

На правах рукописи

КАРЕВ Владимир Иосифович

**Влияние напряженно-деформированного состояния
горных пород на фильтрационный процесс и дебит
скважин**

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

Официальные оппоненты:

академик, доктор технических наук,
профессор

Матвеев Валерий Павлович

доктор технических наук,
профессор

Кузнецов Сергей Васильевич

доктор технических наук,
профессор

Мельников Борис Евгеньевич

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела СО РАН

Защита состоится 30 сентября 2010 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Учреждении Российской академии наук Институте проблем машиноведения РАН по адресу: 199178, Санкт-Петербург, Большой пр., В.О., д. 61.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН.

Автореферат разослан “___” _____ 2010 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

В.В. Дубаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение дебита нефтяных и газовых скважин всегда было и остается важнейшей проблемой нефтегазодобывающей отрасли. На величину дебита скважины конкретного месторождения прежде всего влияет состояние призабойной зоны скважины (ПЗС) с точки зрения ее фильтрационных свойств. Ухудшение проницаемости даже в небольшой окрестности скважины существенно снижает ее продуктивность. Традиционно считается, что основными факторами, определяющими это ухудшение, являются коагуляция при бурении и загрязнение фильтрационных каналов в процессе эксплуатации в результате их заиливания, запарафинивания. Однако, существует еще одна важная причина значительного изменения проницаемости в окрестности скважины – это влияние напряжений на фильтрационные свойства породы. Роль напряжений, возникающих в окрестности скважины в процессе ее бурения, освоения и эксплуатации, в формировании фильтрационных свойств ПЗС в настоящее время исследована мало, хотя в нефтяной и газовой промышленности при разведке и эксплуатации месторождений, особенно на больших глубинах, выявлено, что концентрации напряжений в прискважинной зоне существенно влияют на проницаемость пластов, процессы фильтрации и, соответственно, на интенсивность нефтегазопритоков в скважину.

Исследованиям фильтрационных процессов в окрестности скважины и влияния на них напряженно-деформированного состояния посвящена данная работа. Они начаты под руководством академика Христиановича и основаны на идее о том, что фильтрационные течения в горных породах определяются их микро-трещиноватопористой структурой и решающую роль играют действующие в породе напряжения, изменения которых могут приводить как увеличению проницаемости, так и к ее уменьшению, причем необратимому. Растрескивание, разрыхление породы и необратимое увеличение проницаемости можно вызвать, используя упругую энергию, запасенную самой природой - горное давление и энергию пластовой жидкости, осуществляя направленную разгрузку пласта.

Проведенные исследования актуальны как в общенаучном плане – являются вкладом в развитие механики нефтяного пласта, так и с точки зрения практических приложений – для выбора оптимальных способов повышения нефтегазоотдачи пластов, продуктивности скважин и разработки новых экологически чистых и эффективных методов.

Целями работы были:

экспериментальное исследование влияния напряженно-деформированного состояния горных пород, составляющих коллектора нефтяных и газовых месторождений, на фильтрационные свойства;

теоретический анализ фильтрации углеводородного флюида в скважину с учетом структурных изменений, которые могут происходить в породе при изменении напряженного состояния в окрестности скважины.

развитие научно обоснованного подхода к разработке новых эффективных, экологически чистых и экономичных методов повышения продуктивности скважин и нефте-газоотдачи пластов, основанных на использовании природных сил – горного давления и давления пластового флюида.

Для достижения поставленных целей ставились **следующие задачи:**

проведение анализа напряженного состояния в окрестности скважины при различных конструкциях забоя;

разработка методики экспериментального исследования фильтрационных свойств горных пород для определения оптимального с точки зрения повышения дебита скважины воздействия на пласт;

установление зависимости фильтрационных свойств различных типов горных пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния;

разработка математической модели фильтрации двухфазной углеводородной смеси в скважину с учетом зависимости проницаемости породы коллектора от давления в скважине;

разработка новой технологии повышения дебитов нефтяных и газовых скважин, основанной на использовании упругой энергии массива горных пород за счет направленной разгрузки пласта.

Методы исследований. Анализ напряженного состояния проводился известными методами теории упругости с использованием пакета программ ANSYS, разработанного на основе метода конечных элементов. Экспериментальные исследования проводились на уникальной установке, созданной в Институте проблем механики Российской академии наук, – Испытательной системе трехосного независимого нагружения. Фильтрационный процесс рассчитывался с использованием известных методов механики сплошных сред и программы МАТЕМАТИКА. Эффективность разработанной технологии подтверждена опытно-промышленными испытаниями.

На защиту выносятся следующие основные положения.

Методика экспериментального исследования деформационных, прочностных и фильтрационных свойств горных пород на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН).

Классификация горных пород различного состава и структуры с точки зрения влияния напряжений на их проницаемость. Научно обоснованный подход к выбору оптимальных для конкретного

месторождения методов повышения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пластов.

Решение задачи о фильтрации газоконденсатного флюида в скважину при наличии ретроградной конденсации и зависимости проницаемости породы коллектора от давления в скважине.

Новая эффективная, экологически чистая технология повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин, основанная на направленной разгрузке пласта – метод георыхления.

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается натурными испытаниями разработанной технологии при проведении опытно-промысловых работ на скважинах, использованием при анализе механических процессов фундаментальных законов механики сплошных сред и хорошо апробированных пакетов программ при проведении численных расчетов.

Научная новизна результатов работы и практическая ценность заключается прежде всего в том, что развит новый подход к созданию эффективных методов разработки нефтяных и газовых месторождений, основанный на управлении напряженным состоянием пласта в окрестности скважины. Он позволяет создавать эффективные, экономичные, экологически чистые технологии. Впервые разработана классификация горных пород по характеру зависимости их фильтрационных свойств от напряженно-деформированного состояния. Разработана новая технология повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод георыхления. Показана эффективность его применения на газоконденсатных месторождениях, несмотря на наличие ретроградной конденсации.

Метод георыхления успешно применялся на ряде месторождений Западной Сибири и Урала при освоении скважин, капитальном ремонте добывающих скважин и капитальном ремонте нагнетательных скважин. Опытно-промысловые испытания разработанной технологии дали кратное увеличение дебита скважин.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались, обсуждались и представлялись на международных и российских форумах и конференциях: VIII и IX Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001, Нижний Новгород, 2006); научно-практических конференциях по бурению и повышению нефтеотдачи скважин (Москва, 2003, 2004, 2005), международных салонах изобретений и инноваций (Брюссель, 2007 - серебряная медаль, Страсбург, 2009 – золотая медаль), научных чтениях,

посвященных 100-летию С.А.Христиановича, Каспийском энергетическом форуме (Москва, 2009).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 81 наименования, содержит 151 страницу, 5 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проведен краткий обзор исследований по проблеме влияния напряженного состояния горных пород на фильтрационный процесс. Работа основывается и является продолжением исследований Христиановича, Николаевского, Райса и других исследователей механики насыщенных пористых сред. Определены цели данного исследования, сформулированы основные результаты работы, кратко изложено ее содержание по главам.

В первой главе рассмотрено напряженное состояние в окрестности скважины и его изменение при увеличении депрессии для различных вариантов конструкции забоя: открытый ствол, обсаженный ствол, наличие перфорации, горизонтальных, вертикальных щелей. Дано описание экспериментальной установки – Испытательной системы трехосного независимого нагружения, на которой осуществлялось физическое моделирование процессов, происходящих в окрестности скважины при проведении технологических операций, и исследовалось влияние изменения напряжений на фильтрационные свойства различных типов пород. Приведены описания основных программ нагружения, использовавшихся при моделировании.

До пробуривания скважины на грунтовый скелет продуктивного пласта действуют начальные эффективные напряжения, по абсолютной величине равные разности между горным давлением и начальным давлением пластового флюида. После пробуривания скважины в ее окрестности происходит перераспределение напряжений. Радиальные напряжения падают, кольцевые растут, осевые остаются на том же уровне.

Возможны два основных варианта конструкции скважины: открытый ствол и обсаженный ствол. Напряжения в грунтовом скелете, возникающие в окрестности открытого ствола скважины, определяются известным из теории упругости решением задачи Ламэ для цилиндрической полости, находящейся под действием всестороннего сжатия внешним давлением и внутреннего давления заполняющей ее жидкости.

$$s_r = -(q + p_c)(R_c / r)^2 + q + p(r)(1 - \delta)$$

$$s_\theta = (q + p_c)(R_c / r)^2 + q + p(r)(1 - \delta)$$

$$s_z = q + p(r)(1 - \delta)$$

где s_r, s_θ, s_z - компоненты напряжений в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях, q - горное давление ($q < 0$), p_c - давление в скважине, $p(r)$ - давление на расстоянии r от скважины ($p, p_c > 0$), R_c - радиус скважины, δ - доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета.

