скважин при совместном влиянии загрязнения и деформации околоскважинной зоны. Фазовая проницаемость для воды при наличии ОНН определяется следующим образом: $k_{\phi} = k_0 f_e(s)$, где k_0 – абсолютная проницаемость, s – водонасыщение промытой зоны пласта, $f_e(s)$ – относительная фазовая прони-

цаемость в промытой зоне, $s = I - s_{or}$ (s_{or} – значение остаточной нефтенасыщенности). Величина $k_0 f_0(s)$ в существующих моделях приемистости считается постоянной величиной. В то же время анализ состояния остаточной нефти в промытых пластах (Н.Н.Михайлов, 1983г.) показал, что в гидрофильных пластах ОНН зависит от гидродинамических условий вытеснения (скорость фильтрации, смачиваемость, вязкость вытесняющего агента). Условия вытеснения могут быть определены отношением действующего гидродинамического градиента давления к капиллярному (число капиллярности). По результатам обобщения экспериментальных исследований определены режимы образования остаточной нефти в зависимости от числа капиллярности. Первый (капиллярный режим) характеризуется постоянным значением остаточной нефтенасыщенности при малых значениях капиллярного числа (N_c). При достижении капиллярным числом критического значения N_{c1} , гидродинамический напор на крупные глобулы становится больше капиллярных сил, и они начинают дробиться, при этом часть мелких глобул становится подвижной, а остаточная нефтенасыщенность уменьшается (капиллярно-напорный режим). При достижении критического значения N_{c2} вся капиллярно зашумленная нефть вымывается из пористой среды (автомодельный режим). В широком диапазоне изменения проницаемости (от 40,8мД до 2190мД) величина N_{c1} составляет $2.7 \cdot 10^{-5} - 4.9 \cdot 10^{-5}$

В зависимости от режимов фильтрации остаточная нефтенасыщенность s_{or} определяется соотношением:

$$s_{or} = \begin{cases} s_{or}^{\max}, & N_c < N_{c1} \\ 1 - s_{wr} - CN_c^\delta, & N_{c1} < N_c \leq N_{c2} \\ s_{or}^{\min}, & N_c > N_{c2} \end{cases} \quad (3.1)$$

где C – коэффициент, определяемый коллекторскими свойствами пласта, δ – коэффициент, определяемый структурой порового пространства, s_{wr} – коэффициент остаточной водонасыщенности пласта.

Обобщая это представление на случай промытого пласта для фазовой прони-

цаемости по воде (k_{ϕ}), получаем:

$$k_{\phi} = k(r, p) f_v(s), \quad f_v(s) = D(s - s_{wr})^{\beta} \quad (3.2)$$

где s – водонасыщение промытой зоны, $f_v(s)$ – функция относительной фазовой проницаемости для нагнетаемой воды, D и β константы.

С увеличением расстояния от стенки нагнетательной скважины происходит смена режимов образования ОНН. Что отражается на значениях относительной фазовой проницаемости для воды в присутствии капиллярно-защемленной нефти (рис.3)

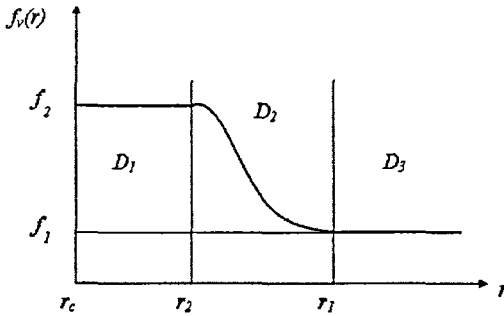


Рис.3 Радиальные изменения относительной фазовой проницаемости в околоскважинной зоне. Области D_1, D_2, D_3 : автомодельный, капиллярно-напорный, капиллярный режимы образования остаточной нефти.