Максимальные касательные напряжения $\tau = 1/2(s_r - s_\theta)$ равны:

$$\tau = -(q + p_c)(R_c / r)^2$$

В случае обсаженного ствола стальная труба эксплуатационной колонны цементируется на всю пробуренную глубину, включая продуктивный пласт. Гидродинамическая связь с коллектором осуществляется путем создания перфорационных отверстий. С учетом того, что жесткость стали на порядок выше, чем породы, напряжения в окрестности скважины можно считать независимыми от давления в скважине за исключением областей вокруг перфорационных отверстий. Радиальные напряжения, действующие на стенку обсаженной скважины, будут зависеть от качества цементирования. При идеальном качестве, учитывая, что удельный вес цемента близок к среднему удельному весу горных пород, на стенке скважины восстановится горное давление. При наличии в цементном слое пустот и трещин или в случае усадки цемента при застывании, радиальные напряжения будут составлять некоторую долю α от горного давления. Расчеты были проведены для значений α , равных 1 и 0,5. Перфорационное отверстие, длина которого обычно на порядок больше его диаметра, можно рассматривать как скважину с открытым стволом и распределение напряжений вокруг него (за исключением концевой участка) будет описываться приведенными выше формулами.

Для определения напряжений, действующих вокруг кончика перфорационного отверстия, можно воспользоваться известным решением для сферической полости, заполненной жидкостью или газом под давлением p_c и нагруженной вдали всесторонней сжимающей нагрузкой q .

$$s_r = -(q + p_c)(r_c / r)^3 + q + p(r)(1 - \delta)$$

$$s_\theta = \frac{1}{2}(q + p_c)(r_c / r)^3 + q + p(r)(1 - \delta)$$

$$s_\varphi = \frac{1}{2}(q + p_c)(r_c / r)^3 + q + p(r)(1 - \delta)$$

$$\tau = -\frac{3}{4}(q + p_c)(r_c / r)^3$$

где s_r, s_θ, s_φ - компоненты напряжения в радиальном и двух окружных направлениях, r_c - радиус перфорационного отверстия.

В общем случае для определения напряжений в призабойной зоне скважины, имеющей произвольную конструкцию забоя, использовался пакет программ ANSYS.

Граничные условия ставились следующие:

- на стенке необсаженной скважины и на стенках перфорационных отверстий нормальное эффективное напряжение $s_n = -\delta p_c$;
- на стенке обсаженной скважины $s_r = \alpha q$, $\alpha = 1; 0,5$;
- на границе расчетной области $s_r(R_k) = q + p_c$.

Были проведены расчеты для изотропной среды с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,2$.

На рис. 1 представлены распределения максимальных главных напряжений в окрестности открытого ствола скважины с двумя перфорационными отверстиями в виде конусов для разных величин депрессии. Изолинии напряжений отложены в долях от горного давления.

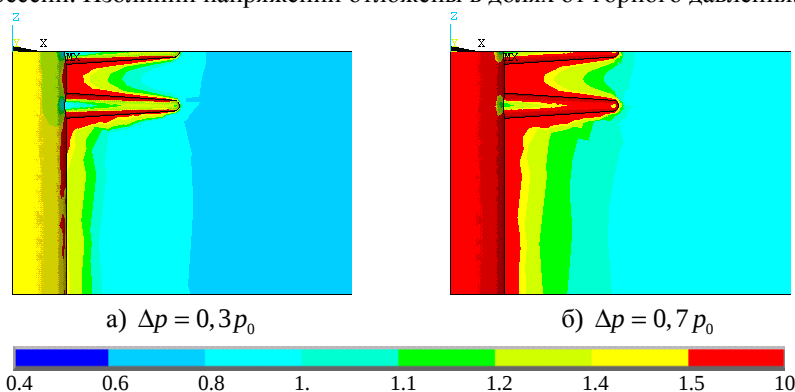


Рис.1. Поле максимальных главных напряжений

$\Delta p = p_0 - p_c$ - депрессия в скважине, p_0 - пластовое давление.

На рис. 2 показаны изолинии интенсивности касательных напряжений τ_i , ответственных за разрушение, в окрестности обсаженной скважины с горизонтальной щелью.

$$\tau_i = \sqrt{\frac{1}{6}[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]} \quad (s_i - \text{главные напряжения})$$

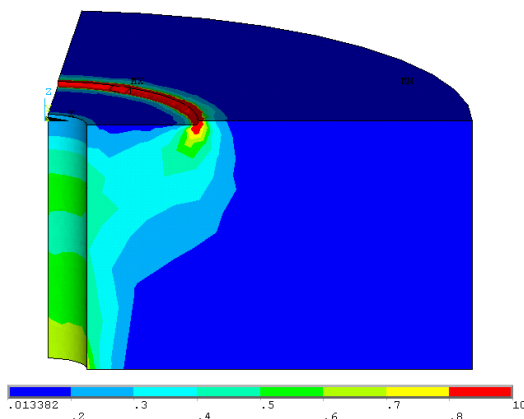


Рис.2. Интенсивность касательных напряжений в окрестности обсаженной скважины с горизонтальной щелью $\Delta p = 0,7 p_0$, $\alpha = 0,5$

Для многих горных пород характерна анизотропия упругих свойств, связанная с их слоистой структурой, наличием трещиноватости. Для таких пород упругие и деформационные характеристики в направлении перпендикулярном слоям могут сильно отличаться от характеристик в плоскостях напластования. Такие породы могут быть описаны, как трансверсально изотропная среда. Деформирование трансверсально-изотропного упругого материала характеризуется пятью независимыми упругими константами: E , E' - модули Юнга в плоскости изотропии и перпендикулярно ей; ν , ν' - коэффициенты Пуассона в плоскости изотропии и перпендикулярно ей; G' - модуль сдвига для любой плоскости, перпендикулярной плоскости изотропии. Как показали многочисленные экспериментальные исследования¹, для большинства горных пород можно указать приближенную формулу, связывающую модуль сдвига G' с остальными упругими константами: $G' \approx \frac{EE'}{E(1+2\nu') + E'}$. На рис. 3 приведены

¹ Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. - М: Изд-во Наука. 1977. стр. 73.

распределения интенсивности касательных напряжений в окрестности скважины с перфорационными отверстиями в изотропной (рис.3а) и трансверсально изотропной среде (рис.3б) при $\Delta p = 0,7 p_0$.

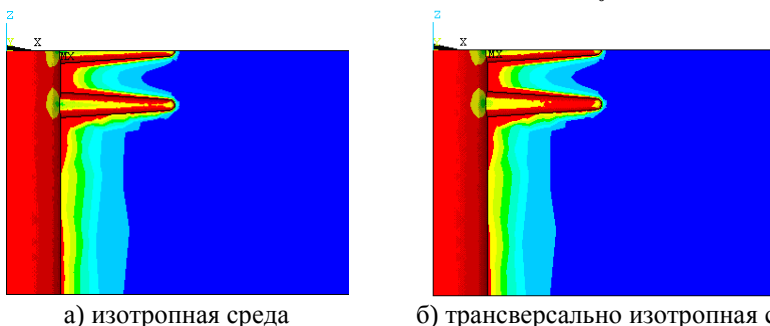


Рис.3. Интенсивность касательных напряжений при депрессии $\Delta p = 0,7 p_0$

Для трансверсально изотропной среды брались следующие значения упругих модулей: $E/E' = 2$; $\nu = \nu' = 0,2$; $G' = 0,53 E'$ (по приближенной формуле). Как видно из рис. 4-5, наличие анизотропии с учетом приближенной зависимости G' незначительно влияет на напряжения. Поэтому при анализе напряженно-деформированного состояния в окрестности скважины, имеющей произвольную конструкцию забоя, расчеты проводились для изотропной среды.

Таким образом, в окрестности скважины возникают области повышенных касательных напряжений, ответственных за разрушение. Их конфигурация и уровень напряжений зависят от конструкции забоя, свойств среды и величины давления в скважине. Чем ниже давление на забое по сравнению с пластовым, т. е. чем выше депрессия, тем больше напряжения. Под действием напряжений порода деформируется, сначала упруго, при достижении касательных напряжений определенной величины - неупруго с необратимым изменением структуры. Изменения структуры влекут за собой изменение фильтрационных свойств породы.