В работе получена система уравнений для решения задачи о приемистости скважин, состоящая из закона Дарси, уравнения неразрывности и выражения для фазовой проницаемости (3.2). При этом ввиду того, что существуют 3 режима фильтрации, в каждом из которых справедлива своя зависимость насыщенности от капиллярного числа, система решалась отдельно в каждой из зон режимов, после чего решения склеивались с помощью граничных условий. Для решения были использованы специальные интегральные функции

$$\Phi(p_i, p_j) = \int_{p_i}^{p_j} f(p) dp, \quad \Psi(r_i, r_j) = \int_{r_i}^{r_j} \frac{dr}{rA(r)},$$

$$\Psi_{\gamma}(r_i, r_j) = \int_{r_i}^{r_j} \frac{dr}{r^{1-\gamma} A(r)}, \quad \text{где } \gamma = \beta\delta \quad (3.3)$$

Приемистость скважины определяется следующим образом

$$Q = \frac{2\pi hk_0}{\mu} f_2 \frac{\Phi(p_e, p_2)}{\Psi(r_e, r_2)} \quad (3.4)$$

Где r_2, p_2 – радиус границы зоны автомодельного режима и давление на границе этой зоны. Эти величины находятся из граничных условий.

В случае отсутствия капиллярно-защемленных фаз выражение (3.4) трансформируется в соотношения (2.3) ($r_2 \rightarrow r_k, p_2 \rightarrow p_k, k_0 f_2 \rightarrow k_0'$), рассмотренное ранее. Кроме общего случая влияния и загрязнения и сжимаемости были рассмотрены отдельно случаи загрязненного несжимаемого и чистого сжимаемого пласта. Рассмотрение влияния загрязнения и сжимаемости по отдельности удобно тем, что позволяет оценить влияние на приемистость каждого из этих факторов. В работе показано индивидуальное влияние каждого из механизмов поражения пласта (загрязнение, сжимаемость и защемление) на размеры зон смены режимов фильтрации, распределение давления и приемистость скважины.

Разработанные гидродинамические модели показали, что размеры зон различных режимов образования остаточной нефти сильно зависят от состояния околоскважинной зоны и для различных функций, моделирующих радиальное изменение проницаемости, они могут различаться в несколько раз. Зависимость приемистости от перепада давления носит нелинейный характер. Установлено, что влияние доотмыва остаточной нефти и загрязнения околоскважинных зон на приемистость можно рассматривать отдельно.

Следующий раздел посвящен анализу влияния защемленной смачивающей фазы (водного фильтрата) на продуктивность добывающих скважин. Фильтрат попадает в околоскважинную зону при вскрытии пластов, при проведении капитального ремонта скважин и других технологических операциях. В процессе глушения скважин происходит задавливание технологической жидкости в околоскважинную зону пласта, при этом происходит изменение его водонасыщенности. Кроме влияния защемленного фильтрата, в около-

скважинной зоне происходит изменение проницаемости за счет загрязнения и сжимаемости.

Влияние всех этих факторов на проницаемость по нефти (k_n) описывалась аналогично предыдущему случаю

$$k_n = k(r, p) f_n(s), \quad k(r, p) = k_0 A(r) f(p) \quad (3.5)$$

где, $f_n(s)$ – значение функции относительной фазовой проницаемости нефти в присутствии остаточной воды, $A(r)$ и $f(p)$ – функции описывающие влияние засорения и деформации соответственно

Размеры зоны проникновения фильтрата в пласт (r_d) обычно известны и считаются постоянными, зависимость фазовой проницаемости по нефти от радиуса представляется в виде:

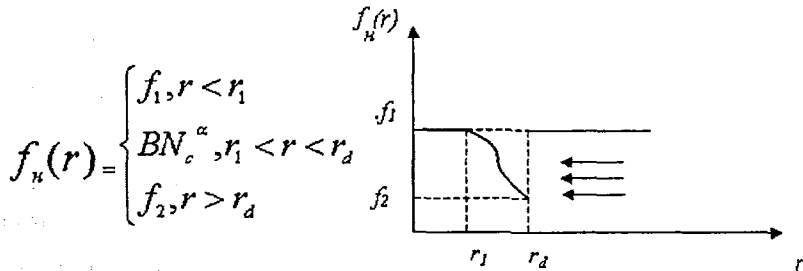


Рис.4 Характер изменения относительной фазовой проницаемости по нефти в зоне проникновения.

Задача решалась аналогично предыдущей, с той лишь разницей, что в данном случае размер зоны с защемленной водонасыщенностью известен и фиксирован, а не определяется с помощью условия на капиллярное число.