Ответ на вопрос, как влияет напряженно-деформированное состояние на проницаемость конкретной породы нельзя получить расчетным путем, это зависит от свойств самой породы. Возможность изучения этой зависимости предоставляет уникальная экспериментальная установка, созданная в Институте проблем механики Российской академии наук - Испытательная система трехосного независимого нагружения. Она позволяет в образцах породы кубической формы с гранью 40 или 50 мм, изготовленных из керна коллектора месторождения, воссоздавать любые напряженные состояния, возникающие в призабойной зоне пласта при бурении, освоении и

эксплуатации скважины, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы. Эти возможности имеются благодаря примененной в конструкции нагружающего узла оригинальной кинематической схеме, которая позволяет нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствий друг другу.

ИСТНН - это электрогидравлическая испытательная машина с автоматизированной системой управления. Установка позволяет производить нагружение как по силе, так и по перемещениям, что дает возможность проводить испытания образца вплоть до полного разрушения. При этом в процессе всего испытания в автоматическом режиме измеряется проницаемость образца. Силы и перемещения измеряются тензометрическими датчиками, проницаемость определяется по показаниям расходомеров.

Разработаны три основных программы нагружения образцов, моделирующие условия сжатия породы при увеличении депрессии в скважине:

программа 1 – «обобщенный сдвиг», моделирует напряжения в окрестности открытого ствола скважины;

программа 2 – «обобщенное растяжение», моделирует напряжения в окрестности сферической полости;

программа 3 – «обобщенное сжатие», моделирует напряжения в окрестности горизонтальной щели.

Программа 1 показана на рис.4. Напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - абсолютные величины напряжений, приложенных по осям 1, 2, 3 к образцу. Они соответствуют эффективным напряжениям s_z, s_θ, s_r , действующим в окрестности скважины.

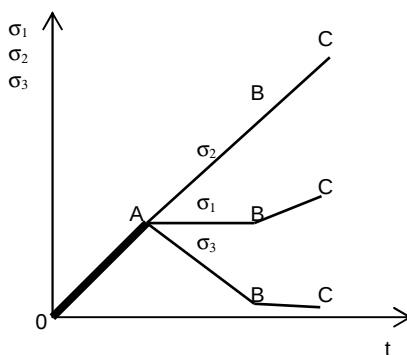


Рис. 4. Программа 1, моделирующая напряжения в окрестности открытого ствола скважины

Этап 1. Образец обжимается равномерно по трем осям до напряжения, равного разности между значением горного давления q на глубине H и величиной пластового давления с коэффициентом $p_0(1-\delta)$ (отрезок ОА). Точка А отвечает напряжениям, действовавшим в грунтовом скелете до пробуривания скважины.

Этап 2. На втором этапе нагружения (отрезки АВ) одна компонента напряжения σ_2 продолжает расти, вторая σ_1 остается постоянной, а третья σ_3 убывает, причем нагрузка меняется таким образом, что среднее напряжение $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ на всем протяжении этапа 2 сохраняется постоянным (это следует из решения задачи Ламэ). Конечная точка этапа (точка В) отвечает состоянию, когда скважина пробурена и заполнена техническим раствором. При этом $\sigma_3 = \delta p_c$.

Этап 3. На третьем этапе моделируется процесс понижения давления в скважине (отрезки ВС). При этом эффективное радиальное напряжение s_r в грунтовом скелете по мере роста депрессии сохраняется, а кольцевые и вертикальные напряжения растут, но вертикальные напряжения увеличиваются примерно в два раза медленнее. Соответственно изменяются компоненты напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ в опыте.

Третий этап продолжается до тех пор, пока образец не разрушится, либо пока не будет достигнута максимально возможная в условиях конкретного месторождения депрессия. Теоретически максимальная депрессия равна пластовому давлению, при этом величина кольцевых напряжений равна $2q$. Затем точно в обратном порядке по отношению к программе нагружения образца осуществляется его разгрузка с целью определения его проницаемости при разгрузке.

Программа 2 предусматривает после этапа всестороннего сжатия одновременный рост двух компонент, соответствующих окружным напряжениям, и уменьшение до значения δp_c третьей компоненты, соответствующей радиальному напряжению.

В программе 3 после этапа всестороннего сжатия одна компонента, соответствующая тангенциальным напряжениям растет, а две другие, соответствующие радиальному и вертикальному напряжениям, падают.

Во второй главе дан анализ большого цикла экспериментальных исследований влияния напряженно-деформированного состояния на проницаемость горных пород из коллекторов нефтяных и газовых месторождений из различных регионов Российской Федерации, разного литологического состава, залегающих на глубинах от ста метров до четырех километров, с разным коэффициентом аномальности пластового давления.

Обобщая результаты испытаний, породы с точки зрения их реакции на изменение напряжений условно можно разделить на три категории.

Породы первой категории представляют собой плотные крепко сцементированные мелкозернистые песчаники, аргиллиты, доломиты и т.п. Эти породы деформируются под действием приложенных напряжений чисто упруго. Проницаемость их по мере роста напряжений уменьшается, но обратимо, т.е. после снятия напряжений она возвращается к начальному значению. Свойства таких пород иллюстрируют рис.5-6, на которых представлены результаты испытаний образца из Северо-Долгинской структуры на шельфе Баренцева моря.

На рис. 5 представлена программа нагружения образца (программа 1 – моделирование открытого ствола скважины) и кривая изменения проницаемости. На рис. 6 – кривые деформирования образца. По оси ординат отложен параметр нагружения – σ_2 , монотонно возрастающее напряжение, соответствующее кольцевым напряжениям. По кривым деформирования видно, что образец в ходе всего опыта деформировался практически упруго. Об этом же говорят очень малые остаточные деформации после разгрузки. Проницаемость образца по мере нагружения постепенно немного уменьшалась, как на этапе всестороннего сжатия, так и при увеличении разностной нагрузки, что связано, очевидно, с уменьшением сечения фильтрационных каналов (компактированием). Максимальное уменьшение проницаемости составило 30 %, однако, при разгрузке она практически полностью восстановилась.

Скв.1: (3017 м) Обр. 462 $k_0=2,6$ мД

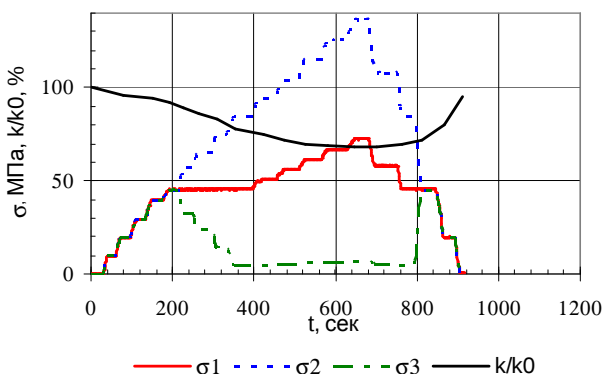


Рис. 5. Программа нагружения и изменение проницаемости породы Северо-Долгинской площади.

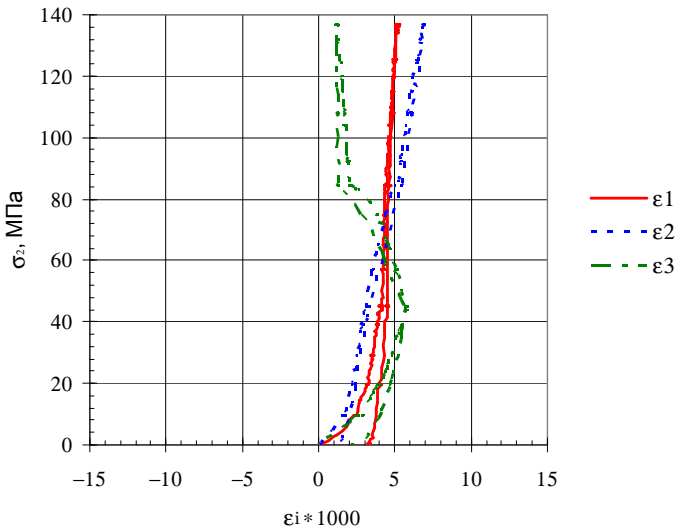


Рис. 6. Кривые деформирования породы Северо-Долгинской площади.

Вторую категорию составляют мелко- и среднезернистые песчаники с небольшим содержанием глины, алевролиты и известняки. Эти породы при небольших депрессиях также деформируются упруго, их проницаемость при этом, как правило, не меняется или немного уменьшается. При достижении депрессией определенной величины, которая зависит от свойств породы, начинается неупругое деформирование. По мере роста неупругих деформаций проницаемость породы значительно уменьшается (на десятки процентов и даже в разы). Это падение проницаемости носит необратимый характер, то есть при снятии напряжений она остается пониженной. При дальнейшем увеличении сдвиговых напряжений (при увеличении депрессии) скорость ползучести образцов увеличивается, и когда деформация достигает некоторой критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением. Свойства пород этой категории иллюстрируют рис. 7-8, на которых представлены результаты испытаний образцов из терригенного коллектора Черемуховского месторождения (Татарстан).

Скв. 5425: (982 м) Обр. 32 $k_0=780$ мД

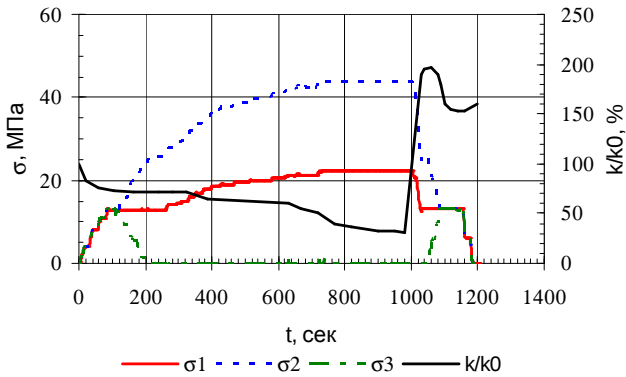


Рис. 7. Программа нагружения и изменение проницаемости породы Черемуховского месторождения.

Скв. 5425: (982 м) Обр. 32

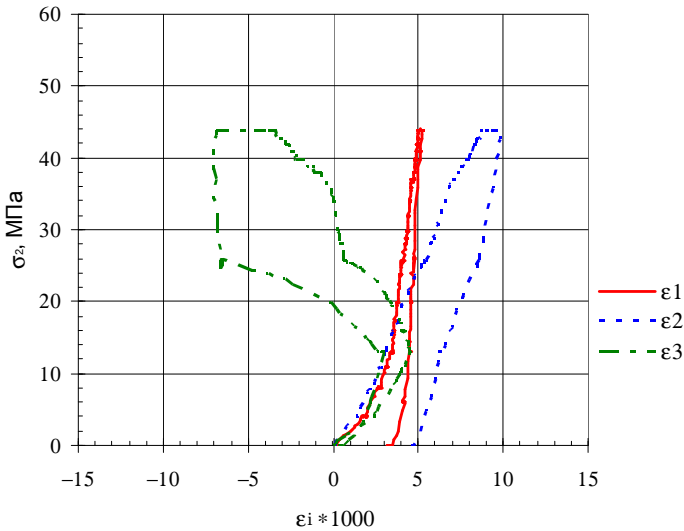


Рис. 8. Кривые деформирования породы Черемуховского месторождения.

К третьей категории относятся песчаники с большим содержанием глины. На рис. 9-10 приведены результаты испытаний породы Кармалинского месторождения (Кубань).

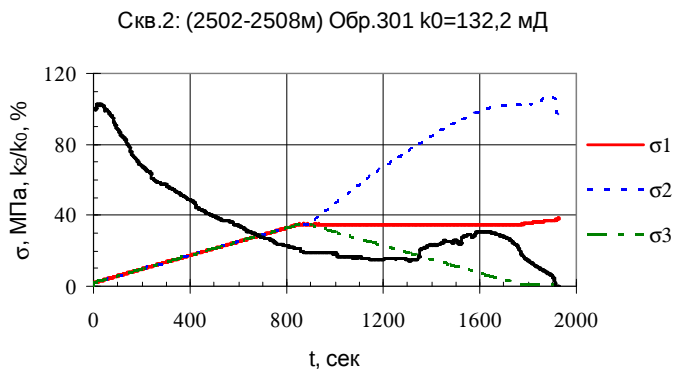


Рис. 9. Программа нагружения и изменение проницаемости породы Кармалинского месторождения.

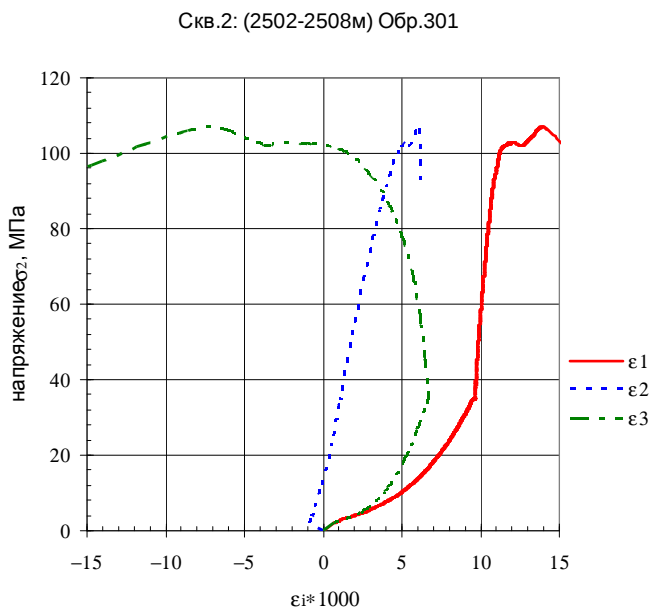


Рис. 10. Кривые деформирования породы Кармалинского месторождения.

Такие породы уже при незначительных депрессиях начинают интенсивно «ползти», а проницаемость их при этом резко падает. Однако даже при значительных деформациях разрушение образцов не наступает, они продолжают деформироваться практически с постоянной скоростью (подобно пластилину), а проницаемость их при этом постепенно уменьшается.

Результаты испытаний позволяют сделать ряд практически важных выводов.

Для скважин, пробуренных в породах первой категории, влияние напряжений на фильтрационные характеристики пласта не велико и может не учитываться при выборе режимов работы на скважине.

Иначе обстоит дело для пород второй и третьей категорий. Обнаруженное в опытах свойство пород второй категории сильно деформироваться («ползти») под действием возникающих в ПЗС касательных напряжений в сочетании с уменьшением при этом их проницаемости может приводить к значительному падению дебита скважин. При увеличении депрессии на забое вокруг открытого ствола скважины или вокруг перфорационных отверстий образуется зона пониженной проницаемости, своего рода низко проницаемая «пробка», затрудняющая фильтрацию в скважину. При дальнейшем увеличении депрессии, когда деформация достигнет некоторой критической величины, порода в ПЗС может начать растрескиваться. В результате в окрестности скважины возникает искусственная разветвленная система трещин, которая играет роль новой системы фильтрационных каналов. Это приводит к тому, что проницаемость породы резко увеличивается, причем необратимо, и фильтрационные свойства ПЗС не только восстанавливаются, но и значительно улучшаются.

Это явление наблюдалось при испытаниях образцов пород из многих месторождений, в частности, из коллектора Сыморьяхского месторождения ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». Моделирование на установке ИСТНН роста депрессии в открытом стволе показало, что при величинах депрессии 50-60 ат деформирование породы переходило в неупругую стадию, что сопровождалось заметным уменьшением проницаемости. При достижении депрессией уровня 90-100 ат происходило разрушение, дезинтеграция породы и резкое увеличение проницаемости. При освоении скважины № 7197 этого месторождения были получены результаты, которые подтвердили установленную при испытаниях образцов закономерность. В процессе освоения на забое скважины последовательно создавались депрессии 30 ат, 60 ат и 90 ат, и после каждой по кривой восстановления уровня рассчитывалась продуктивность скважины. После создания на забое депрессии 60 ат продуктивность скважины упала примерно в полтора раза по сравнению с продуктивностью, определенной при депрессии 30 ат. Когда

депрессию довели до 90 ат, продуктивность скважины значительно выросла и после освоения превысила ожидаемую в четыре раза.

Указанное явление искусственного растрескивания породы и увеличения при этом ее проницаемости путем создания в ПЗС необходимых напряжений легло в основу нового способа повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метода георыхления.

Процесс растрескивания породы можно интенсифицировать путем выбора необходимой конструкции забоя скважины (предварительного нарезания щелей, проведения дополнительной перфорации, перфорации открытого ствола и т.д.), чем достигается значительное увеличение действующих в ПЗС напряжений. Кроме того, таким способом можно инициировать процесс трещинообразования и в прочных породах, которые плохо подвержены разрушению.