В общем виде получено выражение для отношения дебитов скважины до и после воздействия технологической жидкости.

$$Q/Q_0 = f_1 \frac{\Phi(p_c, p_1) \Psi(r_c, r_k)}{\Psi(r_c, r_1) \Phi(p_c, p_k)}, \quad (3.7)$$

Q_0 – дебит скважины без заземленной фазы, Q – дебит при наличии заземленной фазы. Неизвестные величины радиуса зоны автомодельного режима (r_1) и давления на ней (p_1) определяются из системы уравнений для граничных условий (в общем случае она решалась численно).

Как и для нагнетательной скважины были рассмотрены отдельно случаи загрязненного и сжимаемого пласта. Показано влияние загрязнения и сжимаемости на размеры зоны автомодельного режима, на распределение давления и на дебит скважины. Установлено влияние вида зависимости фазовой проницаемости от капиллярного числа на дебит скважины. Проведено сравнение дебитов скважины до и после обработки (глушения) при различных значениях поражения околоскважинной зоны (рис.5).

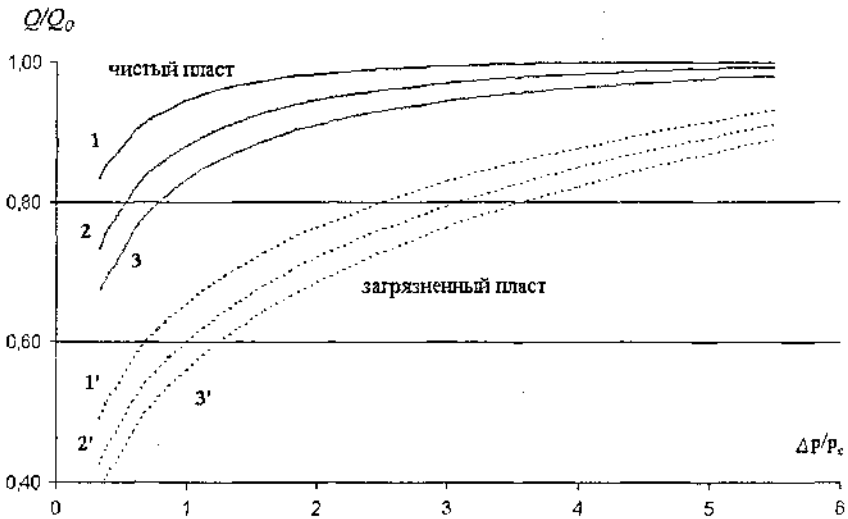


Рис.5 Изменение дебита в результате глушения при различных состояниях околоскважинной зоны. (Q_0 – дебит скважины до глушения (обработки))
 При значениях радиусов зоны пропикновения 1,1': $r_d/r_c=20$; 2,2': $r_d/r_c=40$;
 3,3': $r_d/r_c=60$.

Анализ влияния заземления смачивающей фазы на продуктивность показал, что при увеличении депрессии на пласт влияние остаточной фильтратонасыщенности на дебит уменьшается. Однако для загрязненного пласта влияние остаточной фильтратонасыщенности на дебит больше (рис.6).

Четвертая глава посвящена использованию полученных гидродинамических моделей влияния околоскважинных зон на производительность скважин для обоснования новых информационных критериев влияния околоскважинных зон на продуктивность скважин. Рассмотрены взаимосвязи состояния околоскважинных зон с параметрами индикаторных диаграмм, а также такими параметрами как скин-фактор, относительная продуктивность, средняя проницаемость и коэффициент продуктивности.

Полученные в работе аналитические решения позволили количественно оценить вклад околоскважинных зон в формирование индикаторных диаграмм (ИД). Для линейных ИД, используя разновременные ИД, оценивается функция загрязнения околоскважинной зоны. Для нелинейных ИД можно оценить и функцию загрязнения, и функцию сжимаемости. В работе даны примеры определения этих параметров по месторождениям Квасниковское и Белый Тигр.

Индикаторные диаграммы могут иметь и более сложный немонотонный вид. Из промысловой практики известно, что может существовать критическое забойное давление, намного превышающее давление насыщения нефти газом, ниже которого дебит начинает падать, т.е. индикаторная кривая имеет максимум.

Немонотонный куполообразный вид ИД при забойном давлении выше давления насыщения нефти газом обычно связывали с особым типом зависимости проницаемости от давления. Приведенный в работе анализ формулы для дебита с учетом загрязнения и сжимаемости (2.3), показал, что дебиты скважины всегда возрастают с ростом перепада давления между скважиной и контуром, вне зависимости от вида функций $A(r)$ и $f(p)$. Таким образом, случай немонотонной ИД не может быть описан с помощью вида функций $A(r)$ и

$f(p)$. Исследования, описанные В.А.Черных, показали, что при увеличении перепада давления может начаться разрушение породы, которое влияет на проницаемость, причем как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Таким образом, имеется взаимосвязь между функцией загрязнения $A(r)$ и перепадом давления.

В работе предложено учитывать этот эффект введением зависимости между радиусом загрязненной зоны и перепадом давления. В таком случае для каждого конкретного перепада давления решение задачи будет точно таким же, как и для случая постоянного радиуса зоны загрязнения. Получены ИД для различных функций загрязнения, которые могут иметь максимум. В работе получено аналитическое соотношение для определения наличия максимума на ИД.

Состояние околоскважинных зон обычно характеризуется величинами таких параметров как скин-фактор (s), относительная продуктивность и средняя проницаемость околоскважинной зоны. Полученные в работе решения позволяют определить значения этих параметров для сложнопостроенных околоскважинных зон. Одним из недостатков учета повреждений пласта с помощью скин-фактора является то, что он представляет собой некоторую суммарную величину, характеризующую общее влияние всех механизмов поражения пласта на дебит или перепад давления в околоскважинной зоне. В тоже время, какой механизм поражения и каким образом он влияет, никак не учитывается. В работе установлены соотношения для скин-фактора через функции, определяющие изменение проницаемости – $A(r)$ и $f(p)$. Полученные зависимости показали, что один и тот же скин-фактор может соответствовать совершенно различным комбинациям функций загрязнения и сжимаемости, а значит и различным состояниям околоскважинной зоны. Таким образом, для получения более точной информации о состоянии околоскважинной зоны необходимо разделение скин-фактора на несколько параметров, каждый из которых соответствует своему механизму поражения пласта.

Далее был рассмотрен случай сложнопостроенной околоскважинной зоны,

состоящей из n кольцеобразных зон с различной проницаемостью k_i . При этом изменение проницаемости в i -ой зоне вследствие засорения и сжимаемости описывается функциями $A_i(r), f_i(p)$. Важным параметром, характеризующим такую систему, может являться средняя проницаемость. В работе получено выражение для средней проницаемости через функции загрязнения и сжимаемости каждой из зон. Показано, что значение средней проницаемости может сильно отличаться от общепринятого выражения для обычного представления об околоскважинных зонах. При этом различие тем сильнее, чем больше количество зон. При оценке эффективности геолого-технологических мероприятий (ГТМ) важным параметром, характеризующим изменение дебита при обработке околоскважинной зоны, является относительная продуктивность: отношение дебитов скважины после и до обработки. Обычно считалось, что в результате обработки околоскважинной зоны может меняться лишь ее проницаемость. Однако специальные исследования, проведенные В.М.Максимовым и Н.Н. Михайловым (1997г.) показали, что при воздействии на околоскважинные зоны изменяется и функция сжимаемости.

Это означает, что при воздействии могут измениться как функции загрязнения $A(r)$, так и сжимаемости $f(p)$. В работе получено выражение для относительной продуктивности через функции загрязнения и сжимаемости до и после обработки. Исследовано влияние каждой из них на эффективность ГТМ, Исследовано также влияние состояния околоскважинной зоны на коэффициент продуктивности. Показано, что в случае несжимаемого пласта коэффициент продуктивности зависит от вида функции загрязнения. Для сжимаемого пласта установлена зависимость между коэффициентом продуктивности и функцией сжимаемости $f(p)$. Получено соотношение, определяющее условия неэффективного воздействия на околоскважинную зону. При росте проницаемости наблюдается падение дебита за счет усиления сжимаемости пласта. Разработанные информационные критерии влияния околоскважинных зон на производительность скважин позволили предложить методику оценки потерь

продуктивности скважин при проведении ГТМ. В частности эти критерии были использованы при оценке потерь продуктивности при временном глушении скважины в ОАО “Самаранефтегаз”.