В качестве примера можно привести терригенный коллектор Сибирского месторождения в Пермской области. Его коллектор представляет собой прочный мелкозернистый песчаник. Испытания образцов показали, что моделирование даже максимально возможной депрессии в открытом стволе не приводило к растрескиванию породы и заметному изменению ее проницаемости. Однако, при моделировании перфорационного отверстия в открытом стволе, что достигалось просверливанием в образцах отверстий диаметром 6 мм, порода при больших депрессиях начинала ползти и растрескиваться. Это связано с тем, что для неупругого деформирования и растрескивания породы оказалось недостаточно напряжений, возникающих в окрестности открытого ствола скважины даже при полном ее осушении. Перфорационные же отверстия сыграли роль концентраторов напряжений, значительно увеличив действующие в их окрестности напряжения и инициировав процесс трещинообразования. Установленные факты подтвердились при опытно-промысловых испытаниях метода георыхления на скважинах Сибирского месторождения. Капитальный ремонт скважины с созданием и длительным поддержанием депрессии, близкой к максимальной, не дал результата. В то же время капитальный ремонт нагнетательной скважины тем же способом, но с предварительной перфорацией открытого ствола, позволил увеличить приемистость скважины с $8 \text{ м}^3/\text{сут}$ до $200 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Иная картина наблюдается в коллекторах с большим содержанием глины (породы третьей категории). Как отмечалось выше, эти породы уже при незначительных депрессиях начинают «ползти», и их проницаемость падает. Инициировать процесс растрескивания в таких породах оказалось невозможным даже при максимальных депрессиях и наличии концентраторов напряжений (щелей, перфорационных отверстий). Так, при испытании породы Нижнечутинского месторождения в Коми было установлено, что при создании в ней даже небольших касательных

напряжений, соответствующих эксплуатационным депрессиям, проницаемость породы падает в два раза. Дебит скважин по этой причине оказывается существенно пониженным вследствие образования в окрестности открытого ствола или перфорационных отверстий низко проницаемой зоны. Увеличение депрессии в этом случае лишь ухудшает ситуацию и может привести к полному прекращению притока.

Единственно возможным выходом в такой ситуации является разгрузка породы в ПЗС от действующих в ней касательных напряжений. В частности, для открытого ствола скважины это сводится к уменьшению действующих в ее окрестности кольцевых напряжений s_θ , поскольку максимальные касательные напряжения в этом случае определяются полуразностью эффективных кольцевых напряжений s_θ и радиальных напряжений s_r , близких к нулю. На практике этого можно достичь путем предварительного, т.е. до создания депрессии, нарезания вертикальных щелей в открытом участке ствола скважины. Сколько щелей и какого размера необходимо нарезать, чтобы добиться эффективной разгрузки призабойной части пласта от касательных напряжений?

С помощью ANSYS были проведены расчеты полей напряжений в окрестности открытого ствола с вертикальными щелями для условий Нижнечутинского месторождения. На рис. 11а показано распределение касательных напряжений в окрестности скважины со щелями минимального размера – 0,1 радиуса скважины.

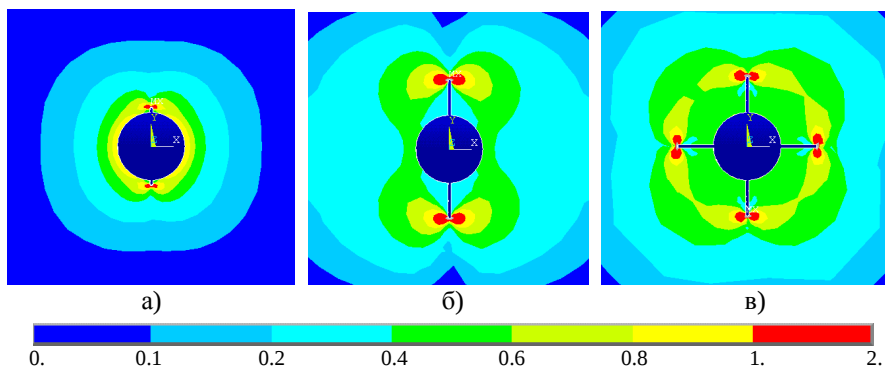


Рис.11. Интенсивность касательных напряжений в окрестности скважины с вертикальными щелями для условий Нижнечутинского месторождения

В областях, где τ_i превышает $0,6q$, по данным испытаний происходит падение проницаемости породы. Из рис. 11а видно, что скважина

окружена низкопроницаемой «пробкой», толщина которой составляет примерно 0,5 радиуса скважины. Наличие щелей мало влияет на ситуацию, распределение напряжений вокруг скважины почти такое же, как при отсутствии щелей.

Нарезание более глубоких вертикальных щелей, по размеру сравнимых с радиусом скважины, существенно меняет ситуацию. На рис. 11б показано распределение интенсивности касательных напряжений в окрестности необсаженной скважины с двумя диаметрально противоположными вертикальными щелями. Глубина щелей равна радиусу скважины. Из рис. 11б видно, что щели практически в два раза снижают действующие на контуре скважины касательные напряжения, а зоны пониженной проницаемости значительно уменьшаются в размере и отодвигаются в глубь пласта. Таким образом, наличие двух вертикальных щелей существенно улучшает ситуацию и в целом сохраняет проницаемость породы в ПЗС.

Увеличение количества нарезаемых вертикальных щелей не только не улучшает ситуацию, а наоборот ухудшает ее. На рис. 11в показано распределение интенсивности касательных напряжений вокруг скважины с четырьмя вертикальными щелями глубиной, равной радиусу скважины. Видно, что, хотя непосредственно вблизи скважины порода разгружена, на расстоянии примерно двух радиусов от центра скважины развивается замкнутая зона пониженной проницаемости, которая будет играть роль новой «пробки», существенно снижающей дебит скважины.

Полученные результаты убедительно свидетельствуют, что возникающие в призабойной зоне пласта напряжения могут оказывать существенное влияние на фильтрационные свойства пласта и, как следствие, на продуктивность скважин. Это влияние может быть как положительным, так и отрицательным. Предварительные исследования свойств породы конкретного месторождения и проведение соответствующих расчетов позволяют выбирать конструкцию забоя и величину создаваемых на забое депрессий, которые обеспечивают максимальный дебит скважин. Такой подход может стать толчком к развитию новых методов увеличения продуктивности скважин и повышения нефтеотдачи пластов.

В третьей главе рассматривается задача о фильтрации двухфазной многокомпонентной углеводородной смеси для оценки эффективности применения метода георыхления на газоконденсатных месторождениях. Метод георыхления обеспечивает увеличение проницаемости призабойной зоны скважины за счет направленной разгрузки пласта. Инициация процесса георыхления требует создания на забое скважины глубоких депрессий, в результате в окрестности скважины происходит накопление ретроградного конденсата, что приводит к уменьшению фазовой проницаемости породы по

газу. Существование этих двух разнонаправленных с точки зрения изменения проницаемости процессов необходимо учитывать при использовании данного подхода на газоконденсатных месторождениях.

Процесс фильтрации двухфазной смеси может быть описан системой дифференциальных уравнений фильтрации для каждой фазы с учетом массообмена между фазами. Уравнения неразрывности для каждой из фаз записываются следующим образом

$$m \frac{\partial}{\partial t} [\rho_g \sigma] + \text{div} [\rho_g v_g] + Q = 0$$

$$m \frac{\partial}{\partial t} [\rho_f (1 - \sigma)] + \text{div} [\rho_f v_f] - Q = 0$$

Движение каждой из фаз считается безынерционным, подчиняющимся закону Дарси

$$v_g = -\frac{k}{\mu_g} f_g(\sigma) \text{grad } p \quad v_f = -\frac{k}{\mu_f} f_f(\sigma) \text{grad } p,$$

здесь m – пористость, ρ – плотность, v – скорость фильтрации, Q – масса газа, переходящего в жидкую фазу в единице объема пористой среды за единицу времени, σ – относительное содержание газовой фазы. Индексом g обозначены величины, относящиеся к газовой фазе, индексом f – относящейся к жидкой фазе.

Если предположить, что в каждый момент времени и в каждой точке пространства относительное содержание газа σ в газоконденсатной смеси соответствует равновесному и определяется исключительно текущим давлением p (температура предполагается постоянной), то σ можно считать заданной функцией давления. Кривая зависимости $\sigma(p)$ (изотерма конденсации) для условий Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) приведена на рис. 12. Сложение уравнений позволяет исключить величину Q и получить одно дифференциальное уравнение относительно давления p .

$$m \frac{\partial}{\partial t} [\rho_g \sigma + \rho_f (1 - \sigma)] - \text{div} \left\{ k \left[\frac{\rho_g}{\mu_g} f_g(\sigma) + \frac{\rho_f}{\mu_f} f_f(\sigma) \right] \text{grad } p \right\} = 0 \quad (1)$$

Однако, наличие в составе газоконденсатной смеси нескольких углеводородных фракций, обладающих разными физико-химическими свойствами, существенно усложняет описание процесса фильтрации. Это связано с характером фазовых диаграмм многокомпонентных смесей, которые принципиально отличаются от фазовых диаграмм чистых веществ и

зависят от химического состава смеси. К таким отличиям относятся следующие.

1. Наличие двумерных областей на фазовых диаграммах давление – температура, соответствующих условиям одновременного существования жидкой и газообразной фаз.

2. Наличие ретроградных областей, где конденсация и испарение происходят в направлении, обратном фазовым превращениям чистого вещества. Ретроградная конденсация означает, что количество образовавшейся жидкости увеличивается при снижении давления от давления начала конденсации до давления максимальной конденсации при данной температуре.

3. Изменение химического состава каждой из фаз в процессе фазовых изменений, так как при уменьшении давления ниже начала конденсации при данной температуре конденсируются преимущественно тяжелые фракции C_{5+} .

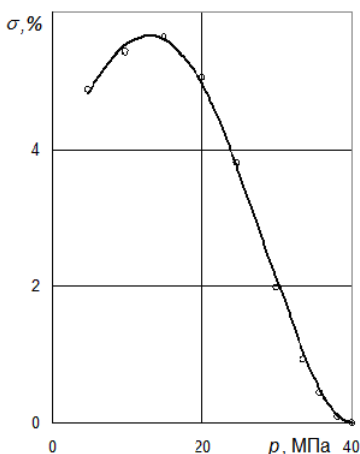


Рис. 12. Изотерма конденсации для условий АГКМ

После прохождения фильтрующего пластового газа через точку пласта с давлением ниже давления начала конденсации в пористую среду в виде конденсата выпадают более тяжелые фракции. В результате действия капиллярных сил выпавшая жидкость может быть неподвижной или фильтруется со скоростью, меньшей скорости фильтрующегося газа. В пористой среде происходит накопление ретроградного конденсата, состоящего преимущественно из тяжелых фракций C_{5+} . Таким образом, в

процессе фильтрации меняется химический состав смеси, соотношение жидкой и газовой фаз не соответствует равновесному и не может быть определено по изотерме конденсации, полученной при испытаниях в замкнутом сосуде.

Предполагается, что в каждой порции газа, подвергшейся изменению давления, происходит фазовое превращение согласно фазовой диаграмме пластового газа, т.е. справедлив дифференциальный закон для фазового превращения.

$$dV = \Phi(p) dp$$

Здесь V – объем газа, переходящего в жидкую фазу, $\Phi(p)$ – функция давления, которая может быть получена как производная от функции $\sigma(p)$, определяемой изотермой конденсации.

Масса в единице объема среды составляет $\rho_g \sigma m$, тогда

$$Q = \rho_g \sigma m \frac{dV}{dt} = \rho_g \sigma m \Phi(p) \frac{dp}{dt}$$

Для движущегося газа полная производная давления по времени есть

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + w_g \text{grad } p, \quad w_g = \frac{v_g}{m\sigma}$$

где w_g – скорость движения частиц газа в порах.

Подстановка последовательно выражения полной производной давления по времени в выражение для Q и затем в уравнение фильтрации для газовой фазы дает уравнение, которое вместе с уравнением (1) дает систему двух уравнений относительно двух неизвестных p и σ :

$$m \frac{\partial}{\partial t} [\rho_g \sigma] - \text{div} \left[\rho_g \frac{k}{\mu_g} f_g(\sigma) \text{grad } p \right] + \rho_g \Phi(p) \left[\sigma m \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{\mu_g} f_g(\sigma) (\text{grad } p)^2 \right] = 0$$

Для оценки эффективности работы скважины представляет интерес установившийся режим фильтрации. В случае стационарного течения полученная система уравнений преобразуется в систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ rk \left[\frac{\rho_g}{\mu_g} f_g(\sigma) + \frac{\rho_f}{\mu_f} f_f(\sigma) \right] \frac{\partial p}{\partial r} \right\} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho_g \frac{k}{\mu_g} f_g(\sigma) \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \rho_g \Phi(p) \frac{k}{\mu_g} f_g(\sigma) \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)^2 = 0$$

где r – полярная координата.

В систему уравнений входит ряд зависимостей, которые характеризуют свойства пластового флюида конкретного месторождения и определяются экспериментально:

зависимость соотношения жидкой и газообразной фаз в смеси (изотерма конденсации) от давления,
 фазовые проницаемости в зависимости от соотношения фаз,
 зависимости плотности газа и конденсата от давления,
 зависимость динамической вязкости газа и конденсата от давления при пластовой температуре.

Эти зависимости были предоставлены ВНИИГАЗ. Для проведения расчетов они были аппроксимированы следующими сглаживающими функциями:

$$\begin{aligned}\Phi(p) &= 0.01(0.0692 + 0.00357(40 - p) - 0.0000456(40 - p)^2) \\ \rho_g &= 0.03383 p - 0.00022 p^2, & \rho_f &= 0.794 + 2.85/\sqrt{p} \\ \mu_g &= 0.174 + 0.0206 p, & \mu_f &= 34.5 + 903/p \\ f_g &= \frac{1}{120(1-\sigma)^4 + 3.26(1-\sigma)^2 + 1}, & f_f &= 0.64(1-\sigma)^4 + 0.01(1-\sigma)\end{aligned}$$

Модель также должна учитывать изменение фильтрационных свойств породы в зависимости от напряженного состояния в окрестности скважины и связанного с ним деформирования и разрушения грунтового скелета коллектора. На испытательном стенде были проведены испытания образцов пород из коллектора АГКМ, которые позволили установить, что при создании депрессии 35-40 МПа в окрестности скважины происходит растрескивание породы и резкое необратимое увеличение ее проницаемости.

Таким образом, до проведения работ по методу георыхления в окрестности скважины имеется закольматированная зона радиуса r_1 с проницаемостью k_1 в несколько раз ниже естественной проницаемости коллектора k_0 . Как показывают данные геофизических исследований, размер этой зоны обычно составляет 3-5 радиусов скважины r_c . Расчеты проводились для трех значений радиуса зоны кольматации $\frac{r_1}{r_c} = 3, 4, 5$.

$$k = k(r) = \begin{cases} k_1, & r_c \leq r \leq r_1 \\ k_0, & r_1 \leq r \leq r_k \end{cases}, \quad \text{где} \quad r_k = 100r_c - \text{радиус контура питания.}$$

После проведения работ, т. е. после создания глубокой депрессии, вокруг скважины образуется зона повышенной проницаемости k_2 радиусом

r_2 . Радиус разрыхленной зоны r_2 зависит от величины депрессии: чем больше депрессия, тем дальше вглубь пласта распространится эта зона.

$$\text{Если } r_2 \geq r_1, \text{ то } k = k(r) = \begin{cases} k_2, & r_c \leq r \leq r_2 \\ k_0, & r_2 \leq r \leq r_k \end{cases}$$

В расчетах была использована гладкая аппроксимирующая функция

$$k'(r) = 1 + \frac{k_2' - 1}{2} [1 - \text{th } \beta(r' - r_2')]; \quad k' = \frac{k}{k_0}, \quad r' = \frac{r}{r_c}$$

Здесь β - коэффициент, учитывающий резкость изменения проницаемости при переходе из призабойной зоны вглубь пласта; его значение слабо влияет на результаты. В расчетах принималось $\beta = 6$.

$$\text{Если } r_2 \leq r_1, \text{ то } k = k(r) = \begin{cases} k_2, & r_c \leq r \leq r_2 \\ k_1, & r_2 \leq r \leq r_1 \\ k_0, & r_1 \leq r \leq r_k \end{cases},$$

и аппроксимирующая функция имеет вид

$$k'(r) = 1 + \frac{k_2' - k_1'}{2} [1 - \text{th } \beta(r' - r_2')] + \frac{k_1' - 1}{2} [1 - \text{th } \beta(r' - r_1')]$$

Были проведены расчеты установившегося режима фильтрации пластового флюида для условий АГКМ при давлении на забое скважины, соответствующем эксплуатационному значению 40 МПа, до и после проведения работ по методу георыхления. Соответственно, граничные условия были следующими:

$p(r_k) = 60$ МПа – пластовое давление на АГКМ,

$p(r_c) = 40$ МПа – эксплуатационное забойное давление.