Основные выводы и результаты работы

1. Предложены новые модели учета сложнопостроенных околоскважинных зон на производительность скважин. При этом выделено 3 основных механизма поражения пласта (загрязнение, деформация и защемление флюидов).
2. Разработаны гидродинамические модели продуктивности вертикальных и горизонтальных скважин при комплексном характере поражения пласта.
3. Предложены модели влияния защемления флюидов в околоскважинной зоне на приемистость нагнетательных и продуктивность эксплуатационных скважин. С их помощью обоснованы физические механизмы нелинейности зависимости производительности скважин от депрессии.
4. Обоснованы новые подходы к анализу линейных и нелинейных ИД.
5. Предложены новые критерии оценки влияния состояния околоскважинных зон на производительность скважин.
6. Предложена методика оценки потерь производительности в результате глушения скважины.


Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н. Влияние околоскважинной зоны на продуктивность скважины. //Нефтяное хозяйство 2004, №1.-с.64-66
2. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н. Влияние остаточной нефтенасыщенности на фильтрацию в окрестности нагнетательной скважины. Изв. РАН. Механика жидкости и газа, №4, 2006, с.94-99.
3. M.V. Zaitsev, N.N. Mikhailov Effect of residual oil saturation on the flow through a porous medium in the neighborhood of an injection well. – J.Fluid Dynamics, vol.41, №4, July, 2006, p.568-573

4. Зайцев М.В. Влияние вида зависимости проницаемости от давления на закономерности изменения продуктивности скважин. XVI Губкинские чтения, тезисы докладов. Москва 2002, с.57
5. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н. Гидродинамические модели влияния остаточной насыщенности на приемистость скважин. Нефтегазовая гидромеханика//Сборник научных трудов. – М.: ФГУП Изд-во “Нефть и газ” РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2005, с.151-161
6. Зайцев М.В. Скин-фактор для пластов с различной структурой порового пространства. 5-я научно-техническая конференция “Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России”, РГУ им. Губкина, тезисы докладов. Москва, 2003, с.59.
7. Зайцев М.В. Влияние околоскважинной зоны на продуктивность газовых скважин. 5-я всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России, РГУ им. Губкина, тезисы доклада. Москва, 2003, с.31.
8. Зайцев М.В. Выражение дебита через функции давления и радиуса, моделирующие околоскважинную зону. Тезисы докладов XLVI научной конференции “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, МФТИ, 2003,с.98.
9. Зайцев М.В. Учет влияния различных механических повреждений пласта на производительность скважин. Тезисы доклада научной конференции аспирантов, молодых преподавателей, сотрудников вузов и организаций “Молодежная наука – нефтегазовому комплексу”, РГУ им. Губкина, Москва, 2004, с.14.
10. Зайцев М.В. Учет засорения и сжимаемости в расчетах продуктивности скважин. Тезисы доклада конференции “Фундаментальные проблемы разработки нефтегазовых месторождений, добычи и транспортировки углеводородного сырья”, ИПНГ РАН, Москва, 2004, с.164.

11. Зайцев М.В. Влияние зацементования на производительность скважин. Тезисы докладов XLVII научной конференции “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, МФТИ, 2004, с.54.
12. Зайцев М.В. Моделирование влияния околоскважинной зоны на производительность скважин. Тезисы доклада 7-й всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России, РГУ им. Губкина, Москва, 2005.
13. Зайцев М.В. Анализ влияния околоскважинной зоны на приемистость скважин. Тезисы докладов XLVIII научной конференции “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, МФТИ, 2005, с.53.
14. Гайдуков Л.А., Зайцев М.В. Тезисы докладов XLVIII научной конференции “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, МФТИ, 2006.
15. Зайцев М.В. Гидродинамические модели влияния околоскважинной зоны на производительность скважин. Тезисы докладов Всероссийской конференции «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности», ИФПГ РАН, 2007, с.96.

Сопоскатель



Зайцев М.В.

Подписано в печать 29.08.2007 г.
Исполнено 30.08.2007 г.
Печать трафаретная

Заказ № 650
Тираж: 140экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»
ИНН 7726330900
115230, Москва, Варшавское ш., 36
(495) 975-78-56
www.autoreferat.ru