Давление конденсации для АГКМ равно 40 МПа, поэтому забойном давлении 40 МПа конденсата в пласте не образуется, имеет место однофазная фильтрация. При этом первое уравнение полученной системы принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho_g(p) \frac{k(r)}{\mu_g(p)} \frac{\partial p}{\partial r} \right] = 0$$

оно интегрируется разделением переменных:

$$\int_p^{p(r_k)} \frac{\rho_g(p)}{\mu_g(p)} dp = \int_r^{r_k} \frac{C_1}{r k(r)} dr$$

Расчет фильтрации после проведения работ по методу георыхления осуществляется также посредством решения первого уравнения системы, но с иной зависимостью проницаемости от координаты, которую необходимо

рассчитать. Для определения газонасыщенности в пласте, которая образуется, после проведения работ по георыхлению, полученная система уравнений решалась с граничными условиями

$$p(r_k) = 60 \text{ МПа}, p(r_c) = 20 \text{ МПа}.$$

Система решалась численно – средствами программы МАТЕМАТИКА.

На рис. 13 представлены кривые распределения газонасыщенности при установившемся режиме при давлении на забое 20 МПа для однородного пласта – сплошная линия, для пласта с ухудшенной в 10 раз в результате кольтации призабойной зоной – штриховая линия и для пласта с улучшенной в 10 раз в результате георыхления призабойной зоной – штрихпунктирная линия.

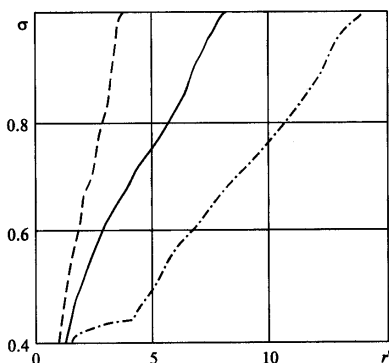


Рис. 13. Распределение газонасыщенности в пласте

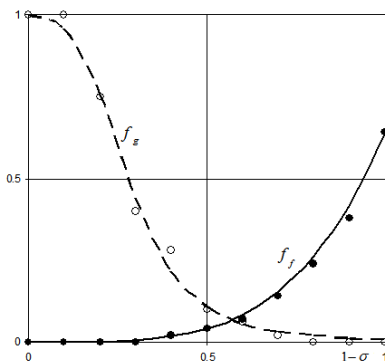


Рис. 14. Фазовые проницаемости для АГКМ

При подъеме забойного давления до эксплуатационного значения 40 МПа нового конденсата не образуется, а уже выпавший частично вытекает в скважину. Как видно из графика фазовых проницаемостей (рис.14), при газонасыщенности выше 0.7 фазовая проницаемость конденсата практически равна нулю и он неподвижен. На участке около стенки скважины, где газонасыщенность была меньше 0.7, в процессе выхода на установившийся режим и фильтрации конденсата в скважину газонасыщенность поднимется до значения 0.7. В области, где насыщенность газом больше 0.7 и конденсат не фильтрует, ее величина не изменится. На рис. 15 представлены кривые распределения проницаемости по газу при $p(r_c) = 40 \text{ МПа}$ для двух случаев: при наличии в окрестности скважины зоны с пониженной в 10 раз абсолютной проницаемостью ($r_1 = 4r_c$) – штриховая линия и при наличии в окрестности скважины зоны с повышенной в 10 раз проницаемостью

вследствие проведения работ по методу георыхления – штрихпунктирная линия. Во втором случае в окрестности скважины имеется область размером 10-12 радиусов, где выпал конденсат, что привело к уменьшению проницаемости по газу примерно в два раза по отношению к природной проницаемости.

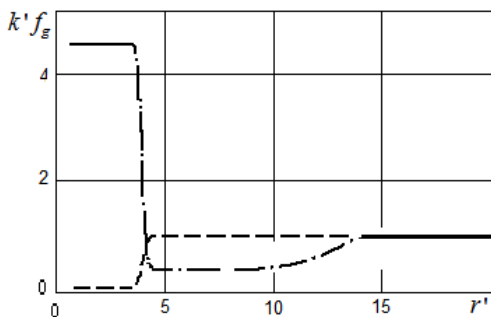


Рис. 15. Распределение проницаемости по газу в пласте

Окончательный расчет для установившегося после проведения работ по методу георыхления режима осуществлялся с помощью решения первого уравнения системы с заменой $k(r)$ на $k(r) f_g(\sigma(r))$. Решение имеет вид

$$\int_p^{p(r_k)} \frac{\rho_g(p)}{\mu_g(p)} dp = \int_r^{r_k} \frac{C_2}{r k(r) f_g(\sigma(r))} dr$$

В таблице приведены значения дебитов газа для установившихся режимов при разных значениях абсолютной проницаемости в призабойной зоне скважины до и после проведения работ по методу георыхления. Здесь Q' – дебит скважины, отнесенный к дебиту в пласте с однородной проницаемостью k_0 . Расчеты были проведены для трех величин закольматированной зоны и трех величин разрыхленной зоны: 3, 4 и 5 радиусов скважины в разных комбинациях. Сопоставление этих величин показывает, что создание больших депрессий и связанная с ним ретроградная конденсация ухудшает эксплуатационные характеристики скважины по сравнению с идеальной скважиной даже при наличии зоны георыхления, однако для реальной скважины с ухудшенной призабойной зоной применение метода георыхления дает заметный эффект. Насколько сильно вырастет проницаемость в результате георыхления, не имеет большого значения. Важно, чтобы разрыхленная зона была больше или одинакова по размеру с зоной кольматации, т.е. чтобы вокруг скважины не оставалось

плохо проницаемой области, в противном случае эффект георыхления незначителен.

Следует заметить, что для создания в окрестности скважины зоны с улучшенной проницаемостью требуется кратковременная депрессия, при этом конденсат не успеет накопиться в окрестности скважины в тех объемах, которые образуются в случае выхода на установившийся режим, поэтому проницаемость по газу упадет в меньшей степени, чем дают представленные расчеты. Кроме того, образование новой развитой системы трещин в результате георыхления должно привести к изменению кривых фазовых проницаемостей - наличие конденсата будет меньше тормозить движение газа. Так что полученная оценка дает нижний предел эффективности применения метода георыхления на АГКМ.

Таблица. Дебит скважины до и после проведения работ по георыхлению

Состояние ПЗС	Размер ПЗС		
	$r_1' = 3$	$r_1' = 4$	$r_1' = 5$
До проведения работ по методу георыхления			
$k_1' = 0.1$	0.33	0.27	0.25
После проведения работ по методу георыхления			
$k_2' = 5$	0.71	$r_2' = r_1'$ 0.77	0.82
	0.71	$r_2' = 3$ 0.47	0.31
$k_2' = 10$	0.74	$r_2' = r_1'$ 0.80	0.87
	0.74	$r_2' = 3$ 0.50	0.33

В четвертой главе представлена новая технология повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод георыхления, приведены и проанализированы результаты опытно-промысловых испытаний.

Целью метода георыхления является увеличение проницаемости призабойной части пласта. Но достигается это не за счет восстановления проницаемости природных фильтрационных каналов, что зачастую оказывается невозможным, а за счет искусственного создания в ПЗП

разветвленной системы трещин, которая и будет играть роль новой системы фильтрационных каналов. Причем проницаемость этой новой системы фильтрационных каналов может значительно превосходить естественную проницаемость пласта.

Растрескивание, разрыхление породы в ПЗП вызывается за счет использования упругой энергии, запасенной в массиве горных пород (горного давления), и энергии пластовой жидкости. Для этого вокруг скважины надо создать напряженное состояние определенного вида и уровня. Это делается путем понижения давления в скважине до определенной величины (создания депрессии). Инициирование процесса георыхления может потребовать также проведения предварительных технологических операций. Таких, например, как вырезание участка обсадной колонны в продуктивном интервале ствола скважины, перфорации определенного типа и плотности, нарезания щелей заданной ориентации и др. Величина депрессии и необходимые предварительные технологические операции определяются в результате испытаний породы коллектора месторождения на ИСТНН.

Технология георыхления включает два этапа:

1. На первом этапе на образцах породы из коллектора месторождения проводится физическое моделирование на ИСТНН условий, возникающих в окрестности скважины при увеличении депрессии для различных конструкций забоя. В процессе испытаний определяется зависимость проницаемости породы от уровня депрессии для различных конструкций забоя. Сопоставление результатов испытаний породы коллектора и расчетов позволяет выбрать оптимальные с точки зрения увеличения дебита скважины конструкцию забоя и уровень депрессии.
2. На втором этапе совместно со специалистами компании, разрабатывающей месторождение, составляется план работ и производятся работы на скважине. Реализация метода георыхления на скважине зависит от возможностей нефтепромысла и экономической целесообразности.

Метод георыхления успешно применялся на нескольких десятках скважин месторождений Западной Сибири и Пермской области при освоении скважин, капитальном ремонте добывающих скважин и капитальном ремонте нагнетательных скважин.

Практика показывает, что на необсаженных стволах обычно удается достичь 2-4-х кратного увеличения дебита, на обсаженных стволах 1,5-2 кратного увеличения.

Разработанная технология защищена 7 российскими патентами и 1 евразийским патентом.

В заключении перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработана методика экспериментального исследования деформационных, прочностных и фильтрационных свойств горных пород на Испытательной системе трехосного независимого нагружения. Она включает в себя расчет напряженного состояния в окрестности скважины для различных конструкций забоя и его изменения при увеличении депрессии. На основе расчетов составляются программы нагружения образцов. В работе приведены три базовые программы, моделирующие основные конструкции забоя скважины: открытый ствол, сферическая полость (кончик перфорационного отверстия), горизонтальная щель. По разработанным программам на образцах породы из коллектора месторождения проводится физическое моделирование на ИСТНН условий, возникающих в окрестности скважины при увеличении депрессии для различных конструкций забоя. В процессе испытаний определяется зависимость проницаемости породы от уровня депрессии для различных конструкций забоя.

На основе анализа результатов большого цикла экспериментальных исследований свойств пород нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений из разных регионов России, залегающих на различных глубинах, предложена классификация пород по их реакции с точки зрения фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния в зависимости от их литологического состава и структуры. Выделено три категории горных пород.

К первой категории относятся плотные крепко сцементированные мелкозернистые песчаники, аргиллиты, доломиты и т.п. Эти породы деформируются под действием приложенных напряжений чисто упруго. Проницаемость их по мере роста напряжений уменьшается, но обратимо, после снятия напряжений она возвращается к начальному значению.

Вторую категорию составляют мелко- средне- и крупнозернистые песчаники с небольшим содержанием глины, алевролиты и известняки. Эти породы при достижении напряжениями определенного уровня (определенной величины депрессии в скважине), который зависит от типа породы, условий залегания, пластового давления и других факторов, начинают деформироваться неупруго – «ползти». По мере роста неупругих деформаций проницаемость породы значительно необратимо уменьшается. Когда деформация достигает некоторой критической величины, порода начинает растрескиваться и разрушаться, что сопровождается резким увеличением ее проницаемости даже по сравнению с первоначальным значением.

К третьей категории относятся песчаники с большим содержанием глины. Такие породы уже при незначительных депрессиях начинают интенсивно «ползти», а проницаемость их при этом резко падает. Однако даже при значительных деформациях разрушение образцов не наступает, они

продолжают деформироваться практически с постоянной скоростью, а проницаемость их при этом постепенно необратимо уменьшается.

Разработана методология выбора оптимальных для конкретного месторождения методов повышения продуктивности скважин и газонефтеотдачи пластов, которая включает в себя определение конструкции забоя скважины и уровень депрессии, необходимые для улучшения или, когда это невозможно, сохранения фильтрационных свойств в окрестности скважины.

Предложено решение задачи о фильтрации газоконденсатного флюида в скважину при наличии ретроградной конденсации и зависимости проницаемости породы коллектора от давления в скважине. Инициация процесса георыхления, направленного на увеличение абсолютной проницаемости пласта, требует создания на забое скважины глубоких депрессий, в результате в ПЗС происходит накопление ретроградного конденсата, что приводит к уменьшению фазовой проницаемости коллектора по газу. Построена математическая модель фильтрации двухфазной многокомпонентной смеси, учитывающая существование этих двух разнонаправленных с точки зрения изменения проницаемости процессов. Модель основана на предположении, что в каждой порции газа при изменении давления происходит фазовое превращение согласно фазовой диаграмме. При этом в силу капиллярных связей жидкой фазы со скелетом относительное содержание фаз в каждой точке и в каждый момент времени не является равновесным, поэтому условие фазового равновесия записывается для приращений.

Проведены расчеты для условий Астраханского газоконденсатного месторождения. Они показали, что создание больших депрессий, необходимых для образования в окрестности скважины зоны повышенной проницаемости, и связанная с ним ретроградная конденсация ухудшает эксплуатационные характеристики скважины по сравнению с идеальной скважиной даже при наличии зоны георыхления, однако для реальной скважины с ухудшенной призабойной зоной применение метода георыхления дает заметный эффект.

Разработана и успешно испытана на ряде месторождений новая эффективная, экономичная и экологически чистая технология повышения дебитов нефтяных и газовых скважин, основанная на направленной разгрузке пласта – метод георыхления. Практика показала, что технология дает кратное увеличение дебита.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газонасыщенных угольных пластах // ФТПРПИ. 1988. № 6. С.47-55.
2. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Одинцев В.Н. Механика гидрогазоимпульсного воздействия на трещиновато-пористую породу при скважинной гидродобыче // ФТПРПИ. 1995. № 6. С.
3. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. и др. Способ вскрытия продуктивного пласта. – Патент РФ № 2110664 от 10.05.1998.
4. Христианович С.А., Карев В.И. К расчету установившегося течения в скважине при наличии выделения газа из нефти (газлифта). В кн. Христианович С.А. Избранные работы. М.: Изд-во Наука – Изд-во МФТИ, 1998. С. 207-216.
5. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Развитие модели фильтрации газа в газонасыщенных угольных пластах.- Труды VIII международной научной школы "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках". Симферопольский государственный университет. 1998. С.57-58.
6. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.
7. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Динамика газовыделения из угольного пласта при проходке выработки и выбросоопасность ситуации // ФТПРПИ. 2001. № 1. С.56-63.
8. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Христианович С.А. Взаимовлияние деформационных и фильтрационных процессов в коллекторах нефтяных и газовых месторождений и создание новых технологий // Тезисы докл. на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. Пермь. 2001. С.309-310.
9. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ вызова или увеличения притока флюида в скважинах. - Патент РФ № 2163666 27.02.2001.
10. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ освоения скважин. – Патент РФ № 2179239 от 10.02.2002.
11. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ ремонта скважин. – Патент РФ № 2188317 от 27.08.2002.
12. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ освоения скважин. – Евразийский патент № 003452 от 26.06.2003.
13. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ обработки нагнетательной скважины. – Патент РФ № 2213852 от 10.10.2003.

14. Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Метод георыхления – Новый подход к проблеме повышения продуктивности скважин // Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31-35.
15. Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Реализация метода георыхления для увеличения приемистости нагнетательной скважины // Технологии ТЭК. 2003. № 4. С. 59-64.
16. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Прихно М.А. Определение деформационных и прочностных свойств горных пород применительно к баженовским отложениям // Технологии ТЭК. 2005. № 3. С. 17-21.
17. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Математическое и физическое моделирование разрушения горных пород в окрестности наклонно направленных нефтяных и газовых скважин с учетом анизотропии упругих и прочностных свойств пород // Тезисы докл. на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород. 2006.
18. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Зависимость проницаемости призабойной зоны пласта от депрессии и конструкции забоя для различных типов горных пород // Технологии ТЭК. 2006. № 6. С.59 -63.
19. Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф. и др. Способ обработки призабойной зоны скважины. – Патент РФ № 2285794 от 20.10.2006.
20. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Об устойчивости наклонных и горизонтальных нефтяных и газовых скважин. В Сб. Актуальные проблемы механики. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 2009. С.455-469.
21. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Роль напряжений в формировании эксплуатационных свойств скважин. В Сб. Актуальные проблемы механики. Механика деформируемого твердого тела.– М.: Наука, 2009. С.470-476.
22. Карев В.И., Устинов К.Б. Фильтрация газоконденсатной смеси при применении метода георыхления // ПММ. Том 73. Вып. 5, 2009. С.787-798.

Карев Владимир Иосифович

Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на
фильтрационный процесс и дебит скважин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано к печати 25.08.2010 г. Заказ № 21-2010 г. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Учреждения Российской академии наук
Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

119526 Москва, пр. Вернадского, 101, кор. 1